Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente
Volumen 28
2024

AVERMA

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente

ASADES



Asociación Argentina de

Energías Renovables y Ambiente - ASADES

AVANCES EN ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE – AVERMA

Vol. 28, 2024 ISSN 2796-8111

XLVI Reunión de Trabajo de la ASADES

Secciones 1 a 9

COMISIÓN DE PUBLICACIONES

Directora

Mónica Martínez Bogado

Editores

Graciela Viegas, Jésica Esparza, Guillermina Re, Ismael Eyras, Pedro Chevez, Jorge Barral, Alba Lema, Mariana Tamasi, Julio Durán, Mariela Videla, Sonia Esteban, Andrés Díaz, Rocío Guido, Santiago Fondoso Ossola, Marcos Hongn, Camila Gea Salim, Aien Salvo, Juan Francisco Linares, Rodrigo Alonso-Suárez, María José Denegri, Verónica Javi, Camila Binda, Mónica Pasculli, Pablo Dellicompagni, Martín Zoloff Michoff

Apoyo técnico

Miguel Tolaba - Mauricio Troviano

COMITÉ EVALUADOR

Abalone, Rita
Ajmat, Rajmat
Alchapar, Noelia
Alías, Herminia
Altobelli, Fabiana Noelia
Aristegui, Rosana
Bahamonde, Pablo
Barea, Gustavo
Barral, Jorge Raúl
Barros, María Victoria
Bertossi, Marcelo
Binda Galindez, Camila
Birche, Mariana
Bolzi, Claudio
Boutet, María Laura
Cadena, Carlos
Camacho, Roberts
Magdalena
Capuano, Vicente
Cardoso, Betina
Castro, Néstor
Ceballos, Juan Carlos
Cesare, Mary Flor
Chemes, Jorge
Chevez, Pedro
Cisterna, Marta Susana
Clauser, Nicolás Martín
Colman Lerner, Jorge Esteban
Condorí, Miguel Ángel
Correa, Gabriel
Cortizo, Daniela
Costa, Rodrigo
Cravero, Silvia Ana Carla
De Paul, Irene Judith
Dellicompagni, Pablo
de Oliveira, Manoel Henrique
Denegri, María José
Di Lalla, Nicolás
Díaz, Andrés Emanuel
Dicroce, Luciano
Díscoli, Carlos Alberto
Diulio, María de la Paz
Durán Julio César
Elsinger, David
Esteban, Ester Sonia
Fernández, Jorge
Filippín, Celina
Firman, Andrés
Flores Larsen, Silvana
Franco, Judith Ada
Furtado de Medeiros, Joao
Galimberti, Pablo Daniel
Ganem, Carolina
García Schilardi, María Emilia
Gardey Merino, María Celeste
Garita, Sebastián
Gatto, Laura
Gennari, Fabiana
Giglio, María Luciana
González, Facundo
González, Jorge
González, Mario
Gonzalo, Guillermo
Hernández, Alejandro Luis
Hongn, Marcos
Hümoller, Juan Martín
Krautner, Alejandro Javier
Laguarda, Agustín
Lanson, Anahí
Lavorante, María José
Lell, Julián Alejandro
Lema, Alba
Lima, Francisco
Llano, María Paula
Luccini, Eduardo
Lucchini, Juan Martín
Luque, Víctor
Manzano, Eduardo
Marino, Fernando
Martin, Andrés,
Martínez, Claudia
Masseilot, Bárbara
Mendoza, Dora
Messias, Douglas
Miguel, Sebastián
Moehlecke, Adriano
Mora Fresca, Carlos Eduardo
Morsetto, Jorge Mario
Moura Barbosa, Elielza
Nollas, Fernando
Nores Pondal, Federico
Odicino, Luis
Orte, Facundo
Pedace, Roque
Pessacg, Natalia
Petrucci, Diego
Pilar, Claudia
Plá, Juan
Platino, Manuel
Politti, Marcos
Polliotto, Gabriela
Pontín, María Isabel Rita
Quiroga, Viviana Noelia
Raggio, Daniel
Ramajo, Damián
Ramos Martins, Fernando
Rasuk, Cecilia
Re, Guillermina
Righini, Raúl
Rodríguez Soler, Rocío
Rodríguez, Lucas Gastón
Rodríguez, Ramiro
Rossi, Ezequiel
Russo, Paola
Salazar, Germán
Salvo, Aien Weni
Sambrano, Edgardo
Samper, Mauricio
San Juan, Gustavo Alberto
Sánchez, Yanina
Sarache Piña, Johan
Sarmiento, Joaquín
Schmidt, Javier
Spina, Guillermo
Stoll, Rodolfo
Teixeira-Branco, Vívian
Tilca, Fernando Florentín
Tolosa, Gabriel
Vázquez, Jorge
Velázquez, Diego
Vera, Luis
Viegas, Graciela Melisa
Vilela, Olga
Villalba, Ayelén María
Vilte, María del Socorro
Vivas, Federico
Yajnes, Marta Edith
Zanesco, Izete,
Zitzer, Alejandro
Zizzias, Javier Horacio

ÍNDICE

TEMA 1. ARQUITECTURA AMBIENTALMENTE CONSCIENTE Y HÁBITAT

ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN DEPARTAMENTOS CON TIPOLOGÍA ESTÁNDAR EN ENTORNOS URBANOS Y ORIENTACIONES VARIABLES DE ROSARIO

Gabriel Chiarito, Eugenia Turdó, Aimé Muriel, Daniela Chiarito, Guadalupe González, Jésica Álvarez, Lucila Allori, Soledad Arana, Wanda Gómez Carmana 10

AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR TURÍSTICO. SOLUCIONES TÉCNICAS, ARQUITECTÓNICAS Y URBANAS SUSTENTABLES PARA MIRAMAR DE ANSENUZA 20

Halimi Sulaiman, Lautaro Oga Martínez

DESARROLLO DE MODELO PREDICTIVO REGIONAL DE LA DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS 33

Ayelén Villalba, Juan Manuel Monteoliva, Stella Maris Donato, Andrea Pattini

“ETIQUETADO AMBIENTAL EDILICIO” PARA CUMPLIR CON LOS OBJETIVOS DE SUSTENTABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES RESIDENCIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA 44

Lourdes I. Marini, Santiago M. Reyna

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS EFECTOS DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN: ESTADO DEL ARTE 57

Melisa Paris; Verónica I. Farreras; Erica N. Correa

ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA CIUDAD DE RAFAELA: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN 69

Maximiliano R. Bordón; Priscila A. Kühn; Luisina Cravero; Anahí Lang

TENDENCIAS EN LA GESTIÓN DE CURSOS DE AGUA URBANOS: CASO DE ESTUDIO “PROYECTO ARROYOS VIVOS RAFAELA” 81

Corina Aimo; Edgardo Pero; Rocío Cordero; Mauro Williner; Matías Martínez Sella; Ana Paula Rosillo; Claudia Visintini; Edgardo Pic; Darío Rossi; Alejandro Welschen

ESPACIO PÚBLICO Y CALIDAD DE VIDA EN UN BARRIO DE YERBA BUENA, TUCUMÁN. EVALUACIÓN CUALI-CUANTITATIVA 93

Marta S. Cisterna; Gabriela Márquez Vega; Sebastián Atencia Gualda; Cintya Villa; Luciano M. Garbero; Fernando Martínez

TEMA 2. ENERGÍA SOLAR: APLICACIONES TÉRMICAS, AGRÍCOLAS, QUÍMICAS E INDUSTRIALES

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL ASISTIDO CON ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA 104

Rodolfo Stoll; Jorge Daghero; Ezequiel Podversic

INFLUENCIA DEL MATERIAL DEL ABSORBEDOR Y LA CUBIERTA TRANSPARENTE DE UN COLECTOR DE PLACA PLANA EN SU RENDIMIENTO TÉRMICO INSTANTÁNEO 113

Jorge R. Barral, Juan M. Lucchini, Javier H. Garnica, Sebastián Spasoff Mitcoff, María V. Milanesio

TEMA 3. ENERGÍA SOLAR: CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA

MODELADO, SIMULACIÓN Y ENSAYO DE PUNTOS CALIENTES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Federico Piccardi, Damián Saragia, Hernán Socolovsky 125

MISIÓN SATELITAL SAOCOM 1A: ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES TRAS 5 AÑOS DE OPERACIÓN EN ÓRBITA 140

Elena María Godfrin, Julio César Durán

TEMA 4. ENERGÍA EÓLICA, GEOTÉRMICA, MAREOMOTRIZ, HIDRÁULICA, BIOMASA Y BIOGÁS

VALIDACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE BANCO DE EMULACIÓN DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA 150

Ruben Domingo Bufanio, Cristian Nicolas Zúñiga, Norberto Carlos Scarone, Nestor Damián Marasco, Gustavo Eduardo Monte, Daniel Gervasio López, Solange Salazar, Ricardo Font Thomas

PREDICCIÓN DE CORTO PLAZO DE GENERACION DE ENERGIA DE UN SISTEMA MICRO EÓLICO EMPLEANDO REDES NEURONALES LONG SHORT-TERM MEMORY 162

Claudio A. Reineri; Andres Crespo; Juan Amatti; Gabriel Campetelli; Leonardo Sánchez; Juan Amaya

TEMA 5. USO EFICIENTE Y RACIONAL DE LA ENERGÍA

MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA USUARIOS RESIDENCIALES: HACIA UN RÉGIMEN PERSONALIZADO DE USO, CONSUMO Y TARIFAS 174

Franco Hessling, Carlos Cadena

USO DEL TERMOSTATO: ESTRATEGIAS PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN VIVIENDAS Y EDIFICIOS 184

Pablo Romero, Jorge Fiora, Cristian Carri, Italo Bove, Salvador Gil

AHORRO ENERGETICO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AIRE EN ESTUFAS DE TABACO BULK-CURING 198
Fabiana Altobelli, Miguel Condorí, Gonzalo Durán, Ileana Cruz

ETIQUETADO ENERGÉTICO, TERMOGRAFÍA Y MEDICIONES DE UNA CABAÑA TURÍSTICA DE MIRAMAR DE ANSENUZA, CÓRDOBA. CONSTRUCCIÓN DE MEJORAS 209
Lautaro Oga, Paz Sanchez, Halimi Sulaiman

COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO EDUCATIVO CON Y SIN TECHO VERDE – ESTUDIO DE SIMULACIÓN 221
Martín García, Natalia Muñoz Vasquez, Luis Silva

PLAN DE MUESTREO ESPACIAL PARA EL ESTUDIO DE LA POBREZA ENERGÉTICA: UNA APLICACIÓN EN EL GRAN SALTA 233
Mauro Montone, Rodrigo Durán, Miguel Condorí

TEMA 6. TECNOLOGÍAS ASOCIADAS A LAS ENERGÍAS RENOVABLES

AVANCES EN PLATAFORMA DE MONITOREO PARA TELEGESTIÓN CON INDICADOR PR EN LA PLANTA FOTOVOLTAICA DE LA COOPERATIVA ELÉCTRICA DE ARMSTRONG 246

Marcelo Castello, Ignacio Arraña, Edgardo Marino, Juan Salerno, Maximiliano Oliva

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOGÁS PARA GESTIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES EN LA INDUSTRIA GANADERA ARGENTINA 258

Mariela Colombo, Ramiro Rodríguez, Ernesto Coutsiers

LADRILLOS REUTILIZANDO RESIDUO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) EN BAJAS PROPORCIONES. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA 267

Lucía A. Villalba, Herminia M. Alías, Pablo E. Martinan

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS MAESTRO/ESCLAVOS MODBUS RTU PARA EL MONITOREO DE REDES DE SENSORES MEDIANTE LORAWAN 279

Roberto F. Farfán, Carlos A. Cadena, Cesar Prieb, Héctor Rizo

TEMA 7. RADIACIÓN SOLAR Y CLIMA

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA REGIÓN DEL NOA EN EL PERÍODO 2000-2023 ENTRE BASES DE DATOS DE REANÁLISIS 288

C. Silvero, F. Medina, B. Zossi, G. Mansilla, A. Elías

UTILIZANDO EL MODELO SATELITAL GL 1.2 EN ESCALA DIARIA COMO REFERENCIA PARA CALIBRACIÓN PROVISORIA DE LA RED EEAOC – TUCUMÁN 297

J.D. Forciniti, J.C. Ceballos, M.L. Molina

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICAL EN UNA ADAPTACION AL SITIO PARA SALTA (ARGENTINA) 308

G. Salazar, R. Ledesma, C. López Ruiz, O. Castro Vilela

EVALUACIÓN DEL MODELO REST2 DE CIELO CLARO PARA LA IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL EN LA RED SAVER-NET DE ARGENTINA 321

A. Lusi, F. Orte A. Laguarda, R. Alonso-Suárez, J. Pallota, R. D'Elia, E. Wolfram

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO LCIM PARA LA ESTIMACION DE RADIACION SOLAR EN LA SUPERFICIE DE SALTA CAPITAL Y EL ROSAL 332

N. Rivera Lera, G. Salazar, A. Laguarda

ANÁLISIS DE VARIANTES DEL MODELO SATELITAL SEMIEMPÍRICO LCIM PARA LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN SUPERFICIE: CASO DE ESTUDIO EN DOS SITIOS DE URUGUAY 344

B. Espino, I. Bove, A. Laguarda

TEMA 8. ENERGÍAS RENOVABLES Y SOCIEDAD

RECONSTRUCCIÓN DE TRAYECTORIA Y ALIANZAS SOCIO-TÉCNICAS DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SANTA FE (2013-2020) 356

Jorge Chemes, Santiago Garrido, Pablo Bertinat, Ignacio Arraña

COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN ARGENTINA. RELEVAMIENTO DE NORMATIVAS Y PROYECTOS 369

Jorge Chemes, Santiago Garrido , Diego Aguiar, Pablo Rullo

ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS BIODIGESTORES EN FORMATO KIT Y SU APLICACIÓN DIDACTICA PARA LA ENSEÑANZA EN NIVEL MEDIO 381

Lucia V. Soltelo Galfrascoli, Noemi Sogari, Silvia C. Coronel

HORIZONTES POLÍTICOS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: UN ACERCAMIENTO DESDE LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN DE LA PROVINCIA DE SALTA (2022-2024) 393

Melanie L. Pedraza, Belisario Mendieta Albarracín, Rachuan F.G. Elías, Federico M. Ramos, Facundo D.F. González

ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA EN EL CONTEXTO DEL TRANSPORTE SOSTENIBLE EN ARGENTINA 406

Jorge Chemes, Luís Molinari, Sergio Mansur

ENERGÍAS RENOVABLES Y COMUNICACIÓN: DIAGNÓSTICO DEL PORTAL OFICIAL DEL ESTADO ARGENTINO (2024) 416

Pablo A. Duran, Facundo D.F. González, Carlos A. Cadena

VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN SALTA: ANÁLISIS Y REGISTRO DE INCENDIOS EN VIVIENDAS DE LA CAPITAL (2018-2023) 426

Pablo A. Duran, Franco D. Hessling Herrera, Cinthia N. Gonza

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA UN PROCESO DE TRANSICIÓN JUSTA A NIVEL LOCAL. : EXPERIENCIA EN DESARROLLO EN IBALUCEA, PROVINCIA DE SANTA FE 438

Santiago Garrido, Pablo Rullo, Ignacio Arraña, Rodrigo Durán, Emilia Ruggeri, Gisela Wild

PROYECTOS INTERNACIONALES ABOCADOS A LA TEMÁTICA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO NUCLEAR Y LAS POSIBILIDADES DEL SECTOR NUCLEAR ARGENTINO 450

Alejandra Lucía Pérez Lucero , Carlos Ramiro Rodríguez

COSTO DE OPORTUNIDAD DE EXPORTACIÓN DE AMONÍACO VERDE DESDE ARGENTINA HACIA ALEMANIA/PAÍSES BAJOS 463

Ernesto Coutsiers, Mariela Colombo, Marcelo Gea, Ramiro Rodríguez

VIABILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE E-KEROSENE EN ITALIA Y SU USO EN EL SECTOR TRANSPORTE AÉREO 476

Ramiro Rodríguez, Isabella Mejia

EXPECTATIVAS DE LOS POBLADORES DE OLACAPATO (SALTA, ARGENTINA) EN RELACIÓN CON LA INSTALACIÓN DE GRANDES PLANTAS SOLARES EN SU TERRITORIO 489

Facundo D.F. González, Candelaria Cornú, Nahuel Salas, Facundo Corro Tosoni, Jorge Miller, Ana Orte, Claudia E. Bonifacio, Carlos A. Cadena, Facundo A. Pérez Machado

El CO-DISEÑO DE UN DESHIDRATADOR MODULAR HÍBRIDO EN LA COMARCA ANDINA 501

Lucas Zanovello, Mercedes Ejarque

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 10-19, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANÁLISIS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN DEPARTAMENTOS CON TIPOLOGÍA ESTÁNDAR EN ENTORNOS URBANOS Y ORIENTACIONES VARIABLES DE ROSARIO

Gabriel Chiarito, Eugenia Turdó, Aimé Muriel, Daniela Chiarito, Guadalupe González, Jésica Álvarez, Lucila Allori, Soledad Arana, Wanda Gomez Carmana
Centro de Desarrollo de Tecnología. CDT. Facultad de Arquitectura, Planeamiento y Diseño. FAPyD-UNR. 2000-Rosario
Tel. 0341-3318935 e-mail: arqchiarito@gmail.com

RESUMEN: Este trabajo se enfoca en el estudio de la iluminación natural (IN) en departamentos de tipologías estándar ubicados en entornos urbanos, utilizando un software de simulación dinámica. La iluminación natural es fundamental para el diseño sostenible de edificaciones, tanto en términos de eficiencia energética como en la calidad psicofísica de vida de los ocupantes. A través de la simulación, se evalúan los niveles y la distribución de la IN en espacios interiores, mediante una matriz de puntos que analiza su evolución dinámica en periodos temporales extendidos, considerando diferentes orientaciones y la presencia de obstrucciones externas. Estas obstrucciones influyen en la cantidad de cielo visible disponible, según las geometrías del cañón urbano, con un impacto particular en los pisos más bajos y más altos. Sin embargo, esta variable no se contempla actualmente en las normativas de construcción de la ciudad de Rosario. Los resultados preliminares de las simulaciones sugieren la necesidad de incorporar esta variable en la normativa vigente, y se puede inferir que más allá de la orientación de la fachada vidriada, la ubicación del departamento en relación con el suelo es determinante para garantizar una iluminación adecuada en los espacios interiores.

Palabras clave: Iluminación natural, confort visual, zona útil, métricas dinámicas.

INTRODUCCIÓN

La iluminación natural (IN) es un elemento esencial en la composición arquitectónica, tal como indica uno de los más destacados arquitectos del siglo pasado el catalán Antoni Gaudi cuando refiere: “la arquitectura es la ordenación de la luz” (Carandell, 1993, p14).

El análisis de la IN en arquitectura incluye dos aspectos centrales a contemplar. Uno, vinculado a la eficiencia energética mediante la reducción del uso de iluminación artificial y el otro, referido a la mejora significativa asociada a los requerimientos psicofísicos de IN y de adaptación a los ritmos circadianos al habitar espacios interiores.

El objetivo de este trabajo es explorar mediante simulaciones dinámicas el comportamiento de la IN en departamentos de tipología estándar sometidos a diferentes condiciones geométricas de orientación y obstáculos exteriores variados. Este enfoque amplía y pone en discusión el esquema de determinación reglamentaria edilicia en la ciudad de Rosario y que puede extenderse a otras jurisdicciones urbanas consultadas. Actualmente la iluminación y ventilación reglamentaria de locales de primera sólo correlaciona las dimensiones del local y el área de ventana sin contemplar orientaciones ni potenciales obstáculos externos.

De acuerdo al Balance Energético Nacional (BEN, 2021) el consumo final de energía eléctrica del sector residencial representa el 36 % de la demanda total eléctrica y de ese porcentaje la iluminación artificial representa aproximadamente entre del 25 al 35 % (ENRE, 2024). Si bien estos porcentajes

indican una participación energética relativamente moderada de la iluminación artificial en el consumo global, debe contemplarse adicionalmente el aspecto psicofísico vinculado a la calidad vivencial de la IN en el espacio a habitar. La iluminación artificial mediante luminarias y mecanismos de control domótico puede aproximarse a la iluminación natural recomponiendo parcialmente estas demandas, pero siempre será preferible la condición natural.

En este trabajo se aborda la IN sobre una tipología espacial ampliamente difundida, correspondiente a departamentos monoambiente de edificios en altura, que denominamos M0. Esta tipología surge de un análisis de la oferta inmobiliaria en Rosario publicado en trabajo anterior (Chiarito et al., 2022), caracterizando disposición espacial, superficies y materiales, y se analiza según las cuatro orientaciones posibles de la trama urbana y las obstrucciones externas diferenciadas que genera el cañón urbano para el primer y el último piso de un edificio de departamentos.

METODOLOGÍA

Definición del software utilizado: Dynamic Daylighting (DD)

Con la asistencia articulada del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (CONICET Mendoza), se determinó el empleo de la versión del software DD, "Dynamic Daylighting 2.0.0." (Marsh, 2019). El software DD permite mediante el empleo de métricas dinámicas evaluar iluminación natural en un espacio en periodos temporales extendidos considerando diferentes condiciones de cielo en acuerdo con la condición irregular del fenómeno meteorológico involucrado (Reinhart et al, 2006).

La elección se basa en varios aspectos: su condición de software libre, sus prestaciones de salida con un ajuste aceptable y comparable con simuladores más detallados, las menores demandas de ingreso y salidas de datos adecuadas y su compatibilidad con geometrías simples coincidentes con el modelo tipológico analizado en este trabajo (Marsh y Stravoravdis, 2017).

El DD permite obtener resultados ajustados temporalmente a las condiciones locales mediante el uso de algoritmos avanzados para simular la interacción de la luz solar con los elementos del edificio, considera factores como la ubicación geográfica que define la bóveda de cielo local, la orientación del objeto de estudio, la geometría de sus aberturas, índices de reflectancia interiores y obstáculos exteriores. De este modo se obtienen resultados más ajustados a la realidad local.

Las simulaciones de iluminación se realizaron con las métricas dinámicas: UDI-u Useful Daylight Illuminance y sDA spatial Daylight Autonomy.

Parámetro Useful Daylight Illuminance (UDI)

El UDI, Useful Daylight Illuminance o Iluminancia Diurna Útil, preserva gran parte de la simplicidad interpretativa del enfoque convencional del factor de luz natural pero aplicado en series temporales extendidas. Este coeficiente se basa en valores absolutos de iluminancia bajo cielos realistas generados a partir de estándares meteorológicos locales (Nabil y Mardaljevic, 2004).

En las simulaciones el parámetro UDI-u determina el porcentaje de tiempo que el plano de trabajo del espacio analizado se encuentra dentro del rango de iluminancia establecido.

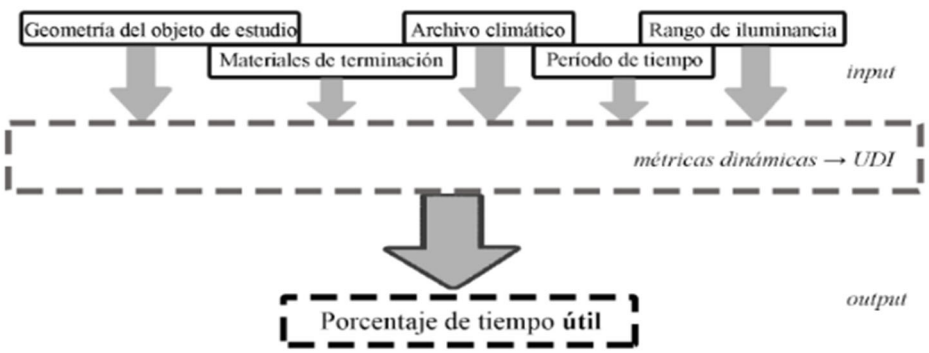


Figura 1: Diagrama input-output Daylighting Designs: UDI. Elaboración propia.

Los valores de iluminancia considerados para UDI-u, en este trabajo se definieron para el rango de 200-2000 lx, de acuerdo a las recomendaciones de la Norma IRAM AADL J20-06 que establece valores mínimos para más de 200 actividades, clasificadas por tipo de edificio, local y tarea visual. Esta norma fue publicada en 1972 y reeditada sin modificaciones en 1996. El valor mínimo corresponde al sugerido para uso residencial y el máximo para tareas muy severas prolongadas con detalles y poco contraste (IRAM,1996).

Parámetro Spatial Daylight Autonomy (sDA)

El Spatial Daylight Autonomy (sDA) expresa el porcentaje de superficie con iluminancia natural sobre el plano de trabajo que supera o iguala un nivel establecido, al menos el 50 % del rango horario especificado. Para este análisis, el nivel de iluminancia establecido es 200 lx recomendado para vivienda (IRAM AADL J 20-06, 1972/1996), el rango estimado de análisis es de 8 h a 18 h.

Definición del área de estudio.

El área de estudio corresponde a la zona de mayor densidad edilicia de la ciudad: el área central y primer anillo de Rosario indicada en la Figura 2.

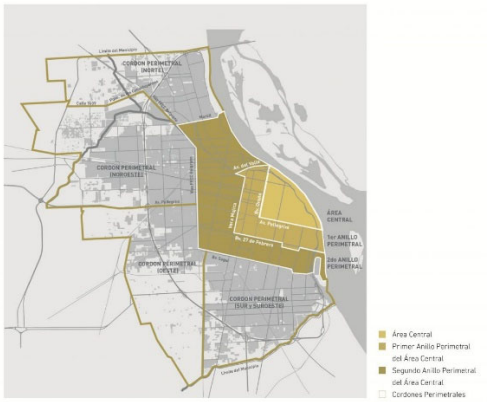


Figura 2: Planimetría de Rosario indicando el Área Central y Primer Anillo. Fuente: Plan Urbano Rosario 2007-2017 (Levin, 2011)

En esta zona del entramado urbano la existencia de obstáculos exteriores es particularmente definitoria debido a la consolidación del entramado edilicio con alturas de edificación máximas que determinan el cielo visible disponible. Estas condiciones resultan muy distintas de primer al último piso, tal como indica porcentualmente piso a piso la Figura 3, que evidencia el ocultamiento producido por los obstáculos de las construcciones que definen el cañón urbano de línea a línea de edificación.

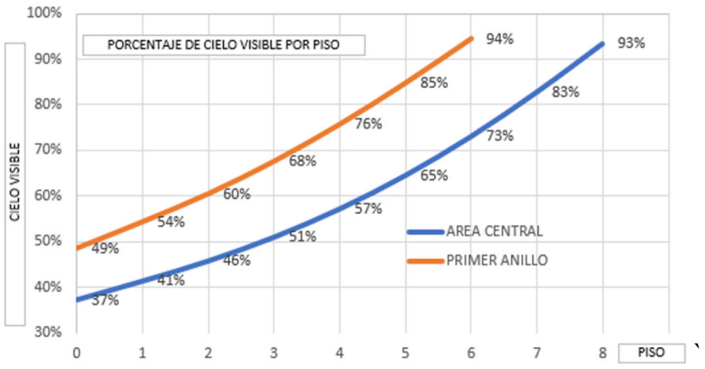


Figura 3: Porcentaje de cielo visible por piso en Área Central y Primer Anillo. Elaboración propia

Para el análisis de cielo visible se toman como referencia las dimensiones de los corredores urbanos de tipo “B” pertenecientes al Área Central y Primer Anillo. Las diferencias que existen entre ambas situaciones responden a la relación proporcional entre líneas de edificación que definen el ancho del corredor urbano y la altura máxima permitida para las construcciones. De esta manera el corredor urbano ¨B¨ del Área Central presenta un ancho medio de 15,60 m y una altura máxima de 25,00 m

mientras que el corredor del área Primer Anillo medio de 17,20 m entre líneas de edificación y una altura máxima permitida de 19,50 m. Estas geometrías simples permiten definir piso a piso el factor de cielo visible indicado en la Figura 3.

Definición del prototipo: Tipología Monoambiente (M0)
De acuerdo al relevamiento estadístico antes mencionado, el módulo M0 (Figura 4) presenta una superficie total promedio de 30 m^2 y en pocos casos supera la máxima de 40 m^2. En general, el diseño de esta tipología tiene un ancho útil del departamento de 3,00 m debido a las restricciones reglamentarias y al tamaño de los terrenos usuales disponibles del parcelario local. Esta condición de semipiso, ya que comparte con otra unidad locativa el frente urbano, determina que la envolvente de la unidad M0 tenga usualmente un muro lateral medianero y el otro sea lindero con el departamento vecino del piso.

La superficie útil del modelo M0 en consecuencia queda determinada por el ancho mínimo de locales de primera categoría, mientras que la profundidad por la condicionante de iluminación natural/ventilación pactada por normativa de 2,50 veces el ancho del local, más la adición del espacio de cocina integrada para completar el área principal del departamento. Completan el esquema locativo un baño (con menores requerimientos de iluminación-ventilación) ubicado en general en posiciones más internas compartiendo el límite de la unidad con el palier de ingreso a la unidad locativa.

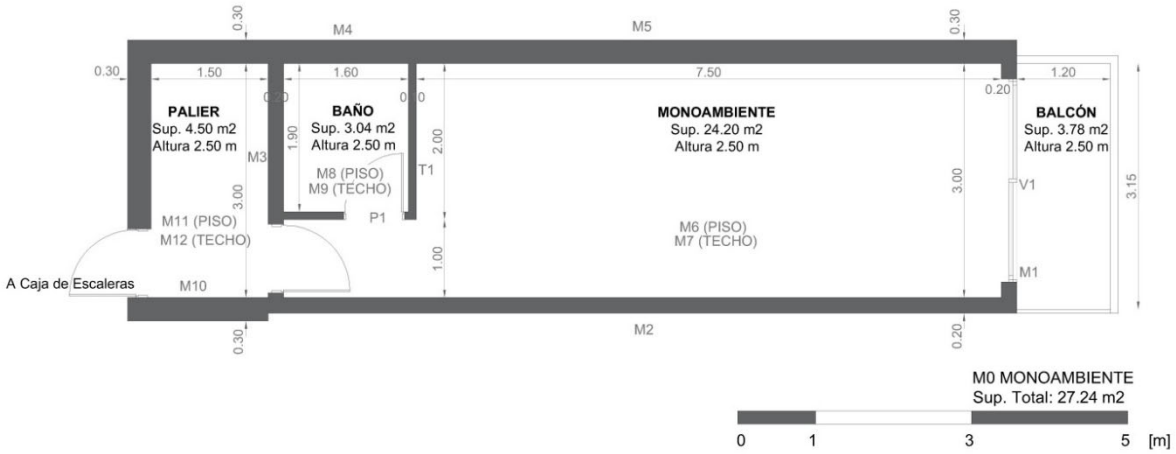


Figura 4: *Esquema de planta del módulo M0. Elaboración propia.*

Definición de los criterios del análisis
Las simulaciones se realizaron para tres periodos: diciembre (verano), junio (invierno) y anual. Se consideran estos intervalos para comparar y analizar los resultados para las cuatro orientaciones de la trama urbana y en los pisos primero y último.

Las corridas dinámicas del software utilizan como base los datos climáticos a partir de un archivo de clima para la localidad de Rosario en extensión EPW tomados en la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional de Rosario entre los años 2007 y 2021, descargado de la página Climate. One Building.Org que define un promedio de las características climáticas del sitio desde el año 2007 al 2021. Se considera el análisis en el horario de 8 h a 18 h acorde a las horas de sol presentes en el momento más crítico: el invierno.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Análisis de IN en corredores urbanos de tipo ¨B¨ pertenecientes al área central y primer anillo.
Si bien hay diferencias entre el ancho de calles y altura de la edificación entre el primer anillo y el área central, en las siguientes Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestra mediante las simulaciones de IN que no se detectan variaciones significativas en condiciones semejantes de orientación en la misma altura de piso, en concordancia con la comprobación geométrica elemental de porcentaje de cielo visible en

ambas áreas urbanas indicado en Figura 3. Lo que sí aparece claramente expuesto es la diferencia comparativa entre la IN de pisos bajos y altos.

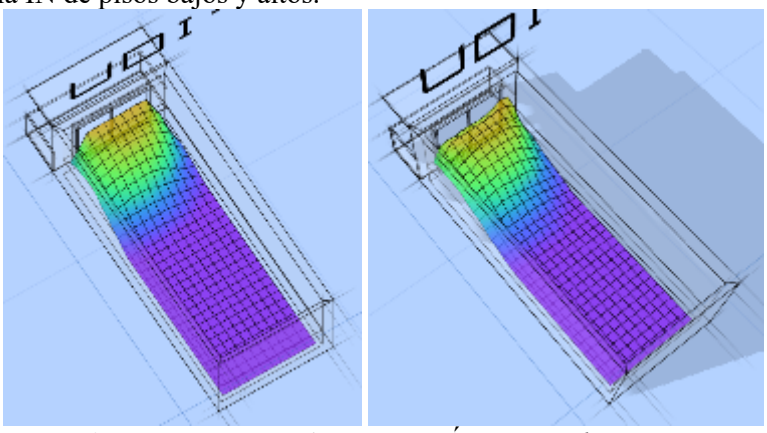


Figura 5 y 6: UDI junio para 1er piso en Área central y en Primer anillo.

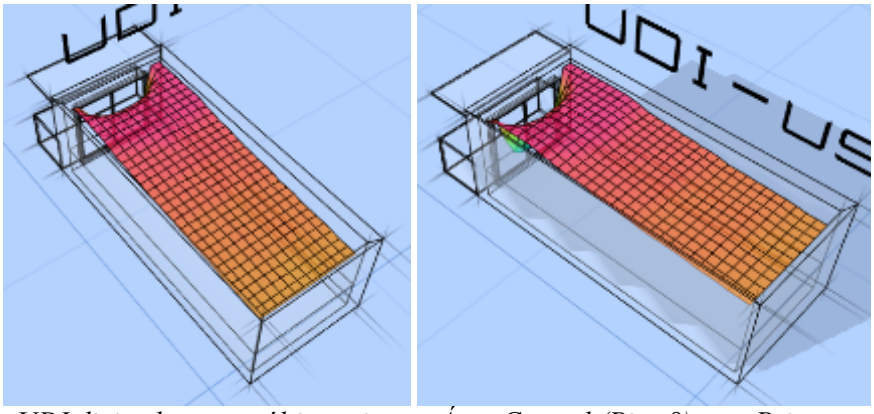


Figura 7 y 8: UDI diciembre para último piso en Área Central (Piso 8) y en Primer anillo (Piso 6).

Análisis de IN para la tipología monoambiente situada en un edificio sobre un corredor vial del Área Central tipo ¨B¨.

Se simulan para primer y último piso con las diferentes orientaciones según la trama urbana del área central de Rosario para los meses de junio, diciembre y anual, obteniendo una matriz de datos e imágenes tridimensionales de iluminancia que permiten ver la distribución espacial. En las figuras 9 y 10 mediante una vista lateral se puede ver la forma de caída de iluminancia en profundidad del local. Algunos valores numéricos extraídos de las matrices de datos de salida con una grilla con definición de 30x30 cm son resumidos en las tablas siguientes para facilitar y cuantificar la comparación entre las distintas condiciones.

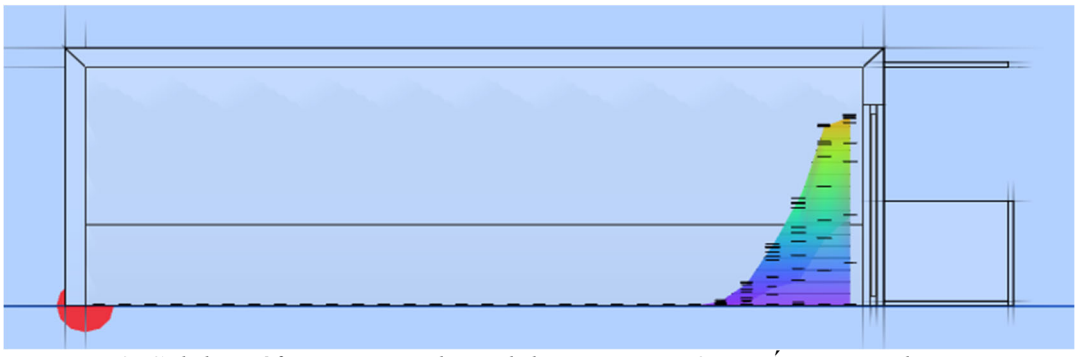


Figura 9: Salida gráfica con vista lateral de UDI Junio Oeste Área central primer piso

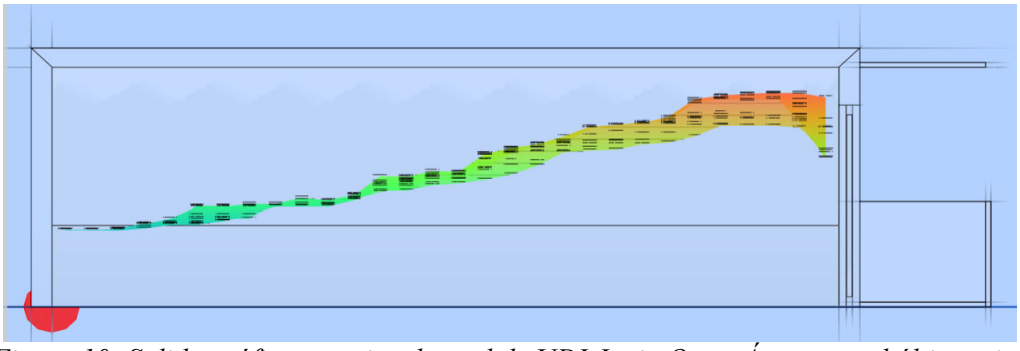


Figura 10: Salida gráfica con vista lateral de UDI Junio Oeste Área central último piso

Los resultados de las simulaciones detalladas de UDI indicados en la tabla siguiente (Tabla 1) corresponden al primer y último piso para las cuatro orientaciones posibles de la trama urbana en distintos periodos temporales de análisis. La primera y segunda columna indican los valores máximos y mínimos de la matriz de cálculo cercanos a la ventana. La tercera columna indica la profundidad en planta donde los valores máximos y mínimos se aproximan y por tanto la IN es más uniforme. La cuarta columna indica los mínimos sobre la pared de fondo del local.

Tabla 1: UDI [%] del Primer y último piso en el Área Central `

		PRIMER PISO				ÚLTIMO PISO			
		Máx. en primera línea[%]	Mín. en primera línea [%]	Prof. de converg.	Mín. en última línea [%]	Máx. en primera línea [%]	Min en primera línea [%]	Prof. de converg.	Mín. en última línea [%]
NORTE	JUNIO	78,2	0	4/10	0	88,9	23,3	3/10	33,3
	DIC.	100	34,4	3/10	0	100	27,7	1/10	81,3
	ANUAL	91,5	21,4	3/10	0	94,4	20,8	2/10	63,2
ESTE	JUNIO	78,7	0	3/10	0	78,1	41	2/10	30,3
	DIC.	93,8	16,1	5/10	0	99	37,7	2/10	93,6
	ANUAL	89,3	6	5/10	0	90,3	37,4	2/10	77,4
SUR	JUNIO	78,9	0	2/10	0	81,3	50	2/10	32,7
	DIC.	100	35,8	3/10	0	100	12,6	2/10	96,1
	ANUAL	90	14,7	2/10	0	94,4	47,4	2/10	71,6
OESTE	JUNIO	80	0	2/10	0	89,6	48,8	2/10	31,9
	DIC.	100	17,4	2/10	0	100	60	2/10	100
	ANUAL	92,7	7	2/10	0	98,3	50,1	2/10	97,5

De los datos indicados en la Tabla 1 se puede realizar las siguientes observaciones:

Los **valores máximos de iluminancia útil sobre la primera línea**, en el caso del monoambiente situado en el primer piso, independientemente de la orientación, tanto en junio y anual**,** en un rango de 200 a 2000 lx, están entre un 2 y 10 % inferior que en el último piso.

En cambio, en diciembre no se presentan variaciones sustantivas entre primer y último piso de los valores máximos, considerando que el rango adoptado establece un piso relativamente bajo (200 lx) y relativamente alto (2000 lx) en términos de iluminancia adoptada.

El **valor mínimo de iluminancia útil sobre la línea más próxima a la fachada** en el primer piso es cero en invierno, independientemente de las orientaciones, ubicada sobre los laterales del local y en el último piso mejoran en un rango variable por orientación de 24 al 50 %.

Para este último piso los valores de junio y diciembre son homogéneos en la orientación norte debido a la presencia de la obstrucción balcón del piso siguiente. Por su parte el este y el sur presentan valores mínimos superiores en junio respecto a diciembre debido a la ausencia de obstrucción de asoleamiento que genera el balcón sobre la ventana para recorridos solares más bajos.

Para el caso del oeste los valores mínimos resultan mayores en diciembre que en junio, adjudicable a la diferencia entre el norte magnético/geográfico en la cuadrícula urbana que reduce la cantidad de horas de radiación directa para dicha orientación.

El **valor mínimo de iluminancia útil sobre la línea más lejana a la fachada** en el primer piso para todas las orientaciones es cero y en el último piso aumentan un 31 % para junio, entre 80 % y100 % en diciembre y anualmente de 63 % al 98 %. Esto demuestra que los niveles de iluminación útil resultan sustancialmente distintos de primer al último piso y reducen notablemente el área útil de confort visual por IN para los pisos más bajos.

La **profundidad de convergencia** permite identificar la homogeneidad en el ancho del local. Para el último piso se mantiene homogénea (dentro del primer cuarto de profundidad de planta) para todas las orientaciones debido a la ausencia de obstáculos externos y con una pendiente que decrece lentamente hacia el fondo con lo que se obtienen iluminancias útiles aceptables en profundidad del local.

Para los pisos bajos la convergencia se produce con niveles bajos muy próximos a la ventana.

El caso sur, especialmente en invierno, para los pisos superiores e inferiores no presenta un comportamiento desigual, con una pendiente de caída más marcada próxima a la ventana, debido a la disponibilidad potencial de cielo menos dependiente de los obstáculos exteriores.

Los resultados de sDA se pueden observar en la tabla 2 correspondiente al primer y último piso.

Tabla 2: SDa [200lx] del Primer y último piso en el Área Central.

		PRIMER PISO				ULTIMO PISO			
		Máx. en primera línea [%]	Mín. en primera línea [%]	Prof. de converg.	Mín. en última línea [%]	Máx. en primera línea [%]	Mín en primera línea [%]	Prof. de converg.	Mín. en última línea [%]
NORTE	JUNIO	80	0,4	4/10	0	86,8	65,5	2/10	44,2
	DICIEM	100	34,5	3/10	0	100	99,7	5/10	91
	ANUAL	95,4	18	4/10	0	97,9	89,8	4/10	74,5
ESTE	JUNIO	78,7	0	3/10	0	90	63,3	3/10	30,3
	DICIEM	100	16,1	5/10	0	100	100	6/10	93,6
	ANUAL	94	5,6	4/10	0	98,3	87	5/10	68,5
SUR	JUNIO	79,7	0	2/10	0	89,3	50	5/10	32,7
	DICIEM	100	35,8	4/10	0	100	98,7	6/10	96,1
	ANUAL	96,1	14,7	3/10	0	98,2	81,7	5/10	71,6
OESTE	JUNIO	79,3	0	2/10	0	89,3	64,1	1/10	31,9
	DICIEM.	100	17,4	3/10	0	93,6	100	5/10	81,6
	ANUAL	92,7	7	3/10	0	95,9	81,1	4/10	62,2

De la tabla 2 se puede indicar:
El **valor máximo de porcentaje de sDA sobre la primera línea** cercana a la ventana, tanto en primer piso como último piso, resultan similares para todas las orientaciones, en junio como diciembre. Siendo los valores de diciembre un 20 % mayores respecto de junio.

Si se compara piso a piso, en junio se registra un 10 % más de área útil en los pisos superiores, mientras que en diciembre no se registran diferencias notables. En el análisis anual para el último piso se verifica un aumento del área útil entre un 3 % y 6 % según las distintas orientaciones próximo a la ventana.

Los **valores mínimos sobre la primera línea** muestran una marcada diferencia entre los pisos bajos y altos. En diciembre los mínimos indicados, para el target de tiempo simulado, es del orden de 30 % en los pisos bajos para las orientaciones norte y sur. En cuanto al este y oeste se encuentran cercanos al 15%. En cambio, en los pisos altos en todas las orientaciones se ubican próximos al 100 %.

Durante junio, en todas las orientaciones en los pisos bajos se registran 0 % de superficie útil en la primera línea y en los pisos altos los valores rondan el 60 %.

Se verifica para la línea próxima a la ventana en los pisos altos tanto en diciembre, junio y anual los valores mínimos son independientes de la orientación del módulo, en cambio, en los pisos bajos el comportamiento se asemeja entre el norte-sur y se diferencian del este-oeste.

Los **valores mínimos sobre la última línea** más alejada de la ventana, en el primer piso para las distintas orientaciones e independientemente de la época del año es 0 %, indicando que en ningún momento se logra llegar al mínimo de 200 lx requerido.

La situación se revierte para el caso del último piso en donde para junio se alcanza un 31 % de superficie útil en las orientaciones E, O y S y 44 % en el N por efecto de la mayor disponibilidad de luz directa en dicha orientación. Para diciembre estos registros se duplican o triplican.

Los valores mínimos en la primera y última línea son sustancialmente más altos en el último piso respecto a los valores del primer piso.

La **profundidad de convergencia** en el caso del primer piso se da en todas las situaciones entre el primer tercio más cercano a la ventana y la mitad de la planta con valores tendientes a 0 %, mientras que, en el caso del último piso, si bien la profundidad de convergencia no presenta un mayor alejamiento desde la ventana, los valores obtenidos en esta línea presentan mayor variación de acuerdo a la época del año manteniéndose por encima del 44 % y alcanzando el 96 % en algunos casos. Esta lectura da cuenta que en los pisos bajos la caída del porcentaje de superficie útil es más abrupta que en los pisos altos, donde se mantiene estable logrando mayores porcentajes hacia el fondo del local.

Como resultados generales de los parámetros analizados, los valores resultan insuficientes en primer piso, tanto verano como invierno, mientras que para los pisos superiores presentan altas variaciones que van del 30 al 100 % en las distintas épocas del año. Claramente la diferencia de los mínimos se debe al efecto de las obstrucciones exteriores determinantes de la iluminación natural en el fondo del local.

En la condición de invierno se hace más evidente la deficitaria condición de los pisos inferiores. Los valores mínimos expresados en la grilla de simulación indican una variación significativa en las distintas épocas del año, con diferencias en la zona próxima a la ventana de hasta un 30 % más bajas en invierno que en verano.

Los valores máximos próximo de la ventana, causales de potencial deslumbramiento, se mantienen constantes y nunca inferiores al 80 % sin modificaciones destacables para las condiciones analizadas: en las distintas orientaciones, en invierno-verano y en la situación de primer-último piso.

CONCLUSIONES

Las disposiciones reglamentarias, en el caso de Rosario, en la búsqueda de condiciones de habitabilidad lumínica natural residencial define las mismas restricciones independientemente de las

geometrías de cielo visible exterior. En entramados urbanos con alta densidad de edificaciones en altura, debiera segmentarse las condiciones reglamentarias requeridas por ubicación relativa de pisos bajos o altos.

Las simulaciones demuestran que la variable “obstáculos externos” resulta más influyente que la “orientación", muy especialmente en los corredores urbanos estrechos y de alta densidad edilicia propios del tejido clásico como el de Rosario, que provoca fuertes diferencias de iluminancia en pisos bajos y altos, especialmente en la definición del área interior útil de departamentos con iluminancia aceptable.

Las geometrías dispuestas en departamentos de edificios que surge reglamentariamente entre la relación de área vidriada (fuente extensa de IN) y superficie habitable (relación, ancho del local y profundidad máxima reglamentada) indica que el porcentaje de superficie con nivel de IN aceptable sobre el plano de trabajo es deficitario en los pisos bajos, pero más que aceptable en los altos. Esta situación, que analiza solo la variable IN del proyecto arquitectónico, habilita la posibilidad de considerar la modificación reglamentaria y modificar la profundidad máxima de los locales de primera a medida que se asciende piso a piso.

AGRADECIMIENTO

Los autores de este trabajo queremos dejar expresa constancia del agradecimiento por la precisa y exhaustiva asistencia del Equipo del INAHE, Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (CONICET, Mendoza) con dirección de la Dra. Andrea Pattini. En especial a la Dra Ayelen Villalba y el Dr. Juan Manuel Monteoliva que estuvieron a cargo del curso “Introducción a la simulación de la luz natural” entre junio y julio de 2023.

Esta capacitación en simulación predictiva dinámica de IN en espacios interiores, caracterización de datos de entrada (cielos, materiales y modelos tridimensionales), manejo de interfaz gráfica, características e interpretación de datos de salida (point-in-time, iluminancias, métricas dinámicas, entre otras) permitió el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

Balance Energético Nacional (2021). Dirección URL: <https://datos.gob.ar/fr/dataset/energia-balances-energeticos/archivo/energia_643964db-0c58-4b6d-9a8b-edc2bdb6e51c.>. [consulta 10 de agosto de 2023].

Carandell, J. M. (1993). La Pedrera, Cosmos de Gaudí, p. 14, Fundació Caixa Catalunya, Barcelona.

Chiarito, G. et al (2022). Análisis de demanda térmica invierno/verano comparado en módulos habitacionales sometidos a condiciones variables en Rosario. AVERMA Avances en Energía Renovable y Ambiente. Vol.26. pp 169-180. Argentina.

Climate. One Building.Org (2023). Dirección URL: <https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ARG_Argentina/index.html > [consulta 10 de marzo de 2023].

ENRE, Energía, Ministerio de Economía (2023). Iluminación eficiente. Claves para reducir el consumo eléctrico. Dirección URL: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/iluminacion-eficiente-clave-para-reducir-el-consumo-electrico> [consulta 10 de mayo de 2023].

Levin, M. (2011). Plan Urbano Rosario 2007-2017. pp 104. Dirección URL: https://www.rosario.gob.ar/ArchivosWeb/pur/pur_i_ii.pdf. [consulta Agosto 2023]

Nabil, A y Mardaljevic, J. (2004). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings, pp. 47, Institute of Energy and Sustainable Development (IESD), Montfort University, Leicester. UK.

Norma IRAM AADL J 20-06 (1972) (1996). Niveles mínimos de servicio de iluminancia. Argentina

Marsh, A. y Stravoravdis, S. (2017). Towards Dynamic Real-Time Daylight Simulation. PLEA 2017, Proceedings Design to Thrive, Volumen II.

Marsh, A. (2019). Dynamic Daylighting (versión 2.0.0) [software]. Dynamic Real-Time Daylight Simulation. Department of Built Environment, University of Greenwich.UK. Dirección URL: <https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/> [consulta 10 de mayo de 2023].

Reinhart, C., Mardaljevic y J., Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. pp. 13, 3:1. LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America.

ANALYSIS OF DAYLIGHT IN FLATS WITH STANDARD TIPOLOGY IN URBAN ENVIRONMENTS AND VARIABLE ORIENTATIONS IN ROSARIO.

ABSTRACT This paper focuses on the study of daylighting in standard typology flats in the urban environments using dynamic simulation software. Daylighting plays an important role on buildings sustainable design, energy efficiency and especially in the psychophysical quality of life of its occupants. The simulation of daylighting level and distribution in interior spaces is evaluated on a matrix of points, analyzing its dynamic evolution in extended periods of time for different orientations and exterior obstructions. Exterior obstructions determine the available visible sky based on the geometries of the urban canyon for low or high floors. Nevertheless, this variable is not contemplated in Rosario's building construction regulations. The preliminary conclusions of simulations indicate the convenience of its normative inclusion, considering despite the glazed façade orientation, the relative floor position plays a key role on guaranteeing appropriate interior daylighting.

Keywords: Daylighting, visual comfort, usable area, dynamic metrics.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 20-32, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR TURÍSTICO. SOLUCIONES TÉCNICAS, ARQUITECTÓNICAS Y URBANAS SUSTENTABLES PARA MIRAMAR DE ANSENUZA

Halimi Sulaiman, Lautaro Oga Martinez
Área Diseño Bioclimático. Centro Experimental de la Vivienda Económica, CONICET Córdoba. (CEVE). Igualdad 3585 - Código Postal X5003BHG Villa Siburu – Córdoba www.ceve.org.ar
(54). (351) 4364093, interno 221. E mail bioclimaticdesign.ceve@gmail.com

RESUMEN: El Ministerio de Ciencia y Técnica de Córdoba detectó la necesidad de mejorar sustancialmente la eficiencia energética en el sector turístico de Miramar de Ansenuza. El objetivo del presente trabajo es mostrar el proyecto de transferencia tecnológica (70% ya ejecutado), financiado por el Proyecto Federal de Innovación en cooperación con la Municipalidad y la Cámara de Comercio y Turismo locales. El objetivo general de la transferencia es *mejorar las prestaciones térmico-energéticas de hoteles, departamentos y cabañas locales mediante la aplicación y materialización de múltiples estrategias de diseño bioclimático que sirvan para sentar las bases de una transformación de la oferta turística desde una perspectiva sustentable.* Se presentan los resultados hasta el momento y la construcción de varias mejoras. El principal aporte es la conjunción entre la capacitación de profesionales municipales y prestadores turísticos, con el diseño y construcción de mejoras en casos testigos para dar base a futuras ordenanzas.

Palabras clave: sostenibilidad energética, turismo sustentable, etiquetado energético, construcción de mejoras.

INTRODUCCIÓN

Para muchos países, el turismo es hoy un factor de desarrollo económico en general. En otros, sólo ha logrado contribuir al crecimiento económico sectorial, y los beneficios no se han distribuido de manera equitativa. Estudios sobre el turismo han enfatizado en que la falta de planeación de este sector ha generado en muchos países un desarrollo económico no incluyente, un aprovechamiento no sustentable de los recursos naturales y la anarquía en el desarrollo de los espacios territoriales con potencial turístico (Coronel et al., 2007). Diversos autores sostienen que sólo a partir del conocimiento sobre el desarrollo de la actividad turística y el de los diversos destinos turísticos, en particular, se pueden concretar acciones que involucren a los actores locales, para aprovechar los recursos humanos y naturales desde una perspectiva coherente con las propuestas de la Organización Mundial del Turismo (Orozco Alvarado y Núñez Martínez, 2013). El Turismo Alternativo surge como una respuesta contra el Turismo de masas, enfocándose en actividades que promueven la realización personal, la educación, la igualdad entre pueblos, el respeto por la identidad cultural y la preservación del patrimonio. El Turismo Alternativo se caracteriza por su desarrollo a pequeña escala, con menos impacto ambiental y social, y con una mayor retención de ganancias a nivel local (Granero, 2007; Combariza, 2012). Modalidades como el Turismo de Aventura, Ecoturismo y Agroturismo son ejemplos de cómo este tipo puede promover un desarrollo sostenible y armónico en comunidades locales. Además, este se distingue por ser controlado por la población local, involucrar a emprendedores locales, minimizar impactos negativos, y fomentar la equidad en la distribución de beneficios, fortaleciendo a mujeres y grupos marginales y atrayendo a turistas interesados en la cultura y el ambiente local (Narváez, 2014). Múltiples autores abordan la

eficiencia energética en el sector turístico, Flensborg (2021) estudia las dinámicas energéticas de alojamientos turísticos en Buenos Aires identificando retos y oportunidades, mientras que Río Ferrera (2024) destaca las políticas de certificación ecológica en hoteles en Alemania para promover la eficiencia energética.

El proyecto de transferencia, con un monto total de AR$ 20.000.000, se centra en combatir el cambio climático y sus efectos mediante la aplicación de estrategias bioclimáticas en el rediseño y mejora de hoteles y cabañas en el Municipio de Miramar de Ansenuza, Córdoba, Argentina. El objetivo general es *mejorar la sustentabilidad y eficiencia de estos alojamientos. Los resultados y talleres de capacitación para el personal municipal y la comunidad hotelera buscan sensibilizar a los distintos actores sobre el uso adecuado de recursos energéticos e hídricos en los alojamientos*. Cabe recalcar que es un proyecto de transferencia tecnológica donde los resultados de las actividades organizadas por etapas deben ser medibles. Por tanto, no sólo se exige definir los objetivos de desarrollo sustentable en los que se enmarca la actividad, sino también las metas e indicadores correspondientes. A su vez, se debe definir cada actividad con su respectivo resultado comprobable para su evaluación.

Gestación del proyecto y objetivos del trabajo

En una reunión del CyTER organizada por el Ministerio de Ciencia y Técnica de Córdoba junto con la Municipalidad de Miramar de Ansenuza (MMA) y la Cámara de Comercio y Turismo (CCyT), se identificó la necesidad de mejorar la eficiencia energética en el sector turístico. En mayo de 2023, especialistas dieron charlas y talleres para definir ideas de proyectos, que luego se consolidaron en una propuesta de financiamiento presentada en julio. El proyecto fue aprobado en dos etapas y comenzó su ejecución en diciembre del mismo año.

La transferencia incluye diversas acciones para aumentar la sustentabilidad del sector turístico en Miramar de Ansenuza. 1) Se realizan 4 Etiquetados Energéticos de casos locales, implementando mejoras y evaluando el rendimiento energético antes y después. 2) Durante 12 meses, se miden condiciones meteorológicas locales y las higrotérmicas interiores de los casos testigos. 3) Se capacita al personal de la Secretaría de Obras Públicas de la MMA. 4) Se organizan talleres para promover buenas prácticas en energía, agua, vegetación y manejo de residuos. 5) Los resultados obtenidos quedan a disposición para usos futuros en normativas y estándares de construcción para la localidad. La entidad que cumple el rol de ejecutor del proyecto se mantiene anónima para este artículo. La MMA participa activamente y financia parte del proyecto, mientras la CCyT aporta el espacio para los talleres. A continuación, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto marco donde se encuadra el presente artículo.

General:

Mejorar las prestaciones térmico-energéticas de hoteles y cabañas locales mediante la aplicación y materialización de múltiples estrategias de diseño bioclimático que sirvan para sentar las bases de una transformación de la oferta turística desde una perspectiva sustentable.

Específicos:

1. Realizar relevamiento y registro fotográfico de los posibles casos testigos.
2. Realizar la Auditoría, planificación y desarrollo sostenible del turismo local.
3. Seleccionar los 4 casos representativos de la oferta de hospedaje local según los criterios definidos por el equipo.
4. Armar el legajo técnico de cada caso (a cargo de MMA).
5. Instalar instrumental de medición Estación Meteorológica Portátil y Data Loggers en el interior de los 4 casos.
6. Medir los datos obtenidos de la Estación, los Data Logger y capacitar al personal de MMA para su procesamiento.
7. Capacitar al personal de MMA en diseño bioclimático, uso de la herramienta de evaluación Manual de la Vivienda Sustentable y la de Etiquetado Energético Nacional (EEN).
8. Modelar los 4 casos con la herramienta de EEN evaluando las capacidades adquiridas en 7 por el personal de MMA en el proceso.

9. Calcular el IPE de los 4 casos antes y después de aplicar las mejoras constructivas.10. Proponer soluciones constructivas con todo el equipo que incorporen el uso de la iluminación y ventilación naturales, mejor calidad de envolventes, ganancia solar directa, con la posibilidad de incorporar renovables apropiadas para cada caso.
11. Construir las mejoras propuestas en el punto anterior.
12. Realizar talleres participativos con la comunidad de la CCyT sobre Gestión Ambiental, Calidad del Producto Hotelero y buenas prácticas para la eficiencia energética edilicia.
13. Diseñar infografía y señalética en función del feedback obtenido en los talleres para dar herramientas de concientización de los huéspedes por parte de la comunidad de la CCyT.
14. Realizar la Compilación de la documentación en un lenguaje claro para público amplio de los resultados de la transferencia.

Características del lugar y población objetivo

Miramar de Ansenuza, ubicada en la provincia de Córdoba, se encuentra en la zona bioclimática IIa de clima cálido (figura 1 a), donde el verano es la estación más crítica, con temperaturas superiores a 24 °C y máximas por encima de 30 °C, con amplitudes térmicas de hasta 16 °C. En invierno, las temperaturas medias oscilan entre 8 °C y 12 °C, con menor amplitud térmica (IRAM 11603, 1996). La ciudad, única población ribereña de la Laguna Mar Chiquita, fue declarada Reserva Provincial en 1994 y luego Parque Nacional Ansenuza, debido a su valor biológico y paisajístico (Turismo Miramar de Ansenuza, 2024). Cabe mencionar que la laguna crea un microclima específico en la localidad.

Los destinatarios principales de la transferencia son el sector turístico de Miramar de Ansenuza, que impulsa la economía local, y la Municipalidad de Miramar de Ansenuza (MMA), que busca cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El sector turístico, agrupado en la CCyT, participa directamente en talleres donde se capacita para mejorar la gestión hotelera y comunicar estrategias de ahorro energético a sus clientes. La participación en estos talleres será utilizada para diseñar infografías y señalización, concientizando a los visitantes sobre prácticas energéticas sostenibles. Además, se orienta al sector para postular al Eco-etiquetado "Hoteles más Verdes," con el fin de reducir significativamente el consumo de energía eléctrica, que afecta tanto las ganancias de los establecimientos como el medio ambiente, además de aumentar el riesgo de sobrecargar la red eléctrica local, especialmente en verano.

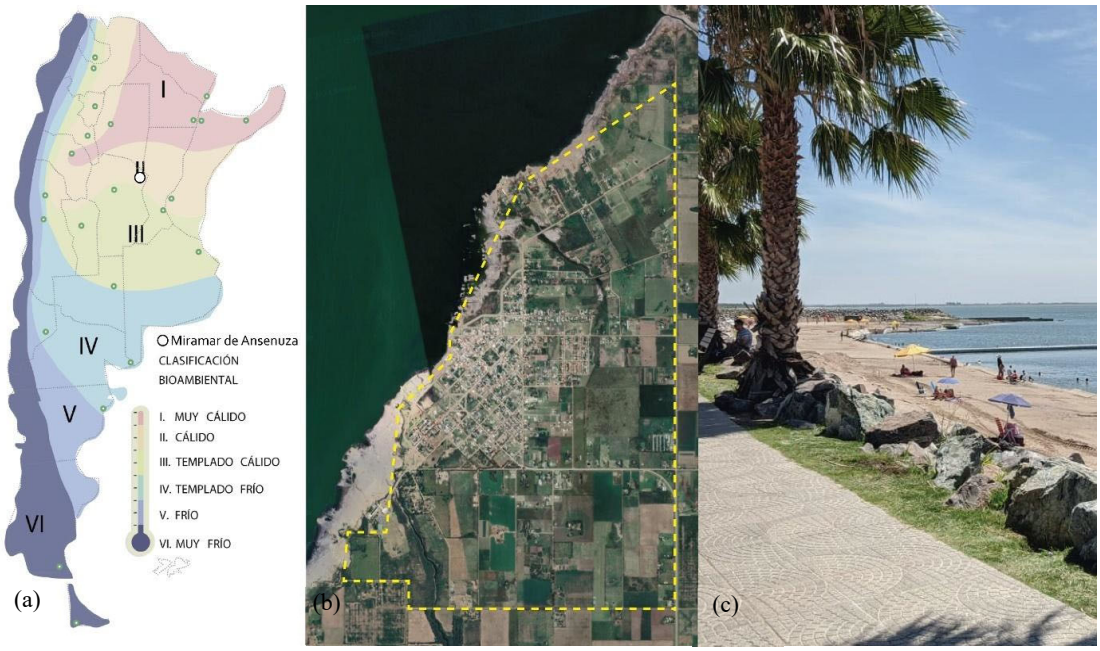


Figura 1: Ubicación de Miramar de Ansenuza en las zonas Bioclimáticas de Argentina (a), radio municipal (b) y Costanera de Miramar (c). Fuente: Elaboración propia (E. P.).

Actualmente Miramar cuenta con una variada oferta de alojamiento que incluye 10 hoteles, 6 complejos de cabañas, y diversas categorías de departamentos y casas de alquiler temporal. La transferencia busca mejorar la infraestructura de hospedaje mediante la implementación de mejoras edilicias en tres casos testigo (una cabaña, una habitación de hotel y un departamento de alquiler).

Estas mejoras se basan en el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE), calculado mediante el Etiquetado Nacional. También se interviene un salón cultural, destinado a eventos de promoción local y comedor infantil, y se capacita a entre 4 y 8 profesionales del municipio en estrategias bioclimáticas y uso de la herramienta de etiquetado energético. Esto proporcionará al municipio los recursos necesarios para actualizar las normativas locales y mejorar la eficiencia energética de las construcciones.

METODOLOGÍA

Primera etapa

Se realizó un análisis del arbolado urbano en la localidad utilizando datos satelitales Landsat 8 procesados con el software QGIS (2024) para identificar áreas con mayor exposición solar. En base al análisis anterior y en colaboración con el equipo técnico de la MMA, se seleccionaron cuatro casos testigo (una cabaña de madera, una habitación de hotel, una cabaña de mampostería y un salón cultural) priorizando la heterogeneidad entre sistemas constructivos, orientaciones, ubicación y entorno. Se llevó a cabo un relevamiento detallado de cada caso utilizando planos municipales, fotografías visibles y termográficas, y herramientas de evaluación como el MVS (2016).

Se implementó el análisis del semáforo del MVS para evaluar el sitio, diseño, energía y agua, y se creó una tabla síntesis con los datos globales de cada ítem según el color del semáforo. Después de seleccionar los casos, se instalaron data loggers a 2 metros de altura para medir temperatura y humedad relativa interior con intervalos de 30 minutos durante un año, contrastando estos registros con mediciones de la estación meteorológica local. Antes del etiquetado energético, se realizó un taller de tres encuentros para capacitar a los técnicos de la MMA sobre el uso de la herramienta.

El etiquetado consiste en modelar las características constructivas de una vivienda y sus sistemas de climatización y agua caliente, para determinar su prestación energética en una escala de la A (más eficiente) a la G (menos eficiente), expresado en kWh/m² año. Posteriormente, se proyectaron mejoras en los casos testigo de manera conjunta entre el equipo de ejecución y los profesionales de Miramar. Para el etiquetado, se utilizó el año típico meteorológico de Ceres Aeropuerto (Santa Fe) dado que es la ciudad con clima más similar y próxima.

Segunda etapa: Se realizó la búsqueda de presupuestos para la compra de los materiales necesarios para implementar constructivamente las mejoras propuestas. Esta tarea se llevó a cabo de manera conjunta entre los equipos del proyecto, priorizando tanto la adquisición de materiales como la contratación de mano de obra en la localidad. Cabe aclara que la MMA aportó la mano de obra para la construcción de las mejoras. A continuación, se compila en una tabla solo las actividades realizadas, una breve descripción de las mismas y las metas o resultados cuantificables que se deben cumplir.

Tabla 1. Etapas, actividades y metas /resultados esperados de la ejecución del proyecto. Fuente: E. P.

Etapa		**Actividades principales**			
Nº	**Duración (meses)**	**Actividad**	**Breve descripción**	**Metas y/o resultados esperados (cuantificables)**	**Ítem**
1	*2 (mes 1 y mes 2)*	**Relevamiento urbano arquitectónico, detección de aspectos críticos de posibles casos testigo.**	*Se relevarán los aspectos de localización, constructivos y de diseño de los posibles casos testigo, legajos técnicos, fotografías y relevamiento in situ.*	**Determinación de características y especificaciones técnicas de las edificaciones relevadas y su entorno inmediato.**	A
1	2 *(mes 1 y mes 2)*	**Selección de casos testigo.**	*Con la información recabada se realizará un listado de los aspectos críticos a mejorar y se seleccionan los casos de referencia.*	**Los casos de referencia (hoteles y cabañas).**	B

1	4 (primeros 4 meses)	**Implementación de la metodología de Etiquetado de eficiencia energética en los casos testigo.**	*Realización de la metodología de Etiquetado de los 4 casos de referencia con la herramienta de Etiquetado Energético Nacional.*	**Presentación del índice de prestaciones energéticas (IPE) calculado de los casos de referencia.**	C
1 y 2	12 (durante los 12 meses del proyecto)	**Medición in situ de datos climáticos locales y condiciones interiores edilicias.**	*Mediciones de clima y condiciones higrotérmicas interiores de los casos testigos.*	**Procesamiento de base de datos medidos.**	D
1	3 (meses 2, 3 y 4)	**Dictado del 1er taller A profesionales de la MMA sobre el uso de herramientas y estrategias para incorporar la sustentabilidad en el diseño arquitectónico.**	*Cómo aplicar estrategias bioclimáticas, cálculo de transmitancia térmica, uso de las herramientas: manual de la vivienda sustentable y etiquetado energético nacional.*	**De 4 a 8 profesionales y/o personal de la MMA Trabajo práctico de aplicación de nuevas capacidades: Etiquetado energético de casos testigo.**	E
1	2 (meses 3 y4)	**Selección de estrategias bioclimáticas aplicables para cada caso y rediseño arquitectónico de los casos evaluados**	*Resolución constructiva en función de la actividad anterior.*	**Concreción del diseño arquitectónico mejorado expresado en planos.**	F
1	1 (mes 4)	**Compra y traslado al lugar de todos los insumos de construcción necesarios**	*Compra de carpinterías DVH, materiales de construcción, aislaciones, pinturas, caños metálicos y chapas, etc.*	**Verificación de stock en depósito de la Municipalidad de Miramar de Ansenuza**	G
2	3 (mes 5, 6 y 7)	**Implementación constructiva de las mejoras arquitectónicas.**	*Construcción y supervisión de las mejoras implementadas en los casos testigo analizados.*	**Materialización de las mejoras planteadas en los casos testigo.**	H

RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEL PROYECTO DE TRANSFERENCIA

En la primera etapa de transferencia, se realiza la evaluación de 4 casos representativos de hospedaje local utilizando la herramienta del EEN. La evaluación y la propuesta de mejoras se efectúan con todo el equipo interdisciplinar, y la ejecución de las propuestas está a cargo de profesionales locales, con supervisión de la entidad ejecutora. Se llevan a cabo mediciones de condiciones meteorológicas urbanas e higrotérmicas interiores durante 12 meses. Se realiza una auditoría para el desarrollo sostenible del turismo local y se dictan talleres participativos dirigidos a profesionales del municipio, a la comunidad hotelera local para mejorar la eficiencia energética del parque hotelero, y a la comunidad general para promover buenas prácticas en el uso eficiente de recursos y ahorro energético.

Talleres a profesionales locales:

1- Diseño bioclimático, conceptos básicos y ejemplos de aplicaciones para el clima local.
2- Participación activa en el uso de la herramienta de EEN.
3- Uso de la herramienta de evaluación de proyectos del Manual de la Vivienda Sustentable.
4- Taller participativo de propuestas de mejora concretas en los casos testigos.

Para el sector hotelero:

5- Taller participativo de buenas prácticas concluyendo con pautas y gráficas para el visitante.
6- Taller participativo con la CCyT sobre Gestión Ambiental, Calidad del Producto Hotelero y buenas prácticas para la eficiencia energética edilicia.
7- Señalética e infografía para el sector hotelero para colaborar en la concientización ecológica y energética de los visitantes.
8- Documentación final de los resultados en lenguaje claro para un público amplio, posible insumo de futuras normativas edilicias locales.

Respuesta específica al ahorro energético del sector turístico con y para esta comunidad

La transferencia impacta en los ejes Urbano-Arquitectónico, Social y Económico. En el ámbito Urbano-Arquitectónico, el MMA obtiene la rehabilitación térmico-energética de un salón cultural y su etiquetado

energético, lo cual implica detectar falencias de diseño y constructivas para proponer y aplicar mejoras. También se rehabilitan 3 alojamientos del sector turístico local como casos testigos, para definir lineamientos para futuras obras municipales y normativas en calidad constructiva y energética de las obras privadas. Durante todo el proceso, se capacitan y participan en las decisiones profesionales y personal de la gestión municipal. Los talleres sobre diseño eficiente y sustentable dotan al municipio de capacidades para abordar los ODS en el planeamiento urbano-arquitectónico futuro y en la reglamentación de condiciones mínimas para la aprobación de nuevos proyectos. A través de talleres participativos los integrantes del CCyT se capacitan en cómo mejorar la gestión del servicio hotelero. Esta participación se emplea para desarrollar infografías y señalética que sensibilicen a los visitantes sobre las buenas prácticas para el ahorro energético. Además, se orienta a los establecimientos para postularse al Ecoetiquetado Hoteles más Verdes, un protocolo creado por la AHT dirigido a todos los establecimientos hoteleros en Argentina.

A continuación, se presentan las actividades de la primera y segunda etapa ya realizadas (A, B, C, E, F, G y H) y en proceso (D, H) junto con el análisis de resultados preliminares.

Selección de casos testigo y relevamiento (ítems A y B)
En primera instancia, se realizó un análisis de la distribución y cantidad de arbolado urbano presente en la localidad mediante la combinación de las bandas 4, 5 y 3 del satélite Landsat 8 en el software Qgis (2024). A través de este método se puede distinguir con facilidad las áreas de mayor exposición solar. La figura 2 (e) muestra la distribución del arbolado, mientras más al rojo se torna el área mayor presencia de vegetación presenta, mientras que más blanco se torna, se cuenta con menor presencia del mismo. Cabe mencionar que el tono negro indica que no existe presencia alguna de vegetación, esto concuerda con los espejos de agua presentes en la localidad como la laguna Mar Chiquita.

En base al análisis urbano realizado anteriormente se seleccionaron los cuatro casos testigo a evaluar y mejorar en conjunto con el equipo técnico de la MMA, teniendo como premisa que dichos casos presentan distintos sistemas constructivos, orientaciones, ubicación, condición de entorno, usos y tipología. Es decir, que la muestra presente la mayor heterogeneidad posible. De esta manera, del total disponible, se escogieron:

- Una cabaña construida en madera (figura 2 a) empleando un sistema constructivo de troncos encastrados, con orientación noroeste, dos niveles, con cocina comedor, dos dormitorios (uno en planta alta), baño y ubicada en un entorno parcialmente arbolado.
- Una habitación de hotel (figura 2 b) construida con sistema tradicional húmedo de mampostería y losa de viguetas, orientada al noroeste, ubicada en un primer piso, sin cocina y en un entorno escasamente arbolado.
- Una cabaña de mampostería (figura 2 c) con techo mitad liviano y mitad de losa, orientada hacia el norte, con cocina y ubicada en un entorno parcialmente arbolado.
- Finalmente, un salón cultural (figura 2 d) con techo de chapa sin aislar, orientación sur, uso mixto y ubicada en un entorno poco arbolado.

Luego de la selección, se realizó un relevamiento exhaustivo de cada caso mediante planos municipales, relevamientos in situ, y fotografías en luz visible y termográfica (Cámara Hti, modelo HT-19), además de utilizar herramientas de libre acceso como el MVS (2016) para evaluar las deficiencias de cada uno. La figura 3 muestra algunas fotos termográficas tomadas en febrero de 2024, en las que se destacan las altas temperaturas en las superficies de la envolvente, siendo la fachada noroeste de la cabaña Alas del Sol la que presenta la mayor temperatura, con 59.5°C. En el lado interior de las cubiertas, las temperaturas alcanzan 31.6°C en un techo con aislación de espuma aluminizada de 5 mm de espesor y 47.5°C en un techo de chapa sinusoidal sin aislación. Estas mediciones resaltan la necesidad de implementar una correcta aislación térmica para mejorar el confort interior, considerando que los turistas tienden a hacer un uso excesivo de los aparatos de climatización.

Para evaluar los casos en relación a su entorno y los servicios que posee se implementa el análisis del semáforo del MVS, el cual sirve para detectar el estado del proyecto con respecto al sitio, el diseño, la

energía, el agua, la agricultura urbana, la construcción y las buenas prácticas. Este semáforo cuenta con una clasificación de tres colores dónde verde indica la mejor situación posible, amarillo una situación aceptable y rojo la más desfavorable. En este caso sólo se aplican los primeros cuatro de los siete puntos del manual para analizar el Salón cultural que además funciona como comedor infantil (los alimentos se preparan en el lugar). Es importante destacar que la herramienta mencionada es válida para analizar tipologías con usos diferentes, ya que muchos de los ítems de los distintos apartados no se limitan exclusivamente a viviendas. Esto es especialmente relevante en aspectos como el terreno, el marco urbanístico, las condiciones ambientales, el diseño arquitectónico, la integración de energías renovables, el acondicionamiento térmico y lumínico, y el consumo de agua.

La figura 4 muestra el total de puntos asignados a cada apartado, con la mayoría para el sitio en verde y amarillo. Esto indica que las características del terreno, el marco urbanístico, las condiciones ambientales, el equipamiento, la conectividad y el proyecto de urbanización son satisfactorios. El apartado de energía, que incluye acondicionamiento térmico, sistemas de iluminación, agua caliente sanitaria, eficiencia de equipos de climatización e incorporación de energías renovables, se encuentra principalmente en amarillo y rojo siendo necesario mejorar esos ítems. Por su parte los apartados de diseño y agua requieren mejoras principalmente en aislamiento térmico, control acústico, consumo agua, monitoreo y control. De esta manera se obtiene un panorama general de las condiciones de la construcción, sus fortalezas y debilidades.

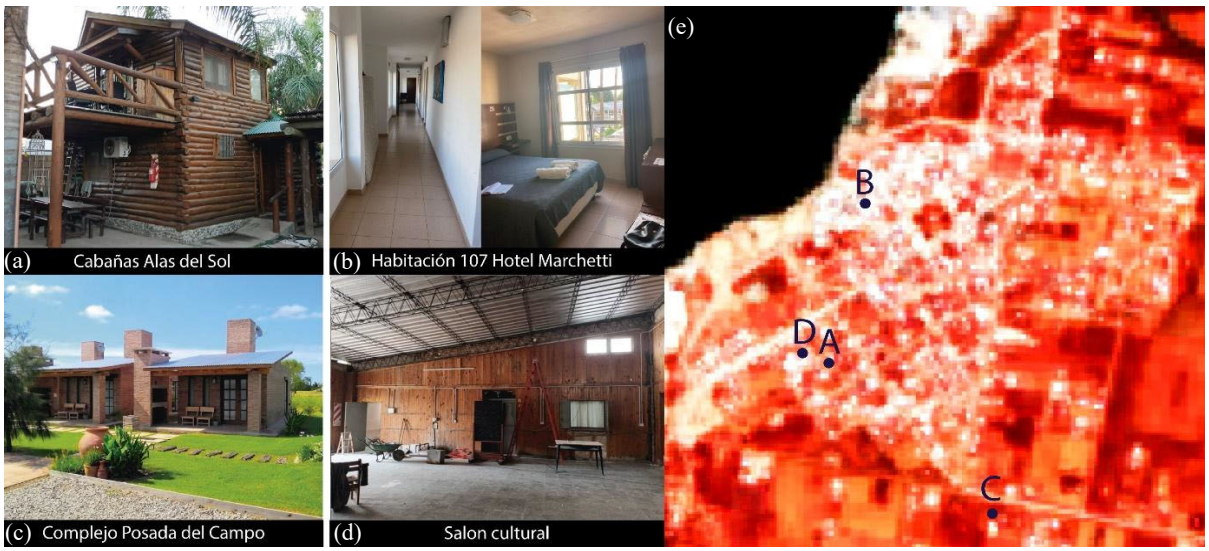


Figura 2: Casos testigos seleccionados: Alas del Sol (a), Hotel Marchetti (b), Posada del Campo(c) y Salón cultural (d) y Combinación de bandas 5,4,3 (e). Fuente: E. P.

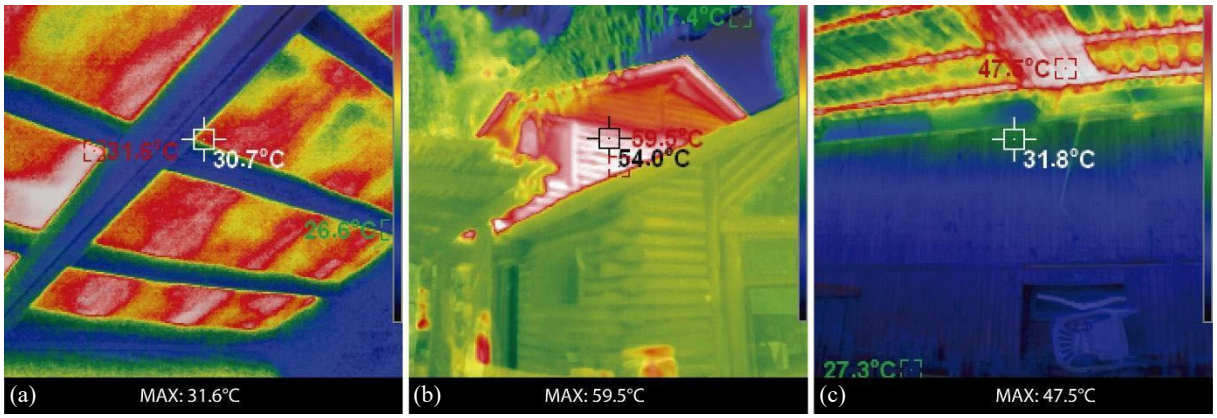


Figura 3: Fotos termográficas del techo cabaña Posadas del Campo (a), envolvente exterior de la cabaña Alas del Sol (b) e interior del salón cultural (c). Fuente: E.P.

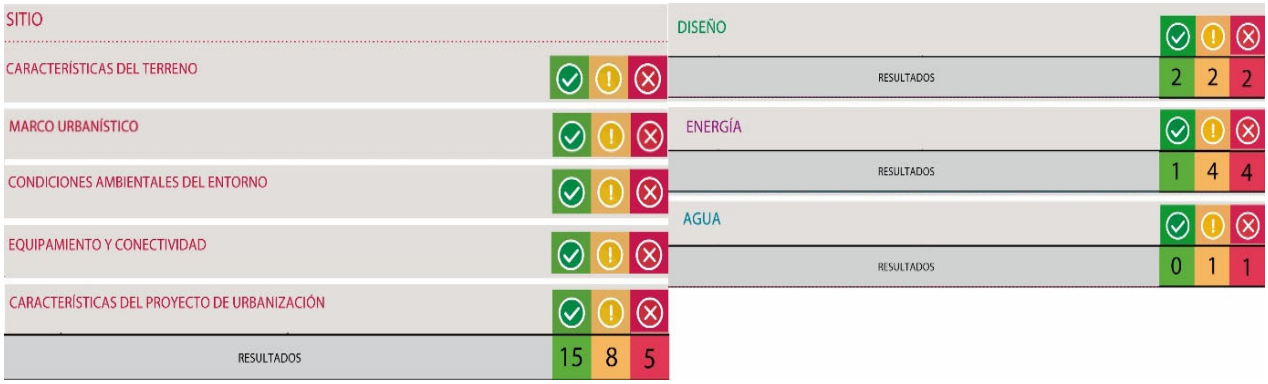


Figura 4: Implementación del Manual de la Vivienda Sustentable al Salón Municipal. Fuente: E. P.

Medición de la temperatura interior y exterior en los casos testigo (ítem D)

Para conocer el comportamiento térmico interior de los distintos casos testigos se instalaron data loggers (Marca: Elitech y Freshliance, modelos: RC4HC y BlueTag TH20) que registran la temperatura y la humedad relativa cada 30 minutos a lo largo de un año, al mismo tiempo se utilizaron mediciones de la estación meteorológica local para contrastar las lecturas. Cabe mencionar que el proyecto contempla la adquisición de una estación meteorológica portátil, no obstante, a causa de la fuerte devaluación que sufrió el peso argentino al comienzo del proyecto los fondos resultaron insuficientes para ese fin, por tal motivo se emplearon mediciones locales pese a estar parcialmente completas.

La figura 5 muestra el contraste entre la temperatura y la humedad relativa interior y exterior del Salón municipal para el 6 de enero, uno de los días pico del mes según la estación meteorológica local. Los registros indican que, durante la noche, la temperatura interior es inferior a la exterior hasta las 10:15 a.m., por debajo de los 25 °C, mientras que durante el día las temperaturas interiores superan a las exteriores, alcanzando un máximo de 33 °C a las 5:04 p.m. En contraste, la humedad relativa interior es mayor durante la noche, alcanzando un pico de 79 % a las 8:04 a.m., mientras que durante el día está levemente por debajo de la exterior. Este comportamiento se debe a la cubierta de chapa sin aislación del salón que se sobrecalienta con la luz solar, emitiendo grandes cantidades de radiación hacia el interior. Durante la noche, la cubierta provoca una rápida pérdida de calor, ya que el interior no recibe luz solar directa y, por lo tanto, no acumula energía en las superficies. Cabe aclarar que la orientación de la cubierta es al sur, lo cual evita el sobrecalentamiento.

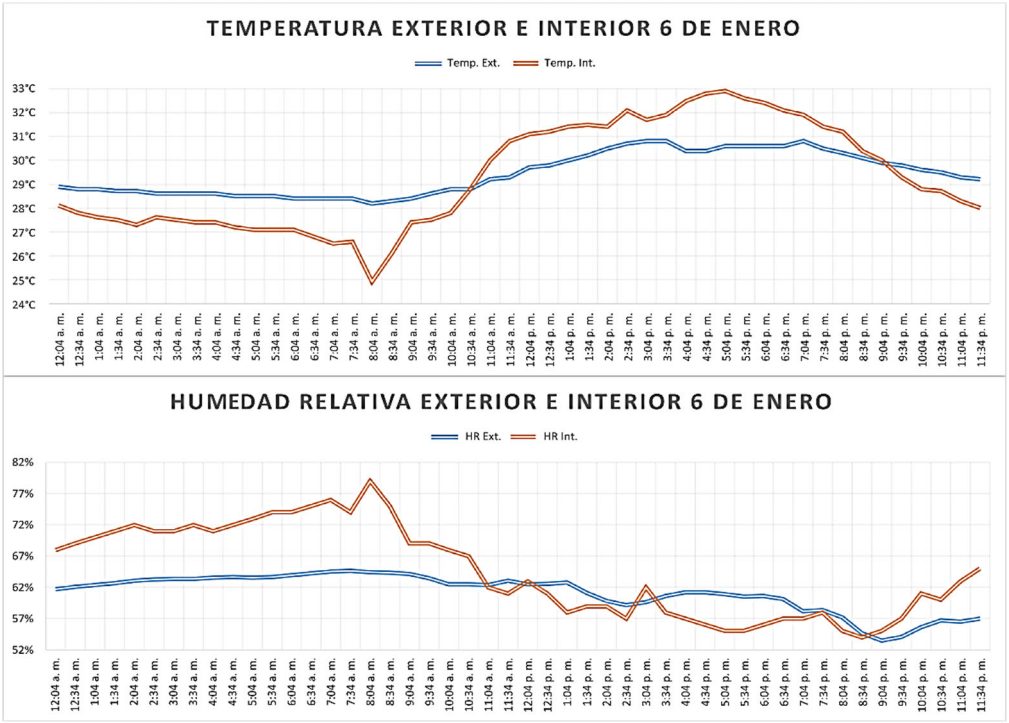


Figura 5: Temperatura y humedad relativa del Salón Cultural el día 6 de enero 2024. Fuente: E.P.

Uso de herramientas y estrategias bioclimáticas para incorporar la sustentabilidad en el diseño arquitectónico (ítem C, E)

Antes de realizar la simulación del EEN de cada caso, se dictó un taller dirigido a los profesionales del área técnica de la MMA para capacitarlos en eficiencia energética de las construcciones, con el objetivo de prepararlos para futuras regulaciones y mejoras del código de edificación. El taller se realizó en tres encuentros: dos virtuales, donde se explicaron conceptos básicos de sustentabilidad, estrategias de diseño bioclimático, cómo implementar el MVS y el funcionamiento de la plataforma ENV, y uno presencial, donde se expusieron los trabajos de los alumnos, quienes simularon y mejoraron cada uno de los casos testigos y propusieron mejoras. Se utilizó el año típico meteorológico de Ceres aeropuerto (Dury, 2014-2024) en lugar del de Córdoba observatorio debido a su proximidad y condiciones similares. Además, Córdoba no tiene definido aún el Índice de Prestaciones Energéticas (IPE).

La tabla 2 muestra el etiquetado aplicado al Salón municipal, que tiene una envolvente de composición maciza sin materiales aislantes, una cubierta de chapa sin aislación, piso de baldosas graníticas, tres puertas ventana con orientación sur y un volumen interior de 531.75 m³ a climatizar. El resultado, sin mejoras ni modificaciones, es de 499 kWh/m² año, correspondiente a una clasificación G, siendo la calefacción el mayor requerimiento con el 79% de la demanda total. Tras implementar aislación térmica en la cubierta y reemplazar las aberturas de vidrio simple por DVH con rotura de puente térmico, la demanda es de 169 kWh/m² año, 66% menor en comparación con el caso base. Cabe mencionar que no se aplicaron energías renovables al proyecto, por lo cual es posible reducir aún más la demanda total.

Tabla 2: Etiquetado energético del caso testigo Salón cultural, sin mejora y mejorado. Fuente: E.P.

	Salón cultural base	**Salón cultural mejorado**
	Energía Primaria kWh/m² año	
Calefacción	395	95
Refrigeración	39	9
Producción de ACS	63	63
Iluminación	2	2
Requerimiento específico global de energía	499	169
Contribución específica de energías renovables	0	0
Grado de eficiencia energética	G	E

Selección de estrategias bioclimáticas y rediseño de los casos (ítem F)
En base a los trabajos previos y en colaboración con el equipo técnico de la MMA, se detectaron las falencias de cada caso y se propusieron mejoras, considerando su factibilidad y el impacto generado. Las mejoras consisten principalmente en aumentar la capacidad aislante de la envolvente, reducir las infiltraciones por hendija y generar protecciones solares sobre las ventanas más expuestas a la radiación solar. A continuación, se menciona el rediseño de cada caso:

- Para la cabaña Alas del Sol se decidió adicionar a la aislación de espuma de polietileno aluminizado de 5 mm en la cubierta, una capa de 0,05 m de celulosa. Esto no solo mejora en gran medida la capacidad aislante, sino que además es un material ecológico con un alto grado de material reciclado en su composición. Sumado a lo anterior, se propuso colocar burletes en todas las carpinterías practicables de madera y de esta manera disminuir las pérdidas por infiltración.
- Con respecto a la habitación 107 del hotel Marchetti se planteó colocar una carpeta de 0,05 m de cemento y poliestireno en copos sobre la losa, membrana liquida color blanco para aumentar su reflectividad, burletes en la ventana exterior y postigos para brindar protección contra el sol del noroeste.
- En el complejo Posada del Campo se planeó incorporar en el techo liviano 0,05 m de lana de vidrio con barrera de vapor y una carpeta de 0,05 m sobre la losa de iguales características a la propuesta para la habitación de hotel, además, se ideó la colocación de burletes dobles de goma en las carpinterías practicables de madera.
- Finalmente, para el Salón cultural se decidió colocar aislación de celulosa proyectada interior en la cubierta de chapa, reducir al máximo las infiltraciones y reemplazar las puertas ventana en mal estado por otras de mejor calidad y prestación térmica.

Compra de materiales e implementación de mejoras constructivas en los casos testigo (ítem G y H)
Después de proponer y analizar las mejoras a implementar en cada caso, se procedió a la compra de los insumos necesarios. Esta tarea se realizó de manera conjunta entre el equipo de ejecución y el de la MMA, coordinando la búsqueda de presupuestos, ya que se requieren tres presupuestos para cualquier compra que supere los AR$64.000. Este requisito presentó un obstáculo para la adquisición de materiales debido a que en la localidad muy pocos proveedores están habilitados para emitir un presupuesto formal.
Además, la compra de carpinterías ha sido compleja por los constantes aumentos de precios, en comparación con el presupuesto aprobado, requiriendo repetir el proceso varias veces. La escasa mano de obra local y la distancia entre MMA y la ciudad capital, donde se consiguen la mayoría de los insumos, hicieron de esta etapa un desafío. La figura 6 muestra la aplicación de la aislación de celulosa (Eco Aislación, 2024) en el Salón cultural y en la cabaña Alas del Sol. La coordinación entre el equipo ejecutor, la MMA y los propietarios de la cabaña fue crucial para reducir costos, realizando el trabajo de manera continua, ya que los instaladores del producto viajaron desde Córdoba capital. En el municipio solo había un prestador de servicio (techista) para quitar y volver a colocar las chapas de la cabaña después de aislar la cubierta, lo cual generó un costo adicional para el municipio debido a la falta de conocimientos específicos en la mano de obra local.



Figura 6: Aplicación de aislante de celulosa, Salón cultural (a) y cabaña (b). Fuente: E. P.

CONCLUSIONES

Aporte innovador

Miramar de Ansenuza tiene una oportunidad importante para avanzar hacia la sustentabilidad mediante acciones concretas y la reducción significativa de consumos energéticos por varias razones. El vector energético actual es solo electricidad, y el potencial de ahorro por mejoras edilicias, el compromiso de usuarios (locales y visitantes) y la incorporación de fuentes renovables es óptimo. El principal aporte innovador radica en la concientización, implementación y construcción de medidas bioclimáticas y de eficiencia energética, determinadas cuantitativamente en construcciones locales para el sector turístico, propuestas y ejecutadas por el equipo interinstitucional. La propuesta incluye mejoras constructivas en 4 casos testigos que representan las principales tipologías de oferta de hospedaje en Miramar. El taller 1 capacita al personal de la MMA desde el inicio en el uso de herramientas para participar en las decisiones de diseño, construcción y análisis de resultados. Los talleres participativos 2 y 3 están dirigidos a todo el sector turístico y abiertos a la comunidad, proporcionando herramientas para concientizar a los turistas. Otra innovación es la implementación del EEN, la propuesta de mejoras, la construcción y evaluación de las mismas en la provincia, dado que no existen casos pilotos que contribuyan a la determinación del IPE (Índice de Prestaciones Energéticas) provincial, ya que Córdoba se unió al plan nacional a finales de 2023. Los aprendizajes y experiencias de esta transferencia pueden extenderse a toda la comunidad.

En el contexto actual, es primordial realizar transferencias tecnológicas a la sociedad en general, especialmente a comunidades alejadas de los principales centros urbanos, para promover un crecimiento regional sustentable. La cooperación con gobiernos locales presenta oportunidades para transferencias tecnológicas acotadas y realizables, con un impacto significativo en pueblos que enfrentan desafíos para acceder a tecnología, materiales específicos, etc., especialmente dado el alto costo de transporte que afecta el valor de materiales, productos y servicios. La devaluación precipitada del proyecto tras su adjudicación requirió un reordenamiento de prioridades, limitando especialmente la compra de materiales y equipos de medición. Sin embargo, las principales actividades, materiales y aberturas se han adquirido con éxito. Las aberturas han aumentado hasta 6 veces el precio presupuestado en junio de 2023. Se desestimó la compra del colector solar y se aprovechó la reparación del techo de chapa del salón cultural y otras dependencias, como baños, cocina y divisorios interiores, estos últimos con fondos del municipio. Los desafíos que enfrentan los proyectos de este programa actualmente son:

- Inflación acelerada de precios.
- Dificultad en la ejecución de los gastos dada la metodología de concurso de precios con un monto desactualizado.
- Coordinación entre diferentes actores (municipio, investigadores, prestadores de servicios).
- El cambio de gobierno, obligó a renovar el compromiso de la MMA con el proyecto, acto que en este caso no tuvo inconvenientes, pero suele ser una variable de alto impacto en la continuidad de este tipo de transferencias tecnológicas.
- Si bien la zona cuenta con proveedores de varios insumos, en algunos casos con precios significativamente superiores. Por ello, se optó por comprar en capital y coordinar con los viajes semanales a bajo costo que provee un tercero a la MMA.
- Hasta el momento por el retraso en el nombramiento de nuevas autoridades del PFI a nivel nacional, el sistema para realizar la rendición de cuentas de la primera etapa no se encuentra habilitado.
- En consecuencia, del punto anterior, tampoco se cuenta con la certeza que se pueda acceder a la segunda etapa de financiamiento del proyecto donde se encuentran las demás actividades programadas. Cabe destacar que el retraso es de 4 meses hasta el momento.
- La mano de obra de construcción que posee la municipalidad, precisa capacitación en nuevas tecnologías o tecnologías livianas.

Se destaca la necesidad de concientizar a los turistas en el uso responsable de los recursos y la energía, sobre todo en lugares como Miramar de Ansenuza donde la electricidad es el único medio, tanto para calefaccionar, como para refrigerar. La climatización en el turismo impacta negativamente, tanto en los propios beneficios, como comprometiendo la estabilidad del sistema eléctrico local. A su vez, se considera importante que el área de obras privadas de la MMA exija a las construcciones nuevas, ciertos niveles de eficiencia, sobre todo en el caso de las destinadas al sector turístico y propicie la incorporación de energías renovables en los proyectos.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Área de Obras Públicas y Privadas de la Municipalidad de Miramar de Ansenuza, por su valiosa colaboración en el proyecto. Al personal del Ministerio de Ciencia y Técnica de la Provincia, quien realizó la vinculación entre la necesidad de la comunidad y los especialistas que ejecutan este proyecto. Finalmente, al PFI 23 que financia el proyecto.

REFERENCIAS

Coronel, L., Márquez, M. y Ricaurte, C. (2007). Estudio de los impactos socioculturales de la actividad turística y su incidencia sobre la comuna Montañita. Facultad de Ingeniería Marítima. Licenciatura en Turismo, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. (2007). https://www.researchgate.net/publication/28792837_Estudio_De_Los_Impactos_Socioculturales_De_La_Actividad_Turistica_Y_Su_Incidencia_Sobre_La_Comuna_Montanita.

Combariza, J. (2012). El turismo rural como estrategia de desarrollo sostenible: Caso municipio de La Mesa (Cundinamarca). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. URI https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/10194.

Dury, A. (2014-2024). WMO Region 3 - South America. EU.: Climate.OneBuilding.Org. https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ARG_Argentina/index.html#IDSF_Santa_Fe.

EcoAislación (2024). Disponible en https://www.ecoaislacion.com.ar/. Accedido el 08/08/24.

Flensborg, K. (2021). Dinámicas energéticas de los alojamientos turísticos de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). Turismo y Sociedad, xxix, pp. 53-77. DOI: https://doi.org/10.18601/01207555.n29.03.

Granero, A. (2007). Las actividades físico-deportivas en la naturaleza y la industria turística. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 7. (26) pp. 111-127. http://cdeporte.rediris.es/revista/revista26 /artactnatural 52.htm.

Google. (2024). Google Earth (versión 7.3) [Software]. https://earth.google.com.

IRAM 11603 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.
IRAM 11605 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Bs As, Argentina.
Narváez, E. L. (2014). El turismo alternativo: una opción para el desarrollo local. REV IISE, San Juan, 6(6). https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5537859.
Orozco Alvarado, J., y Núñez Martínez, P. (2013). Las teorías del desarrollo: En el análisis del turismo sustentable. InterSedes, 14(27), 144-167. ISSN 2215-2458.
Qgis, org. (2024). *Qgis* (3.38) [Software]. Disponible en https://www.qgis.org/.
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable et al. (2016). MANUAL DE VIVIENDA SUSTENTABLE. C.A.B.A. – República Argentina. Recuperado de: https://www.argentina.gob.ar/ambiente/desarrollo-sostenible/vivienda/manual.
Río Ferrera, A. (2024). Turismo sostenible en Alemania: Prácticas sostenibles en la industria hotelera (Trabajo de fin de grado, Universidad de Oviedo). Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. URI: https://hdl.handle.net/10651/73888.
Stagnitta, R. (2020). Etiquetado de Viviendas Curso de Certificadores [MOOC]. Etiquetado de Viviendas. https://etiquetadoviviendas.mecon.gob.ar/.
Sulaiman, H., Oga Martínez, L. y Filippín, C. (2023). ¿Utopía o realidad? Factibilidad de un proyecto de vivienda multifamiliar con materiales reciclados en el centro de Argentina. Revista 180, (51), 41-55. http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-51.(2023).art-1006.
Turismo Miramar de Ansenuza. (2024). Descripción de la localidad & reseña histórica. http://turismomiramar.com/miramar/.

ENERGY SAVINGS AND EFFICIENCY IN THE TOURISM SECTOR. SUSTAINABLE TECHNICAL, ARCHITECTURAL, AND URBAN SOLUTIONS FOR MIRAMAR DE ANSENUZA

ABSTRACT
The Ministry of Science and Technology of Córdoba identified the need to significantly improve energy efficiency in the tourism sector of Miramar de Ansenuza. The objective of this work is to present the technology transfer project (70% already executed), funded by the Federal Innovation Project in cooperation with the local government and the Chamber of Commerce and Tourism. The general goal of the transfer is to improve the thermal-energy performance of local hotels, apartments, and cabins through the application and implementation of multiple bioclimatic design strategies that aim to establish the foundation for a transformation of the tourism offering from a sustainable perspective. The results achieved so far and the construction of several improvements are presented. The main contribution is the combination of training municipal professionals and tourism providers, with the design and construction of improvements in pilot cases to establish the groundwork for future ordinances.

Keywords: energy sustainability, sustainable tourism, energy labeling, construction improvements.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 33-43, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

DESARROLLO DE MODELO PREDICTIVO REGIONAL DE LA DISPONIBILIDAD DE LUZ NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES. ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS

Ayelén Villalba[1], Juan Manuel Monteoliva[1], Stella Maris Donato[1], Andrea Pattini[1]
[1]Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Centro Científico y Tecnológico Mendoza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 261-5244310– Fax 0261-5244401 e-mail: avillalba@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: Conocer con precisión la cantidad y distribución de la luz natural que ingresa a un edificio es de fundamental importancia. Sin embargo, determinar el comportamiento de la luz natural en el interior de un espacio no es una tarea sencilla. En este contexto y con el objetivo de robustecer un modelo predictivo desarrollado previamente para el cálculo de disponibilidad de luz natural en espacios interiores, se realizaron simulaciones de iluminación natural dinámica ampliando la matriz de variables que considera el modelo original respecto al tipo de cielo, la orientación, el área vidriada y la transmitancia visible del vidrio. Como primer paso en el análisis de los datos generados, este trabajo ofrece un análisis descriptivo-exploratorio de los valores de iluminancia producidos por simulación para verificar la pertinencia de la matriz de variables y los niveles preestablecidos, previo al desarrollo del nuevo modelo. Los principales resultados indican que las variables área vidriada y transmitancia visible del vidrio claramente tienen un impacto en las métricas dinámicas empleadas para conducir el análisis de desempeño de la luz natural en un espacio interior. Se concluye que este tipo de análisis exploratorio previo permite una precisa selección de variables y niveles de las mismas.

Palabras clave: iluminación natural, modelo predictivo, transmitancia visible, área vidriada, orientación de fachada.

INTRODUCCIÓN

Conocer con precisión la cantidad y distribución de la luz que ingresa a un edificio es de fundamental importancia (Reinhart, 2020). Una evaluación del rendimiento de la luz natural en la etapa inicial de proyecto es esencial para el diseño y la optimización de la morfología de un edificio, debido a su impacto en el consumo de energía y las condiciones lumínicas de los ambientes interiores (He et al., 2021). Existen diversos métodos para analizar estrategias de diseño de edificios y pueden dividirse en tres categorías: (i) modelado a escala, (ii) cálculos manuales y (iii) simulaciones por computadora (Ngarambe et al., 2022). De todos ellos, este último es el método más usado en la actualidad por los profesionales del medio. Sin embargo, la simulación por computadora presenta desafíos en el contexto profesional de la región: (i) adquisición de equipos con altas prestaciones de procesamiento y almacenamiento (requerimientos técnicos), (ii) adquisición de programas privativos de licencias anuales renovables, (iii) conocimiento de lenguaje de programación (código o seudo-código) para la implementación de métodos y flujo de trabajo, (iv) prolongados tiempos de ejecución y cálculo, principalmente en técnicas avanzadas de precisión como trazado de rayos o raytracing. Esto conduce a que arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación –natural y artificial-, no sean alentados a buscar soluciones energéticamente eficientes que potencien el uso de la luz natural para iluminar espacios interiores durante las horas diurnas (Monteoliva et al., 2014).

En este escenario, surge la necesidad de desarrollar metodologías para el cálculo de indicadores que preferentemente no requieran de entornos de simulación para su cálculo, y a la vez sean representativos del comportamiento dinámico de la luz natural. A nivel mundial, se está haciendo un

gran esfuerzo por transferir los resultados de los estudios, respecto a calidad de iluminación y confort de los usuarios, a normativas o recomendaciones, indicadores y herramientas simplificadas. Esto tiene por objetivo permitir la efectiva implementación de estrategias y tecnologías que reduzcan los consumos de energía y mejoren las condiciones de confort, por parte de los proyectistas. Puntualmente, respecto a la iluminación natural, se ha focalizado en el desarrollo de métricas dinámicas de luz natural (Mardaljevic et al., 2017; IES, 2012) y modelos que permitan calcular de manera simplificada los índices que caracterizan el comportamiento dinámico de la iluminación natural (Li et al., 2024; Monteoliva et al., 2016).

Ante esta problemática, en estudios previos a este trabajo, integrantes del grupo de Iluminación Natural Sustentable del Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CONICET) propusieron un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil ($UDI_{100\text{-}2000lx}$), para locales perimetrales individuales bajo condiciones de cielo claro para la ciudad de Mendoza, Argentina (Monteoliva et al., 2016), a partir del conocimiento del área y la orientación de la ventana. Actualmente, este modelo está incorporado a la aplicación móvil AppUDI v.1.0 (Aceña et al., 2016).

Con el objetivo de robustecer el modelo predictivo desarrollado previamente, se realizaron nuevas simulaciones de iluminación natural dinámica ampliando la matriz de variables que considera el modelo respecto al tipo de cielo, la orientación, el área vidriada y la transmitancia visible del vidrio (τ_v), lo que resultó en un total de 207036 condiciones lumínicas analizadas mediante simulación por computadora. Como primer paso en el análisis de los datos generados, este trabajo ofrece un análisis descriptivo-exploratorio de los valores de iluminancia producidos por simulación dinámica de luz natural para verificar la pertinencia de la matriz de variables y los niveles preestablecidos, previo al desarrollo del nuevo modelo.

METODOLOGÍA

La metodología se divide en cuatro bloques principales: (i) selección de variables de análisis, (ii) métricas dinámicas de iluminación natural, (iii) simulaciones de luz natural y (iv) análisis matemático.

Selección de variables de análisis

En la Tabla 1 se expone la matriz de análisis obtenida a partir de las variables y los niveles de las mismas consideradas para el desarrollo del modelo (inputs): *orientación de la fachada*, *área vidriada* y *transmitancia visible del vidrio* (τ_v). Asimismo, este análisis se desarrolló para nueve ciudades distintas de la Argentina, a partir del uso de bases climáticas, sensibilizando el modelo a distintas *condiciones de cielo.* Además, se exponen en la Tabla 1 las métricas dinámicas utilizadas para evaluar esas condiciones lumínicas que surgen de la combinatoria de las variables de análisis (outputs).

Tabla 1: Matriz de análisis.

inputs					*outputs*
Ventana (centro 0,0)				*Condición de cielo*	*Métrica dinámica*
Tamaño		*Orientación (°)*	τ_v		
Alto (m)	*Ancho (m)*				
0.5 m a 3 m cada 0.05m	0.5 m a 4 m cada 0.05m	0° a 350° cada 10°	0.1 a 0.9 cada 0.1	Mendoza, Bahía Blanca, Comodoro Rivadavia, Córdoba, Buenos Aires, Salta, Bariloche, Resistencia, Neuquén	DA, sDA, UDI y sUDI

-*Condición de cielo.* Con la finalidad de considerar un amplio rango de disponibilidad de irradiancia solar horizontal global media de la región se seleccionaron nueve ciudades argentinas distribuidas en el territorio nacional. Este criterio se basa en que la disponibilidad de radiación es la variable climática que influye principalmente en la disponibilidad de iluminancia. En la Figura 1 se expone el mapa de Argentina con la distribución de irradiancia solar horizontal global media y las ciudades seleccionadas. Para la simulación se emplearon archivos climáticos EPW correspondientes a cada una de ellas:

Mendoza (Mza), Bahía Blanca (BB), Comodoro Rivadavia (CR), Córdoba (Cba), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Salta (S), Bariloche (B), Resistencia (R) y Neuquén (N).

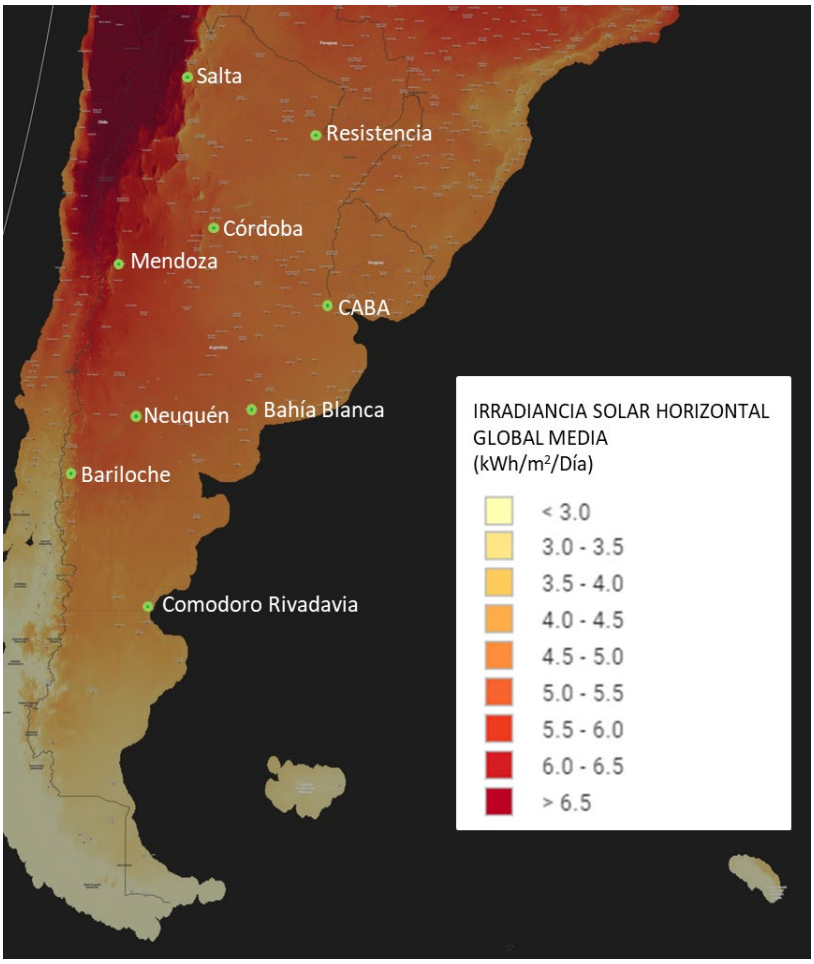


Figura 1: Mapa de irradiancia solar horizontal global media (fuente NREL, 2024) con las ciudades seleccionadas.

Es importante destacar en este punto que la zonificación bioambiental Argentina propuesta en la Norma: IRAM 11603:2012 "Clasificación bioambiental de la República Argentina" (IRAM, 2012) plantea una agrupación del territorio argentino en seis zonas de acuerdo a variables térmicas, lo cual permite avanzar sobre análisis del balance térmico de los edificios. Sin embargo, esta clasificación no es óptima para el estudio del desempeño lumínico de los edificios (Fonseca et al., 2017). Es por este motivo que se decidió trabajar con la irradiancia solar horizontal global media como criterio de selección de las localidades, para incluir distintos tipos de cielo del territorio nacional.

-*Orientación de la fachada. E*sta variable se definió de acuerdo al azimut de la ventana cada 10º, entre 0º y 350º. Siendo la orientación norte 180º y la sur 0º. Cabe destacar que el modelo desarrollado previamente presentaba esta variable con un paso de 30º.

-*Área vidriada.* Esta variable se definió de acuerdo al alto y ancho de la ventana. La abertura está centrada respecto del muro y tiene un crecimiento escalar cada 0.05 m en ancho y alto, comenzando en 0.5 m x 0.5 m (0.25 m^2). Lo que resulta siempre en una abertura cuadrada. Esta decisión se basa en los resultados obtenidos previamente (Monteoliva et al., 2016), donde se observó que no hay diferencias significativas entre las diversas disposiciones de la ventana (horizontal, vertical y escalar). Al alcanzar los 3 m x 3 m (9 m^2) la abertura continúa aumentando sólo en ancho (ejemplo: 3 m de alto x 3.05 m de ancho), por tener la fachada del modelo geométrico 4 m de ancho por 3 m de alto (12 m^2).

-*Transmitancia visible del vidrio.* Esta variable se definió cada 10% de τ_v, comenzando en 10% (τ_v = 0.1) y finalizando en 90% (τ_v = 0.9). El modelo anterior se había ejecutado con un sólo valor de τ_v

(89%), correspondiente al vidrio claro simple, sin embargo, en la actualidad la disponibilidad de distintos tipos de vidrios, films y sistemas de aventanamientos (doble vidriado e incluso triple vidriado) requiere incorporar más niveles a la variable para sensibilizar el modelo.

La ampliación de esta variable se basa en estudios previos desarrollados por los autores (Villalba et al., 2017) donde se analizan los valores de τ_v más frecuentes de los productos de acristalamientos. A partir de este estudio se pudo determinar cuáles son los valores más frecuentes de τ_v para los productos de cerramientos transparentes disponibles. Los resultados obtenidos muestran para los valores de τ_v de 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 una frecuencia porcentual que varía del 10.2% al 13.6%. Esta frecuencia se incrementa para la transmitancia 0.9 alcanzado un 16.2% del total, y disminuye por debajo del 10% para las transmitancias 0.1, 0.2 y 0.3. Si bien individualmente las transmitancias por debajo del 0.4 representan menos del 10% de las superficies transparentes, la sumatoria de las tres (0.1, 0.2 y 0.3) alcanzan el 20% de los tratamientos de vidriado. Además, es importante considerar que en muchos casos estas superficies transparentes se emplean de manera combinada (doble y triple vidriado) por lo que valores de τ_v inferiores al 30% son muy frecuentes. Por este motivo se toma la decisión de trabajar con el rango de τ_v del 0.1 al 0.9, con un incremento de 0.1.

-*Métricas dinámicas de iluminación natural.* Respecto a la caracterización del comportamiento ambiental de la iluminación natural, un aspecto fundamental, es el paradigma dinámico de la iluminación natural (Reinhart et al, 2006; Mardaljevic, 2017), particularmente significativo en las regiones con cielo claro. Este enfoque permite obtener resultados anuales del comportamiento lumínico de un espacio -métricas dinámicas-, en contraposición con el paradigma estático basado en datos puntuales -iluminancias en un determinado momento del año-.

Para el análisis de la luz natural se consideraron dos métricas y sus versiones espaciales. La selección de estas métricas permite, por un lado, detectar la disponibilidad de iluminación natural y, por otro lado, identificar el porcentaje de ocurrencia de valores de iluminancia dentro de un rango aceptable. Las mismas se detallan a continuación:

-*Autonomía de la luz natural* (DA del inglés *Daylight Autonomy*) es el porcentaje de las horas ocupadas del año en las que el requisito mínimo de iluminancia en el sensor se satisface únicamente con luz natural (Reinhart et al., 2006). Esta métrica incorpora la distribución espacial mediante la *Autonomía espacial de luz natural* ($sDA_{200/50\%}$ del inglés *Spatial Daylight Autonomy*), que determina la suficiencia de iluminación natural para un área determinada, informando el porcentaje de superficie que supera un nivel de iluminación especificado (200 lx) más del 50% de la cantidad determinada de horas anuales (IES, 2012).

-*Iluminancia por luz natural útil* (UDI del inglés *Useful Daylight Illuminance*) es la ocurrencia anual de iluminancias, en todo el plano de trabajo, que se encuentran dentro de un rango considerado "útil" por los ocupantes (Mardaljevic et al., 2017). El rango de iluminancia aceptable seleccionado en este trabajo es el fijado por Nabil et al. (2006): entre los 200 - 2000 lx. Esta métrica incorpora la distribución espacial mediante la *Iluminancia espacial por luz natural útil* (sUDI, del inglés *Spatial Useful Daylight Illuminance*), que determina la suficiencia de iluminación natural para un área determinada, informando el porcentaje de superficie que se encuentra en el rango de iluminación especificado durante más del 50% de la cantidad determinada de horas anuales ($sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$).

Simulaciones de iluminación natural

-*Modelo virtual.* El espacio modelado corresponde a una oficina típica (6x4 m; h= 3 m) con ventana unilateral centrada respecto del muro (0,0). La caracterización óptica de las superficies del espacio interior, se realizó de acuerdo a los valores típicos de reflectancia difusa: pared 60%, techo 80%, piso 30% (CIBSE, 2015). El software *Radiance* (Ward y Shakespeare, 1998) fue el motor de cálculo de las simulaciones de iluminación natural. Esta herramienta ha sido empleada y validada ampliamente en las últimas décadas por la comunidad científica (Mardaljevic, 1999; McNeil y Lee, 2013).

-*Parámetros de simulación.* Los parámetros de simulación empleados corresponden a una escena simple con elementos transparentes y opacos; y sin elementos complejos de iluminación natural (Mardaljevic, 1999): (ab) 5; (ad) 1000; (as) 100; (aa) 0.1; (ar) 300; (dt) 0; (ds) 0

-Archivo de ocupación del espacio. Se generó en un archivo de ocupación del espacio de acuerdo al horario de uso más frecuente de las oficinas ubicadas en edificios no residenciales: lunes a viernes de 8:00 a 18:00.

Análisis matemático

La principal herramienta utilizada para el análisis de los datos es la exploración gráfica de las relaciones entre las métricas de disponibilidad de luz natural y las variables consideradas, a través de diagramas de dispersión. Estos diagramas nos permiten visualizar relaciones entre las variables estudiadas y responder fácilmente preguntas sobre el impacto de las variables consideradas en el estudio en las métricas dinámicas de iluminación natural.

RESULTADOS

Por un lado, el análisis de los gráficos de distribución de frecuencia (Figura 2), que consideran las variables condición de cielo, área vidriada y τ_v del vidrio, nos permiten afirmar que las variables área vidriada y τ_v del vidrio tienen impacto en las métricas dinámicas de iluminación natural analizadas (DA, sDA, UDI y sUDI), lo cual significa que influyen en la disponibilidad de luz natural en el interior del espacio. Por otro lado, a priori detectamos que la variable condición de cielo afecta el desempeño de las métricas dinámicas de iluminación natural en los escenarios analizados de manera más atenuada. Es decir que no modifica la morfología de las curvas, sin embargo, produce un leve desplazamiento ascendente o descendente de los valores que toman las métricas, que responde a la mayor o menor disponibilidad de radiación solar de la ciudad analizada. Debido a la cantidad de tipos de cielos analizados, la similitud en los resultados de este primer análisis y la extensión de la publicación, se decide graficar a modo de ejemplo solo 3 ciudades que podemos clasificar como extremas e intermedias (Figura 2). A continuación, se analizarán los resultados obtenidos en las métricas dinámicas respecto a las variables área vidriada y τ_v del vidrio bajo diferentes condiciones de cielo (ciudades).

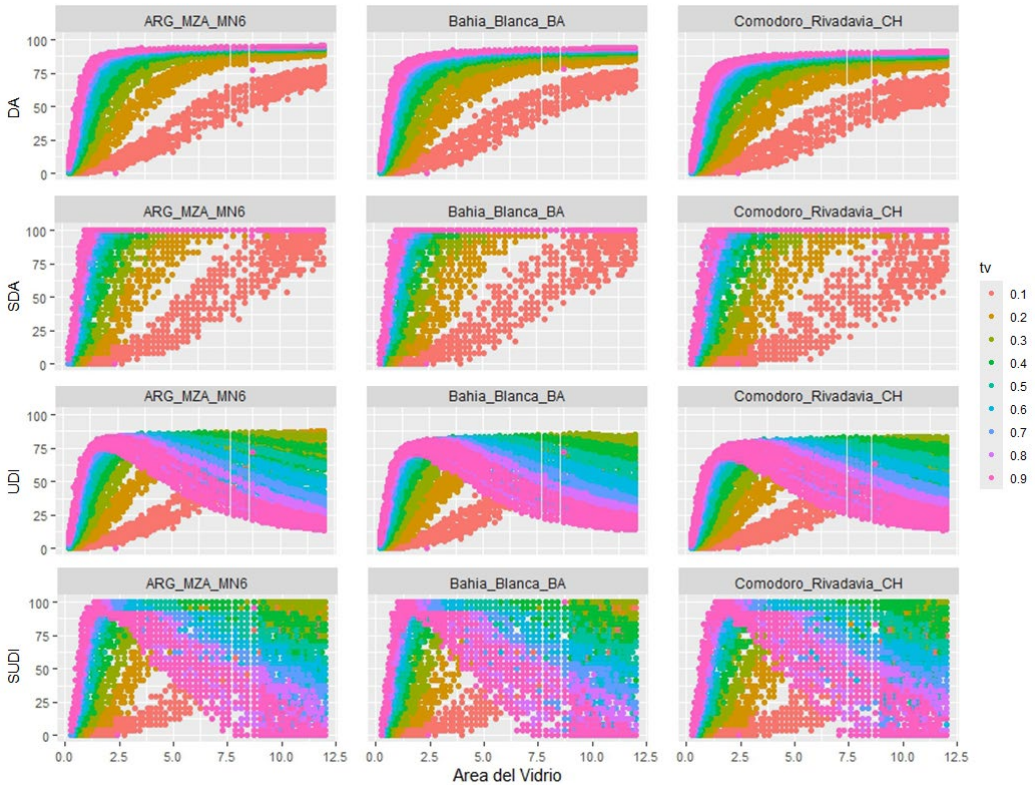


Figura 2: Diagrama de dispersión de las métricas dinámicas en función del área vidriada, según ciudad (tipo de cielo) y transmitancia.

Específicamente, respecto al DA_{200} (Figura 2) en todas las ciudades -condiciones de cielo- observamos una relación tendiente a logarítmica para las τ_v entre 0.2 a 0.9 sin embargo, esta distribución toma una

apariencia lineal para las τ_v de 0.1. Este comportamiento mostraría que para las τ_v superiores o iguales a 0.2, cuando el área vidriada es superior a 7.5 m^2, el DA_{200} se estabiliza y supera en todos los casos el 75%. Mientras que para τ_v del orden del 0.1 no se alcanza esta saturación.

La $sDA_{200,50\%}$ (Figura 2) presenta relaciones menos compactas y que alcanzan valores de saturación ($sDA_{200,50\%}$ = 100%) cuando el área vidriada es de aproximadamente 6.5 m^2 para $\tau_v \geq 0.2$. A diferencia del DA_{200}, para valores de τ_v de vidrio de 0.1 hay algunas condiciones en las que la métrica satura. Resulta importante recordar que mientras que el DA_{200} representa el porcentaje de las horas en que se supera un nivel de iluminación especificado, el $sDA_{200,50\%}$ indica el porcentaje de superficie que supera un nivel de iluminación especificado durante una cantidad determinada de horas anuales (en este caso el 50% de las 3650 horas analizadas).

Respecto al $UDI_{200\text{-}2000}$ (Figura 2) observamos nuevamente relaciones escalonadas que no modifican la forma de la curva de manera contundente de acuerdo al tipo de cielo. Como se expuso previamente el UDI es una métrica que identifica valores dentro de un rango (200 a 2000 lx), siendo su objetivo detectar condiciones donde la disponibilidad de luz es suficiente pero no excesiva, reduciendo potenciales condiciones de deslumbramiento. Esto explica el comportamiento que observamos en el diagrama de dispersión, donde las relaciones alcanzan valores máximos en distintos puntos, de acuerdo a la dinámica conjunta del área de vidriado y la τ_v de vidrio, y luego comienzan a descender (Figura 5). Esto se debe a que para esas combinaciones de área de vidriado y τ_v de vidrio los valores de iluminancia comienzan a ser excesivos (por encima de los 2000 lx) y, por lo tanto, el periodo de tiempo en el que el espacio se encuentra dentro del rango útil ((200 a 2000 lx) comienza a reducirse. Siendo los descensos anticipados y más acentuados para los valores de τ_v de vidrio más elevados.

En el $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$ (Figura 2), nuevamente, observamos que, al avanzar sobre el análisis espacial de la métrica, las relaciones se presentan menos compactas pero el comportamiento es similar al $UDI_{200\text{-}2000}$. Sin embargo, es interesante considerar que para esta métrica los valores más elevados de τ_v de vidrio analizados (0.8 y 0.9) presentan condiciones con valores iguales o próximos al 0%, para áreas de vidrio > 7.5 m^2. Esto implica que para valores altos de τ_v de vidrio y áreas de vidrio superiores a 7.5 m^2 el porcentaje de superficie que se encuentra entre los 200 y 2000 lx durante el 50% de las horas analizadas es igual a cero. Esto se debe claramente al exceso de radiación solar visible.

Con el objetivo de profundizar en el análisis del impacto de la variable *condición de cielo* en las condiciones de iluminación natural (DA_{200}, $sDA_{200,50\%}$, $UDI_{300\text{-}2000}$, $sUDI_{300\text{-}2000,50\%}$) se realizó la prueba de rangos de Kruskal-Wallis. Para todas las métricas analizadas se obtuvieron *p*-valores muy pequeños, inferiores a 0.00001. En consecuencia, se infiere que hay diferencia significativa en la distribución de las variables de DA_{200}, $sDA_{200,50\%}$, $UDI_{200\text{-}2000}$ y $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$ en al menos dos de los niveles de la variable condición de cielo. Para identificar en cuáles niveles de la variable condición de cielo tienen diferencias significativas, se realizan comparaciones de a pares a través de la prueba de rangos de Wilcoxon, ajustando el nivel de significación con el método de Bonferroni. Por la extensión del presente trabajo se muestran a modo de ejemplo el caso del $UDI_{200\text{-}2000}$ y del $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$. Los rectángulos coloreados en la Tabla 2 y en la Tabla 3 identifican los niveles en los que no hay diferencias significativas, tomando como nivel de significación $\alpha = 0.05$.

Tabla 2: Niveles de la variable condición de cielo (ciudad) en los que la distribución de la variable $UDI_{200\text{-}2000}$ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05

	Mendoza	Bahía Blanca	Comodoro	Córdoba	CABA	Salta	Bariloche	Resistencia
Bahía Blanca								
Comodoro								
Córdoba								
CABA								
Salta								
Bariloche								
Resistencia								
Neuquén								

Tabla 3: Niveles de la variable condición de cielo (ciudad) en los que la distribución de la variable $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05

	Mendoza	Bahía Blanca	Comodoro	Córdoba	CABA	Salta	Bariloche	Resistencia
Bahía Blanca								
Comodoro								
Córdoba								
CABA								
Salta								
Bariloche								
Resistencia								
Neuquén								

En general observamos que algunas condiciones de cielo se agrupan, sobre todo en las métricas espaciales ($sDA_{200,50\%}$ y $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$). Sin embargo, no es algo que sea extensivo en todas las métricas consideradas. Por lo que concluimos que es necesario incorporar al modelo la variable condición de cielo con todos los niveles analizados (ciudades).

En relación a la variable *orientación de la fachada* observamos a priori que su impacto en la disponibilidad de la luz natural en el interior del espacio analizado no es tan evidente como el observado para las variables área de vidrio y τ_v (Figura 3, 4, 5 y 6). Sin embargo, resulta interesante considerar que los valores de DA_{200} y $DA_{200,50\%}$ para las orientaciones próximas al norte (entre 150° y 210°) (Figuras 3 y 4), cuando la $\tau_v < 0.3$, se despegan de los demás valores, ubicándose en la parte superior de la misma. Lo que implica que para valores bajos de τ_v la disponibilidad de radiación es más sensible a la orientación de la abertura. En ambas métricas detectamos, además, que los valores se agrupan de manera más compacta a medida que aumenta la τ_v. Esto se debe en el caso del DA_{200} a que a medida que crece la τ_v, cada vez más escenarios alcanzan el valor mínimo de 200 lx exigidos. Mientras que en el caso del $sDA_{200,50\%}$ a mayores τ_v es más elevado el porcentaje de superficie que supera los 200 lx el 50% del tiempo analizado.

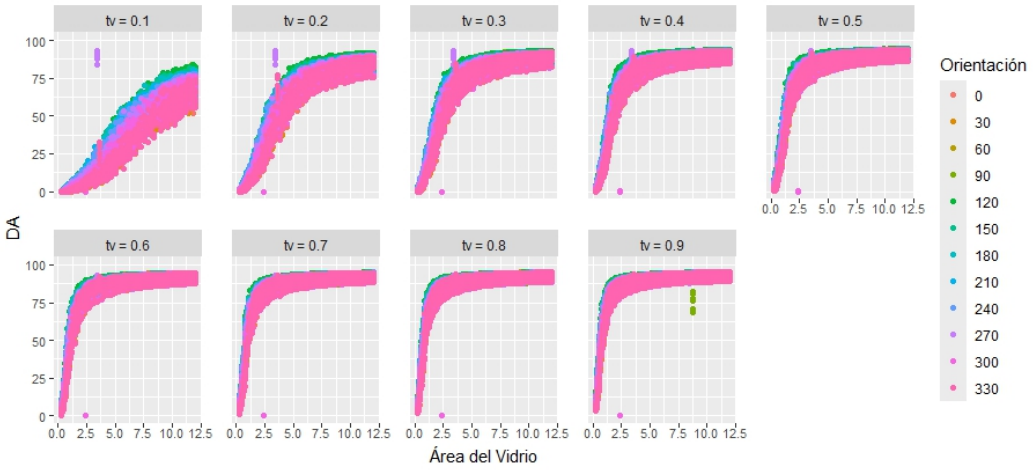


Figura 3: Diagrama de dispersión de la métrica DA_{200} en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada

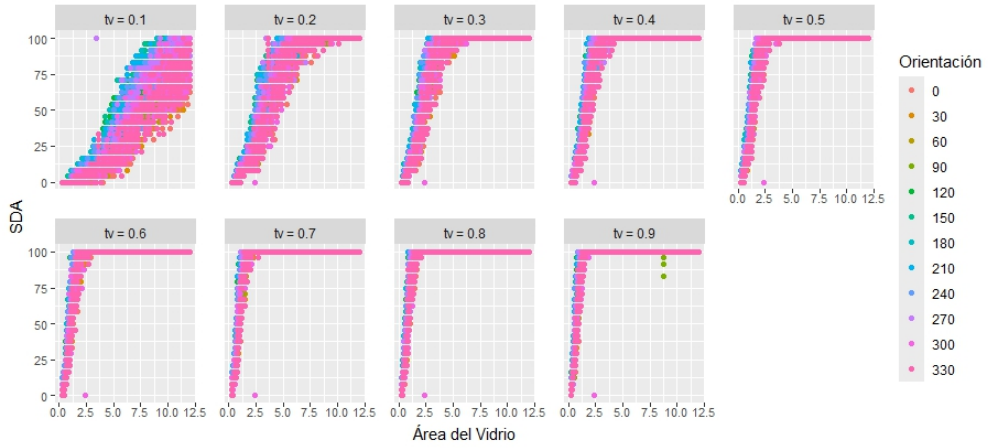


Figura 4: Diagrama de dispersión de la métrica $sDA_{200,50\%}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada.

Respecto al $UDI_{200\text{-}2000}$ y al $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$ (Figura 5 y 6), observamos que son las mismas orientaciones que en el DA_{200} y $DA_{200,50\%}$ las que diferencian su comportamiento, de manera moderada. Sin embargo, para estas métricas la τ_v se comporta de manera similar al DA_{200} o $DA_{200,50\%}$ cuando es de 0.1, donde los escenarios más próximos al norte presentan valores más elevados. Esta condición se invierte progresivamente a medida que crecen los valores de τ_v para áreas de vidriado superiores. Esto claramente se debe a la característica de estas métricas que presentan un umbral superior de iluminancia (2000 lx).

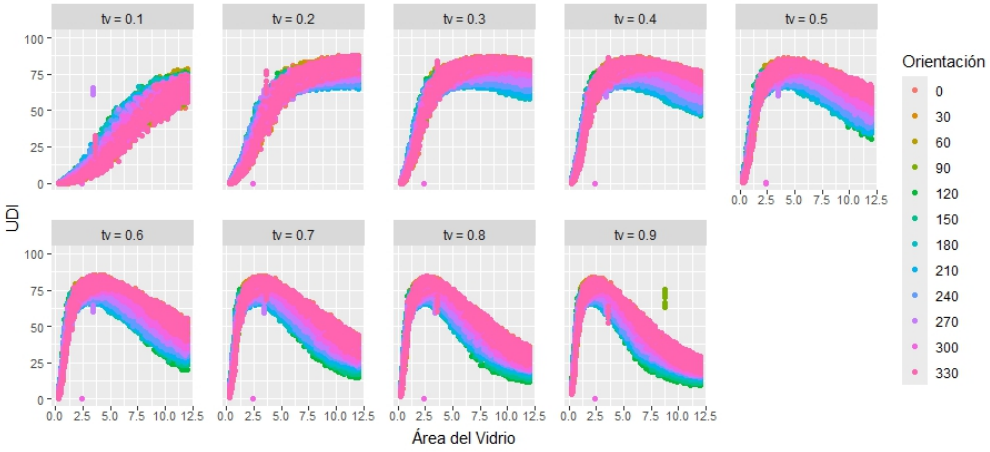


Figura 5: Diagrama de dispersión de la métrica $UDI_{200\text{-}2000}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada.

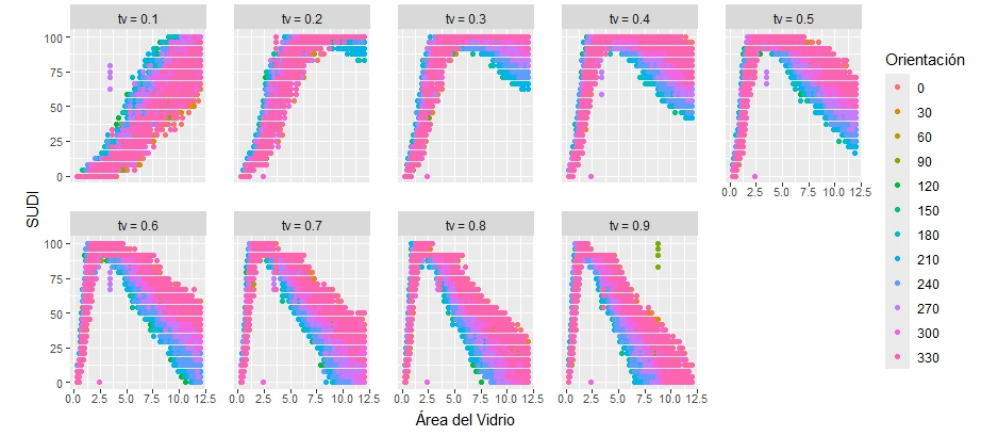


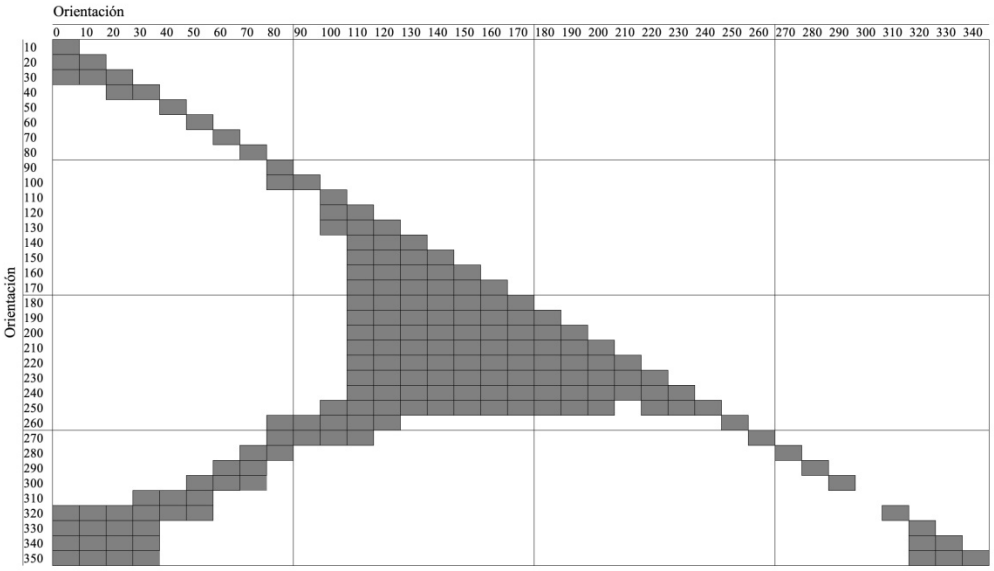
Figura 6: Diagrama de dispersión de la métrica $sUDI_{200\text{-}2000,50\%}$ en función del área vidriada, según transmitancia y orientación de la fachada

Con el objetivo de profundizar el análisis del impacto de la variable *orientación* en las métricas dinámicas de iluminación natural se realizó nuevamente la prueba de rangos de Kruskal-Wallis. Para todas las métricas analizadas se obtuvieron *p*-valores inferiores a 0.00001. En consecuencia, se concluye que hay diferencia significativa en la distribución de las variables DA_{200}, $DA_{200,50\%}$, $UDI_{200-2000}$, $UDI_{200-2000,50\%}$ en al menos dos de los niveles de la variable orientación. Para identificar las diferencias significativas en los niveles de la variable orientación, se realiza una nueva prueba de rangos de Wilcoxon. El nivel de significación fijado es de $\alpha = 0.05$. A título ilustrativo se exponen el caso del $UDI_{200-2000}$ (Tabla 4), siendo los resultados muy similares para las cuatro métricas analizadas. A modo de ejemplo, se realiza la interpretación de algunos pares de niveles:

-La distribución de la variable $UDI_{200-2000}$ en el nivel de Orientación 0 no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05, a la distribución en los niveles de orientación 10, 20, 30, 320, 330, 340 y 350.

-La distribución de la variable $UDI_{200-2000}$ en el nivel de Orientación 10 no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05, además de lo enunciado antes, a la distribución en los niveles de orientación 20, 30, 320, 330, 340 y 350.

Tabla 4: Niveles de la variable orientación de la fachada en los que la distribución de la variable $UDI_{200-2000}$ no es significativamente diferente, a un nivel de significación de 0.05.



El resultado general de este análisis detallado nos permite visualizar la posibilidad de agrupar esta variable de acuerdo a la distancia al norte (180º), ya que se observa un comportamiento similar de la métrica $UDI_{200-2000}$ en los niveles de la variable orientación que se encuentran a distancias similares al nivel 180°.

Este mismo análisis se condujo para cada una de las métricas consideradas en el estudio con la finalidad de determinar cuántas condiciones de cielo y orientaciones diferentes es necesario contemplar para la ejecución del modelo. Resulta importante tener en cuenta que estas pruebas consideran los valores de las métricas solamente respecto de una variable, orientación o condición de cielo.

CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolla un análisis descriptivo-exploratorio preliminar de los datos de iluminancia –mediados por métricas dinámicas de iluminación natural- para el desarrollo de un nuevo modelo predictivo regional de la disponibilidad de luz natural en locales perimetrales individuales (oficina típica). Considera una matriz de análisis de cuatro variables como datos de entrada o *input* (orientación de la fachada; área vidriada; transmitancia visible del vidrio; tipo de cielo) y cuatro métricas dinámicas como datos de salida u *output* (DA_{200}, $DA_{200,50\%}$, $UDI_{200-2000}$, $UDI_{200-2000,50\%}$).

La principal conclusión a la que se llega con la presente investigación es que las variables área vidriada y transmitancia visible del vidrio claramente tienen un impacto en las métricas dinámicas empleadas para conducir el análisis de desempeño de la luz natural en un espacio interior. Asimismo, concluimos que para la variable condición de cielo tenemos que considerar todos los casos analizados, debido a que incrementa o disminuye el valor que toman las métricas estudiadas. Finalmente, respecto a la orientación surge la posibilidad de reagrupar de acuerdo a la distancia al norte, lo que reduciría la cantidad de valores que toma esta variable en el modelo.

Concluimos, además, que es importante considerar para la construcción del modelo predictivo métricas que evalúen distintos parámetros. Como se observa en este trabajo las métricas analizadas son sensibles de manera diferenciada a las variables estudiadas. Por ejemplo, las métricas que implican espacialidad (sDA y sUDI) son menos sensibles a la disponibilidad de radiación solar. Al profundizar en la respuesta de las distintas métricas dinámicas, se observa con claridad que será necesario desarrollar un modelo sensible a cada una de ellas, que refleje con precisión las diferencias de comportamiento detectadas.

Si bien este trabajo es de carácter exploratorio preliminar, ofrece resultados favorables a considerar en la construcción del nuevo modelo predictivo. Este análisis nos permite avanzar sobre la selección de técnica estadísticas adecuadas para la construcción del modelo y en una precisa selección de variables y niveles de las mismas.

Finalmente, se detectan potenciales áreas para el desarrollo de futuros trabajos, entre las que se destaca avanzar sobre una zonificación de iluminación natural para Argentina. Un insumo fundamental para este estudio es el Atlas de energía solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007) donde se dispone de datos de irradiación solar global y de heliofanía efectiva de la República Argentina, indispensables para la construcción de la mencionada zonificación. Asimismo, y como principal trabajo a futuro se prevé, una vez construido el modelo, el desarrollo de una nueva aplicación móvil similar a la desarrollada en la primera versión del mismo (Aceña et al., 2016).

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

-ANPCYT: PICT 2019-04356 Desarrollo de indicadores y métricas de Iluminación natural integrativa en climas soleados para el diseño de ambientes visuales productivos, confortables y saludables; -CONICET: PIBAA 28720210100031CO. Luz natural en aulas. Uso de sistemas de inmersión de realidad virtual para la evaluación de las condiciones de luz natural y el desempeño atencional de niños.

REFERENCIAS

Aceña A., Monteoliva JM., Villalba A. (2016). “AppUDI v1.0.” Número de registro: 5290835. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, Dirección Nacional de Derecho de Autor.

CIBSE. (2015). AM11: Building Performance Modelling. London.

Fonseca RW., Fernandes FFDA. y Ruttkay Pereira E. (2017). Zoneamento bioclimático referente à iluminação natural para o território brasileiro. En: XIV ENCAC-Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, X ELACAC–Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais. Balneário Camboriu, pp.1889-1898.

Grossi Gallegos H. y Righini, R. (2007). Atlas de energía solar de la República Argentina.

He Q., Li Z., Gao W., Chen H., Wu X., Cheng X. y Lin B. (2021). Predictive models for daylight performance of general floorplans based on CNN and GAN: A proof-of-concept study. Building and Environment, 206, 108346.

IES. (2012). Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). IES LM-83-12. 2012.

IRAM. (2012). Norma: IRAM 11603:2012 Clasificación Bioambiental de La República Argentina.

Li X., Yuan Y., Liu G., Han Z. y Stouffs R. (2024). A predictive model for daylight performance based on multimodal generative adversarial networks at the early design stage. Energy and Buildings, 305, 113876.
Mardaljevic J. (1999). Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients. Tesis Doctoral. De Montfort University Leicester, UK.
Mardaljevic J. (2017). [en línea] Climate-Based Daylight Modelling. Dirección URL: <http://climate-based-daylighting.com/doku.php?id=academic:climate-based-daylight-modelling> [consulta: 8 de agosto de 2024]
McNeil A. y Lee E. (2013). A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. Journal of Building Performance Simulation, 6, 1, 24-37.
Monteoliva J., Villalba A. y Pattini A. (2014). Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. Ambiente Construido, 14, 3, 43-58.
Monteoliva JM., Villalba A., Aceña A. y Pattini A. (2016). Cálculo de iluminancia por luz natural útil (UDI) en espacios individuales perimetrales de cielos claros. Revista Hábitat Sustentable, 6:50–9.
Nabil A. y Mardaljevic J. (2006). Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors." Energy and Buildings 38, 7, 905–913.
Ngarambe J., Adilkhanova I., Uwiragiye B. y Yun G. Y. (2022). A review on the current usage of machine learning tools for daylighting design and control. Building and Environment, 223, 109507.
NREL. [en línea] NSRDB: National Solar Radiation Database. Dirección URL: https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer [consulta: 8 de agosto de 2024]
Reinhart C. (2020). Daylighting Handbook I, 1ª edición. Building Technology Press, Cambridge, MA.
Reinhart C., Mardaljevic J. y Rogers Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America 3(1): 7–31.
Villalba A., Monteoliva JM., Aceña A. y Pattini A. (2017). Determinación de los valores de transmitancia visible de una abertura necesarios para sensibilizar un modelo matemático para el cálculo de la iluminación natural interior. En: XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: habitat humano - em busca de conforto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade no século XXI. Balneário Camboriu, pp. 1929-1937.
Ward G. y Shakespeare R. (1998). Rendering with Radiance: The Art and Science of Lighting Visualization. Computer Graphics and Geometric Modeling Series. Createspace, Carolina del Sur.

DEVELOPMENT OF A REGIONAL PREDICTIVE MODEL OF DAYLIGHT AVAILABILITY IN INDOOR SPACES. PRELIMINARY DATA ANALYSIS.

ABSTRACT Accurately knowing the quantity and distribution of daylight entering a building is of fundamental importance. However, determining the behavior of daylight inside a space is not a simple task. In this context, and with the aim of strengthening a previously developed predictive model for calculating the availability of natural light in interior spaces, dynamic natural lighting simulations were carried out, expanding the matrix of variables considered in the original model with respect to sky type, orientation, glazed area, and visible transmittance of the glass. As a first step in the analysis of the generated data, this work offers a descriptive-exploratory analysis of the illuminance values produced by simulation to verify the relevance of the variable matrix and the preset levels, prior to the development of the new model. The main results indicate that the variables glazed area and visible transmittance of the glass clearly have an impact on the dynamic metrics used to drive the analysis of natural light performance in an interior space. It is concluded that this type of preliminary exploratory analysis allows for a precise selection of variables and their levels.

Keywords: daylighting, predictive model, visible transmittance, glazed area, façade orientation.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 44-56, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

"ETIQUETADO AMBIENTAL EDILICIO" PARA CUMPLIR CON LOS OBJETIVOS DE SUSTENTABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES RESIDENCIALES DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Lourdes I. Marini[1], Santiago M. Reyna[2]
[1]Calden Consultoría SRL – Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba
www.caldenconsultoria.com +54 351 7000717, lmarini@caldenconsultoria.com
[2]Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. a - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar +54 351 5353800, santiago.reyna@unc.edu.ar

RESUMEN: El contexto actual impulsa la búsqueda de acciones para mitigar la crisis asociada al cambio climático, donde el etiquetado ambiental edilicio se posiciona como una herramienta de importancia relevante para reducir las emisiones de efecto invernadero asociadas al sector residencial, al promover prácticas constructivas sostenibles y evaluar el consumo energético de viviendas. Este trabajo propone los lineamientos básicos para el desarrollo de un sistema de etiquetado ambiental edilicio en la provincia de Córdoba. La metodología empleada se basa en el estudio de la normativa legal, estándares y sistemas de certificación ambiental existentes para el desarrollo de los criterios de sustentabilidad que serán la estructura de este sistema y la base para la evaluación y clasificación ambiental de la vivienda evaluada. El principal resultado es el diseño de un sistema de etiquetado ambiental edilicio que incluye directrices claras para su implementación y la estructura de la etiqueta a otorgar. El mismo ofrece una herramienta confiable para impulsar construcciones sostenibles, ofreciendo a los propietarios e inversionistas una base confiable para evaluar y comparar distintas propuestas constructivas.

Palabras clave: Certificación ambiental, eficiencia energética, arquitectura sostenible.

INTRODUCCIÓN

Un tema de gran relevancia actual es la problemática asociada al calentamiento global, el cual genera un aumento de la temperatura de la superficie terrestre debido principalmente al incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según el inventario nacional de GEI en la Argentina, el sector energético es el principal generador representando el 51% de las emisiones totales del país. Por otra parte, el subsector denominado "combustibles residenciales" representa el 7% de las emisiones totales, ubicándose en el sexto lugar del total de trece subsectores analizados (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Esto es así, debido a que el suministro energético residencial es provisto principalmente por recursos fósiles como el gas natural, petróleo y sus derivados. Analizando en profundidad, según el informe anual de CAMMESA de 2023, los usuarios residenciales representan el 46% de la demanda eléctrica total de Argentina (CAMMESA, 2023) mientras que, en el informe anual de ENERGAS del 2022, los usuarios residenciales constituyen el 25.3% del gas natural total entregado, valor que aumentó un 7.1% respecto al año 2021 (ENERGAS, 2022). Con estos valores, se puede interpretar que el sector residencial tiene un gran peso dentro de la matriz energética de consumos del país, por lo que genera una gran oportunidad a la hora de aplicar políticas energéticas en torno a sistemas de uso racional y eficiente de la energía.

A partir del contexto analizado, el presente trabajo se propone el desarrollo de un sistema de etiquetado ambiental edilicio. En una primera instancia se analizan normativas y sistemas de certificación ambiental

nacionales e internacionales, con el objetivo de considerar los aspectos más relevantes de cada uno de ellos. Entre las principales normativas y certificaciones analizadas se encuentran las normas IRAM que abordan el aislamiento térmico, sostenibilidad y eficiencia energética. También se estudian estándares internacionales como LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), BREEM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), Passivhaus, WELL Building standard y normas ISO que tratan la gestión energética y ambiental. Estas referencias proporcionan un marco para desarrollar un sistema de etiquetado ambiental edilicio que promueva prácticas de construcción sostenibles enfocado en la provincia de Córdoba. Por otra parte, se realiza un análisis legislativo a nivel provincial y nacional con el objetivo de conocer aquellas leyes y resoluciones aplicables a este tipo de sistemas. El resultado de este análisis indica que actualmente, no existe un marco regulatorio definido en torno a la eficiencia energética y etiquetado ambiental edilicio que impulse este tipo de proyectos. Únicamente se cuenta con proyectos de ley que buscan implementar estos sistemas, pero los mismos no se encuentran aprobados aun en el poder legislativo.

METODOLOGÍA

Para desarrollar un sistema de etiquetado ambiental edilicio se deben establecer las bases fundamentales sobre las cuales va a estar basado, por lo cual para su diseño y estructuración se establecen seis criterios de sustentabilidad los cuales son: calidad ambiental, energía, agua, materiales, sitio y gestión ambiental, cada uno de estos criterios contemplan aspectos fundamentales para brindar una etiqueta ambiental a una vivienda. Estos criterios se basan en un proyecto de ley presentado y aún no promulgado (Reyna & Julia, 2020), que a su vez se basó en sistemas de certificación ambiental edilicia internacionales (BREEAM, 2024), (Fermín & García, 2017), (Argentina Green Building Council, 2023), (Bioconstrucción, 2023). A continuación, se describen cada uno de ellos.

“Calidad ambiental” contempla aspectos como confort térmico, iluminación natural y calidad de aire interior. El confort térmico está definido como la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico, dividido en: envolvente, recursos pasivos y transmitancia térmica máxima admisible, además tiene el objetivo de implementar estrategias de diseño bioambiental y recursos de acondicionamiento pasivo para lograr el bienestar de los ocupantes. Por otra parte, iluminación natural y calidad de aire tienen el objetivo de generar confort y bienestar de los usuarios, y optimizar el uso de energía.

“Energía” tiene el objetivo general de reducir el consumo energético implementando estrategias de diseño eficiente y la utilización de fuentes de energías renovables. Este criterio analiza la envolvente y transmitancia térmica de las viviendas, con el objetivo de establecer valores y métodos para el cálculo de propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario. También considera aspectos de eficiencia energética (activa y pasiva) con el objetivo de desarrollar viviendas que reduzcan el consumo de energía operativa (recursos activos) y finalmente, considera el uso energías renovables con el objetivo de lograr un aumento creciente de su participación a partir de recursos existentes en el sitio o entorno.

“Agua” tiene el objetivo general de reducir el uso de agua potable para uso sanitario y riego incorporando componentes de eficiencia hídrica, sistemas de reciclado y reúso de agua, cosecha de agua de lluvia y manejo adecuado de los recursos hídricos.

“Materiales” tiene el objetivo general de demostrar responsabilidad con el medioambiente a través de la selección de materiales que dispongan de información sobre un ciclo de vida sustentable, así como la reducción de residuos generados en las etapas constructivas.

“Sitio” tiene el objetivo de conservar áreas naturales y restaurar las dañadas. Se busca la calidad de vida de los habitantes.

Finalmente, **"Gestión Ambiental"** tiene el objetivo de conocer cuáles son las buenas prácticas constructivas empleadas y cómo es el uso del edificio una vez que comienza a funcionar.

Simultáneamente estos criterios deben basarse en:

- El concepto de huella hídrica, buscando establecer parámetros donde establecer que la misma tienda a la disminución en el uso de agua potable o en condiciones de potabilizar.
- El concepto de huella de carbono, buscando establecer parámetros que tiendan a la disminución en el uso de energías contaminantes.
- Impacto del Ciclo de Vida: para promover el uso de productos y materiales para los cuales haya información disponible sobre el ciclo de vida. Seleccionar productos de fabricantes que hayan verificado impactos medioambientales.
- Productos de Madera Certificados: Se podrá tomar como norma de referencia la Forest Stewardship Council FSC (Consejo de Administración Forestal) u otras similares, según defina la Autoridad de Aplicación. Con el objetivo de promover el uso de madera proveniente de bosques certificados.
- Certificación de la gestión de residuos y efluentes.

Desarrollo de criterios de sustentabilidad

Posteriormente a definir los criterios de sustentabilidad se procedió a desarrollar cada uno de ellos con el objetivo de poder cuantificar los aspectos a evaluar para entregar una calificación energética.

1. Calidad ambiental: Tiene el objetivo de crear viviendas que contengan espacios libres de impurezas, bien ventilados, con niveles de humedad adecuados y con temperaturas confortables, por lo que para el desarrollo de este ítem se contemplan los siguientes tres aspectos: confort térmico, iluminación natural y calidad de aire interior. A continuación, se procederá a desarrollar cada uno de estos aspectos.

   Confort térmico: Aquí se toman en cuenta técnicas de diseño bioambiental y recursos de acondicionamiento pasivo, por lo que se debe considerar las características climáticas de la provincia de Córdoba, la cual se encuentra compuesta por un clima cálido y un clima templado cálido. En función al tipo de clima se evaluarán las recomendaciones de diseño de la norma IRAM 11603 para climas cálidos (zona IIa) y clima templado cálido (zona IIIa) (IRAM 11603, 2012).

   Iluminación Natural: Optimizar el uso de luz diurna en espacios interiores contribuye a reducir significativamente el consumo energético diario de luz artificial. Para cuantificar la iluminación natural que ingresa en las viviendas residenciales se utiliza el Factor de Luz Diurna (FLD), comúnmente implementado en sistemas de certificación como BREEM y LEED. Este factor evalúa la relación entre la iluminación interior y exterior. Este método es más adecuado que medir simplemente la cantidad de "lux" por espacios, ya que considera la variabilidad de luz natural durante el día (Ponce de León Saavedra, 2023). El cálculo de FLD se muestra en la ecuación 1.

$$FLD = \left(\frac{Iluminación\ interior\ (lux)}{Iliminación\ exterior\ (lix)}\right) \times 100 \quad (1)$$

   Los valores mínimos recomendados para el FLD y lux en los distintos ambientes se listan a continuación (*Tabla 1*):

Tabla 1: FLD promedio mínimo recomendable (Ponce de León Saavedra, 2023)

Zonas	Factor de Luz Diurna mínimo recomendado [%]	Cantidad de Luxes mínimas requeridas [lux]
Dormitorio	0.4	50
Cocina	2.4	300
Sala de estar, Living	0.8	100
Comedor	0.8	100

Calidad de aire interior: Este término está comenzando a tomar importancia principalmente por problemas que se asocian a las personas que viven o trabajar en lugares con aire "contaminado", por lo que al priorizar la calidad del aire se cuida la salud de las personas que habitan estos espacios. Por otra parte, es un factor importante en el grado de confort térmico de los habitantes debido a las sensaciones producidas sobre las personas, ya que el movimiento del aire provoca generalmente un aumento de la evaporación del cuerpo y por eso una sensación de enfriamiento. Sin embargo, diferentes velocidades de movimiento de aire pueden ser apreciadas de modos diferentes, es por esto que los limites convenientes de velocidad del aire se definen por los efectos generados en las personas (Simancas Yovane, 2003). Estos límites pueden observarse en la Tabla 2 que indica las percepciones de las personas a determinadas velocidades del viento:

Tabla 2: Efectos del viento sobre las personas (Simancas Yovane, 2003)

Velocidad	Impacto Probable
Hasta 15 m/min	inadvertido
15 a 30 m/min	agradable
30,5 a 61 m/min	generalmente agradable, pero se percibe constantemente su presencia
61 a 91 m/min	de poco molesto a muy molesto
por encima de 91 m/min	requiere medidas correctivas si se quiere mantener un alto nivel de salud y eficiencia

Para lograr una buena calidad de aire interior es necesario que los espacios interiores dispongan de medios para que los recintos cerrados puedan ventilarse adecuadamente, por lo que además debe tenerse en cuenta para la evaluación el estándar 62.1 de ASHRAE "Ventilación para para una calidad aceptable de aire interior" (ANSI/ASHRAE, 2007).

2. Energía: Este criterio tiene el objetivo de reducir el consumo de energía a partir de la implementación de estrategias de diseño que sean eficientes desde el punto de vista energético. Para el desarrollo de este ítem se contemplan los siguientes tres aspectos: envolvente, transmitancia térmica, eficiencia energética y energía renovable. A continuación, se procederá a desarrollar cada uno de aspectos mencionados.

Envolvente y transmitancia térmica: La envolvente térmica de una edificación se refiere a todas aquellas barreras físicas entre el interior y exterior, que incluyen paredes, pisos, techos, ventanas y puertas. La envolvente provee aislamiento, protección del clima exterior y un medio de control de

transferencia de calor. Para el cumplimiento de este criterio se evaluará en función a la norma IRAM 11605 (IRAM 11605, 1996) la cual establece los niveles de confort higrotérmico recomendables en una vivienda, para las épocas de invierno y verano.

Eficiencia energética: Una vivienda residencial construida eficientemente puede reducir significativamente la cantidad de energía necesaria para mantener un confort higrotérmico deseado en el interior, traduciéndose en un menor consumo energético y reducción de los costos de energía a largo plazo. En general una vivienda residencial eficiente debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ventanas y puertas eficientes: contar con ventanas y puertas que permitan el ingreso de luz natural y ventilación controlada, pero que a su vez limiten la pérdida de calor y el ingreso de frio.
- Sellado Adecuado: contar con un sellado adecuado en todas las juntas y detalles constructivos para evitar fugas de aire y perdidas de calor.
- Orientación adecuada: contar con una adecuada orientación de la vivienda en relación con el sol, pudiendo así aprovechar al máximo la luz natural y la radiación solar.
- Ventilación natural: contar con una adecuada ventilación natural para permitir la circulación de aire fresco y reducir la acumulación de calor en verano.
- Iluminación eficiente: utilización de lámparas LED, sistemas de iluminación inteligentes, como sensores de movimiento y de luz natural, para evitar el uso consumo energético innecesario.
- Automatización del hogar: la automatización del hogar permite controlar el consumo de energía de diversos aparatos electrónicos, como la televisión y los electrodomésticos, mediante el uso de sensores y sistemas de control. Esto puede ayudar a reducir el consumo de energía de la vivienda.
- Electrodomésticos y sistemas de climatización: Se considerará la eficiencia energética de los equipos que consuman energía.

Energías renovables: Luego de realizar el análisis de la envolvente térmica se procede a determinar el aporte de energías renovables y consumos de energía primaria en la vivienda mediante norma IRAM 11900 (IRAM 11900, 2017). Con esta normativa se procede a medir los aportes de las distintas prestaciones energéticas: energía primaria para calefacción y refrigeración, agua caliente sanitaria (A.C.S), los consumos de energía de los sistemas y los equipos de calentamiento de agua existentes, tanto los convencionales como aquellos que utilizan colectores solares térmicos y aquellos sistemas híbridos. En lo que se refiere a la iluminación, el procedimiento descripto en la norma establece los requerimientos de energía primaria para las instalaciones de iluminación en viviendas, el cálculo de las horas necesarias de iluminación artificial y su correspondiente valor de eficiencia energética (Fenés, 2019).

3. Agua: Este criterio aborda una serie de aspectos interconectados que incluyen la eficiencia hídrica, el reciclado y reutilización del agua, la cosecha de lluvia y la gestión de excedentes hídricos. A continuación, se detallan los parámetros específicos dentro del criterio “agua” que se deben evaluar y cuantificar para determinar el nivel de sostenibilidad y eficiencia hídrica de las edificaciones sujetas al proceso de etiquetado ambiental edilicio.

   Eficiencia Hídrica: Para evaluar el concepto de eficiencia hídrica, se sebe evaluar si la vivienda posee equipamiento que tienda a reducir el consumo del agua por persona, como ser grifería de bajo flujo en la mayor parte de las instalaciones de la vivienda, sistemas de riego inteligentes, inodoros de bajo consumo, sistemas de recolección y reutilización de agua pluvial o grises, entre otros.

   Sistemas de reciclado y reúso de agua: Para cuantificar el sistema de reciclado y reusó de agua se evaluará la existencia de diferentes tipos de sistemas como ser: recolección y tratamiento de aguas

grises y de aguas negras. Es importante tener en cuenta que la implementación de sistemas de reciclado y reusó de agua residencial debe cumplir con el decreto 847/2016 de la provincia de Córdoba, así como también con el mantenimiento adecuado para garantizar la calidad y seguridad del agua tratada. Finalmente, es relevante aclarar que este tipo de sistemas se encuentran limitados por el espacio disponible en la residencia.

Cosecha de agua de lluvia: Para cuantificar de este concepto se analizará si la vivienda cuenta con sistemas de recepción y almacenamiento de agua de lluvia.

Manejo de excedentes hídricos: Para cuantificar de este concepto, se analizará la implementación de algunas de las siguientes técnicas:

- Medición y monitoreo del consumo de agua, mediante la instalación de dispositivos de medición para registrar el consumo de agua en el edificio y llevar un monitoreo regular para identificar patrones de consumo y posibles fugas.
- Paisajismo sostenible: mediante la implementación de técnicas que permitan reducir la necesidad de riego mediante el uso de flora nativa, sistemas de riego eficiente y almacenamiento y captación de agua de lluvia.

4. Materiales: Los materiales no sólo afectan la durabilidad y rendimiento de la edificación, sino que también tienen un impacto directo en el medio ambiente y en la salud de sus ocupantes. Para cuantificar y evaluar la sostenibilidad y calidad de los materiales utilizados en las construcciones residenciales se consideran las siguientes características:

   Propiedades físicas de los materiales de construcción: Las principales características a analizar son la transmitancia térmica analizado anteriormente en el apartado de "envolvente y transmitancia térmica" y aislamiento acústico de los materiales. En lo que respecta a las propiedades físicas de los materiales para con el aislamiento acústico se debe considerar (Casini, 2020):

   a) Para materiales aislantes a ruido aéreo:
      - Densidad: El aislamiento será proporcional a la densidad del material. Por lo tanto, se recomienda que los materiales aislantes tengan valores de densidad a partir de los 600kg/m^3.
      - Porosidad: La porosidad debe ser nula para evitar que el material absorba la energía acústica. Esta característica está relacionada con el coeficiente de absorción acústica. Se recomienda utilizar materiales con coeficientes cercanos al valor 0.

   b) Para materiales aislantes a ruido de impacto:
      - Rigidez dinámica: Está asociada al rango de frecuencias en las que el material es efectivo en la atenuación del ruido de impacto. Cuanto menor sea el valor de la rigidez dinámica, mayor será la atenuación del ruido de impacto. Se recomienda utilizar materiales con valores cercanos a 20 MN/m^3.
      - Espesor: Esto también tiene relación con el rango de frecuencias. Cuanto mayor sea el espesor del material menor será la frecuencia de resonancia del sistema y previsiblemente mayor será la atenuación al ruido de impacto.
      - Resistencia a la compresión: Indica la resistencia a la deformación o pérdida de espesor producida por una carga repartida de forma uniforme. Habitualmente el dato se toma para una deformación del 10%.

   c) Para materiales aislantes a ruido de vibraciones:
      - Rigidez dinámica: Tiene que ver con el rango de frecuencias en las que el material es efectivo en la atenuación de las vibraciones. En este caso se deben estudiar el tipo de vibraciones a las cuales se encuentra sometida una vivienda, como ser el caso de tránsito,

turismo, sectores industriales, etc. Para poder así determinar el tipo de material que atenué las vibraciones.
- Factor de perdidas: Es la capacidad de un material de disipar la energía mecánica. Valores óptimos están en 0.3.

5. Sitio: Evaluar el sitio de implementación de las construcciones residenciales es un componente fundamental en el proceso de etiquetado ambiental edilicio. Los parámetros a evaluar consideran aspectos que influyen directamente en la sostenibilidad, calidad de vida de los habitantes y la preservación del entorno natural y los mismos se describen a continuación:
   - Accesibilidad y conectividad: Se evaluará la facilidad de acceso al sitio, disponibilidad de transporte público, conexiones peatonales e integración con la infraestructura existente, como la conexión a redes de servicios públicos y la accesibilidad a centros de salud, educación, comercios, etc.
   - Usos de suelo: Se analizará la planificación y el uso del suelo, la densidad urbana, la mezcla de usos y la preservación de áreas verdes y espacios abiertos.
   - Eficiencia del transporte: Se considerará la disponibilidad de opciones de transporte sostenible, como ciclovías, estaciones de carga para vehículos eléctricos, estacionamientos para bicicletas y la promoción de desplazamientos no motorizados.
   - Calidad de Aire: Se evaluará la calidad del aire en la zona circundante al sitio, incluyendo la presencia de fuentes de contaminación, la ventilación natural y la implementación de medidas para mejorar la calidad del aire interior, para ello se recomienda utilizar de referencia la Resolución N°105/17: Política Ambiental. Aprueba los "Estándares de Aire de la Provincia de Córdoba".

6. Gestión Ambiental: Esta sección se enfoca en medir y cuantificar las prácticas y acciones implementadas durante la construcción y operación de un edificio, con el propósito de promover la sostenibilidad, la eficiencia y la reducción del impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. A continuación, se describen los parámetros y criterios que se utilizarán para cuantificar la gestión ambiental en el etiquetado ambiental edilicio:
   - Planificación y seguimiento del proyecto: Se evaluará si se ha desarrollado un plan de gestión ambiental durante la etapa de diseño y construcción del edificio.
   - Gestión de residuos: Se evaluará si se ha implementado un plan de gestión de residuos durante la construcción, la reducción de residuos generados y la valorización de residuos.
   - Mantenimiento y operación: Se evalúa si se cuenta con un plan de mantenimiento y operación adecuado del edificio, que incluya la inspección regular de equipos y sistemas, optimización de su rendimiento.
   - Monitoreo y seguimiento: Se evalúa si se han establecido sistemas de monitoreo y seguimiento del desempeño ambiental del edificio, que permitan identificar oportunidades de mejora y asegurar el cumplimiento de los criterios a certificar a lo largo del tiempo.

RESULTADOS

Funcionamiento del sistema

La bibliografía analizada indica que en la mayoría de los estándares y sistemas de certificación ambiental edilicia el proceso de certificación se realiza en una única etapa en la cual se consideran todos los parámetros sobre los cuales se basa el sistema y se asigna una certificación o etiqueta en función de los resultados, con la característica de ser sistemas de aplicación voluntaria. Para la implementación en la provincia de Córdoba, en caso de ser utilizado como recurso de gestión, se propone que este sistema de etiquetado debe ser de carácter obligatorio y con un proceso de implementación en dos etapas, la primera etapa, obligatoria, consistirá en realizar el estudio energético y de sustentabilidad de la vivienda, considerando todos los criterios descriptos anteriormente. En base a este estudio, se asigna una clasificación alfabética, que indicará

el grado de sustentabilidad y de eficiencia energética de la vivienda. En caso de ser necesario se propondrá un proceso de mejoras a la vivienda para que pueda aumentar esta clasificación. En una segunda etapa, después de 5 años, se ofrece la posibilidad de realizar una reevaluación de manera voluntaria. El objetivo de esta reevaluación es mejorar la clasificación obtenida en la primera etapa del proceso de evaluación de la etiqueta ambiental edilicia. Esto se logra mediante la evaluación de las mejoras implementadas según las recomendaciones realizadas en la etapa inicial, junto con un nuevo estudio completo de toda la vivienda. Con esta estructura de certificación en dos etapas, se busca fomentar la mejora continua y progresiva de la eficiencia y sustentabilidad de las construcciones residenciales en la provincia de Córdoba.

Escala de clasificación

Para el desarrollo de la etiqueta de la certificación edilicia se establece un sistema de calificación que indique el nivel de eficiencia energética, así como también el grado de sostenibilidad ambiental del edificio. El sistema de clasificación posee 8 categorías, siendo A+ la máxima y G la mínima ver Tabla 3. Esta escala es utilizada normalmente por las Normas IRAM, como ser IRAM 62410:2012 (para calentador de agua eléctrico de acumulación), IRAM 62411:2012 (para televisores), IRAM 62406:2019 (para acondicionadores de aire), entre otras. También esta escala de clasificación es utilizada en la provincia Santa Fe en la ley provincial N°13903 de Etiquetado de Eficiencia Energética de inmuebles destinados a viviendas. Finalmente, el resto de los sistemas de certificación y estándares nacionales e internacionales utilizan un sistema de puntuación que otorga distintos tipos de certificaciones en función al valor alcanzado, como ser BREEM, LEED, entre otros. Las escalas de puntuación asignadas en estos sistemas de certificación edilicia fueron tomadas en cuenta para la elaboración de la escala de clasificación para el sistema de etiquetado ambiental edilicio de la provincia de Córdoba.

Tabla 3: Escala de clasificación. Elaboración propia en base a sistemas de puntuación utilizados en Certificación LEED, BREEAM, WELL Boulding Standard

A+	+ 781 puntos
A	671 a 780 puntos
B	501 a 670 puntos
C	321 a 500 puntos
D	211 a 320 puntos
E	121 a 210 puntos
F	61 a 120 puntos
G	0 a 60 puntos

Ponderación de criterios

Los criterios de sustentabilidad descriptos anteriormente tendrán distinto peso a la hora de realizar la certificación. En función al análisis de los distintos sistemas de certificación analizados se propone la siguiente ponderación (ver *Tabla 4*), la cual está relacionada con la importancia e influencia que tiene cada uno de estos criterios sobre la sustentabilidad y eficiencia energética que puede alcanzar una vivienda.

Tabla 4: Ponderación de criterios. Elaboración propia teniendo en cuenta certificaciones LEED, BREEAM y WELL Building Standard.

CRITERIOS	PONDERACIÓN
Energía	35%
Calidad Ambiental	25%
Agua	13%
Sitio	10%
Materiales	10%
Gestión Ambiental	7%
Total	100%

Instrumentos de valoración

Para valorar cada criterio de sustentabilidad, se ha establecido una escala numérica compuesta por 5 niveles diferentes, los cuales reflejarán el grado de incidencia de cada valor. Estos niveles se definen en un rango del 0 al 100, representando porcentajes de incidencia del criterio correspondiente (Romano et al., 2018). La escala de puntuaciones será la siguiente:

- 0% (cero), considerado como nulo, indicando que el edificio no presenta o no tiene en cuenta el indicador mencionado.
- 25% (veinticinco), representando un nivel bajo de incidencia del criterio.
- 50% (cincuenta), denotando un valor medio de incidencia del criterio.
- 75% (setenta y cinco), señalando un valor medio-alto de incidencia del criterio.
- 100% (cien), el valor más alto, representando la aplicación total del criterio o indicador de sustentabilidad.

Posteriormente, para cada criterio ambiental analizado y valorado, se aplicará la ponderación correspondiente según el peso ambiental asignado. Finalmente, la suma total de los valores asignados indicará la etiqueta ambiental que recibirá la vivienda evaluada.

Planilla de calculo

La planilla de cálculo será la herramienta principal para la evaluación de la vivienda y otorgará una certificación correspondiente. La evaluación se debe realizar por un profesional autorizado que figure en el listado de expertos calificados, en línea con lo realizado en los sistemas internaciones analizados. Los métodos de cálculo propuestos en esta planilla se basan en normas y estándares previamente certificados. Además, se incluyen parámetros cualitativos que deben ser considerados en el diseño de la vivienda. Estos parámetros se basan en las indicaciones detalladas anteriormente lo que garantiza que las pautas de medición y evaluación se encuentren debidamente estandarizadas y reconocidas.

El resultado final de la evaluación se traduce en dos valores clave: en primer lugar, se determina el nivel de eficiencia energética y sustentabilidad de la vivienda real, lo cual refleja el desempeño actual de la vivienda. Por otro lado, se calcula un nivel de eficiencia energética y sustentabilidad alcanzable (definido como "oportunidad de mejora" en la planilla de cálculo y "alcanzable" en la etiqueta ambiental edilicia). El mismo representa el potencial de mejora de la vivienda a través de la implementación de medidas específicas. En la Figura 1 se presenta la planilla de cálculo, con ejemplo de aplicación con un ejemplo de aplicación.

Etiqueta ambiental edilicia

En este apartado se presenta la etiqueta en cuestión que determina el grado de eficiencia energética y sustentabilidad de la vivienda. Como puede observarse en *Figura 2*, en los datos del edificio se debe colocar la tipología de vivienda a certificar (departamento, hogar, dúplex, edificio, etc.), dirección, fecha de primer certificación y fecha de segunda certificación (esta se establece 5 años después de emitida la certificación de la primera etapa), referencia catastral del inmueble y el profesional habilitado para realizar la certificación

correspondiente. Por otra parte, la etiqueta muestra el valor real alcanzado en la primera etapa de certificación y el valor alcanzable en la segunda etapa de implementación.

DATOS DEL EDIFICIO																			
TIPO DE VIVENDA			FOTO DE LA FACHADA												FOTO TERMICA DE LA FACHADA				
DIRECCIÓN																			
FECHA DE CERTIFICACIÓN																			
REFERENCIA CATASTRAL																			
PROFESIONAL INTERVINIENTE																			
OBSERVACIONES																			
CRITERIO DE SUSTENTABILIDAD	VARIABLES A ANALIZAR		PUNTAJE REAL									OPORTUNIDAD DE MEJORA					PONDERACIÓN DE CRITERIOS	PUNTAJE PONDERADO	
			100	75	50	25	0					100	75	50	25	0		REAL	OP. DE MEJORA
CALIDAD AMBIENTAL	Confort termico	Orientación de vivienda	X														35%	35	
		Colores de paredes exteriores y techos		X														26,25	
		Diseño con ventilación cruzada		X														26,25	
		Protecciones solares				X							X					8,75	26,25
	Iluminación natural	Orientaciones recomendadas en IRAM 11306	X															35	
	Calidad de aire interior	Localización y tamaño de averturas			X													17,5	
		Uso de sistemas de ventilación mecanicos			X													17,5	
ENERGÍA	Transmitancia y envolvente térmica	Confort higrotermico				X											25%	6,25	
	Eficiencia energética	Eficiencia energetica pasiva	X															25	
		iluminación eficiente		X														18,75	
		climatización eficiente	X															25	
		automatización del hogar	X															25	
	Energias renovavles	Indice de prestaciones energeticas			X													12,5	
AGUA	Eficiencia Hidrica	Equipamiento para reducción de consumo			X												13%	6,5	
	Reciclado y reuso de agua	Sistemas de recolección y reuso de aguas grises		X														9,75	
	Cosecha de agua de lluvia		X															13	
	Manejo de excedentes hidricos	Medición y monitoreo del uso de agua					X					X						0	35
		Paisajismo sostenible (reducción de necesidad de riego en un 50%)			X							X						6,5	35
MATERIALES	Materiales de alta resistencia termica					X											10%	2,5	
	Aislamiento acustico					X												2,5	
	Eficienciay sustentabilidad de los materiales					X												2,5	
	Reciclabilidad y reacondicionamiento			X														7,5	
	Reacondicionamiento energetico de viviendas						X						X					0	26,25
SITIO	Accesibilidad y conectividad	Proximidad a equipamientos y servicios publicos (comerciales, de salud, educativos) a 1km a la redonda	X														10%	10	
	Usos de suelo	planificación y usos		X														7,5	
	Eficiencia del transporte	Proximidad a servicios de trasnporte publico (menor a 400 metros)	X															10	
	Calidad de aire					x												2,5	
	Impacto ambiental	EIA aprobado del loteo, en caso de corresponder				X												2,5	
GESTIÓN AMBIENTAL	Planificación y seguimiento del proyecto					X											7%	1,75	
	Eficiencia energética con mejora continua					X												1,75	
	Gestión de residuos				X							X						3,5	35
	Mantenimiento y operación del edificio			X														5,25	
	Monitoreo y funcionamiento del edificio			X														5,25	
SUMATORIA TOTAL																		379,5	518,25
ETIQUETA ENERGETICA																		C	B

Figura 1: Ejemplo de planilla de cálculo con etiquetado real nivel C y mejorable nivel B. Elaboración propia.



Figura 2: Etiqueta Ambiental Edilicia. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En un contexto global de aumento de las temperaturas, eventos climáticos extremos y pérdida de la biodiversidad, la construcción sostenible se posiciona como una herramienta vital para afrontar estos desafíos a nivel local y así contribuir a la lucha contra el cambio climático. En este trabajo se analizan distintos sistemas de certificación edilicia existentes, así como también normativas técnicas nacionales e internacionales para desarrollar un sistema de etiquetado ambiental edilicio robusto y que abarque aspectos energéticos y ambientales en torno al sector residencial en la provincia de Córdoba. Este estudio aborda la crisis climática y destaca la importancia de la transición energética a través de las construcciones sostenibles y eficientes energéticamente.

En lo que respecta a la etiqueta ambiental, es esencial comprender que la sustentabilidad no se limita únicamente a la obtención de una categoría de etiquetado alta. Incluso una edificación con una clasificación baja es sustentable y la misma tiene potencial de convertirse en un proyecto de mayor sustentabilidad si se toman medidas adecuadas para mejorar su desempeño. Esto es así porque se establece una base para la mejora continua, y, al mismo tiempo, puede estar cumpliendo ciertos criterios mínimos de sustentabilidad. Por esto, el proceso de etiquetado ambiental edilicio proporciona un marco estructurado para evaluar el desempeño ambiental y la eficiencia energética de un edificio, al identificar las áreas en las que se puede mejorar, se abre la puerta a la implementación de medidas que promuevan la sustentabilidad en diferentes aspectos, como la calidad ambiental, el uso eficiente de la energía, manejo de agua y gestión de residuos.

En cuanto a la etiqueta ambiental, es fundamental entender que la sustentabilidad no se limita únicamente a la obtención de una categoría de etiquetado alta. Incluso una edificación con una clasificación baja es sustentable, por el hecho de cumplir con criterios mínimos de eficiencia energética o sustentabilidad y por la posibilidad de aumentar su clasificación mediante la implementación de medidas adecuadas que mejoren su rendimiento. Por lo tanto, el proceso de etiquetado ambiental edilicio ofrece un marco estructurado que no solo evalúa el desempeño ambiental y la eficiencia energética de un edificio, sino que también facilita la identificación de áreas de mejora. Esto, a su vez, abre la puerta a la adopción de medidas que fomenten la sustentabilidad en aspectos clave como la calidad ambiental, el uso eficiente de la energía, la gestión del agua y la administración de residuos.

Este tipo de sistemas ofrece a los propietarios, inversionistas y usuarios de las viviendas una herramienta confiable para evaluar y comparar el desempeño ambiental, fomentando adopción de prácticas constructivas y de gestión más sostenibles. Además, al proporcionar una base común para la evaluación, el sistema de etiquetado también facilita la comunicación y colaboración entre los diferentes actores del sector de la construcción impulsando la innovación en tecnologías y procesos sostenibles. Aunque este trabajo fue pensado para su aplicación en la provincia de Córdoba, el mismo puede ser replicado en otras provincias de Argentina considerando las características climáticas específicas, de acuerdo a las zonas descriptas en la norma IRAM 11603.

REFERENCIAS

ANSI/ASHRAE. (2007). *Standar 62.1 - Ventilation for Acceptable Indor Quality.*

Argentina Green Building Council. (2023). Obtenido de Argentina Green Building Council: https://www.argentinagbc.org.ar/leed/leed-v3/

Bioconstrucción. (2023). Obtenido de https://bioconstruccion.com.mx/certificacion-edge/

BREEAM. (2024). *How BREEAM Works*. Recuperado el 2024, de BREEAM: https://breeam.com/about/how-breeam-works/

CAMMESA. (2023). *Mercado Eléctrico Mayorista, Informe Anual 2023.* Obtenido de https://microfe.cammesa.com/static-content/CammesaWeb/download-manager-files/Informe%20Anual/2024/Informe%20Anual%202023.pdf

Casini, M. (2020). *Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. Encyclopedia of renewable and sustainable materials.*

ENERGAS. (2022). *Informe Anual 2022.* Obtenido de https://www.enargas.gov.ar/secciones/publicaciones/informes-anuales-de-balance-y-gestion/pdf/anuales/2022/informe-anual-2022.pdf

Fenés, G. (2019). Qué cambios introduce en la utilización de energías renovables y eficiencia energética la Norma IRAM 11900. *Energía Estratégica*.

Fermín, F., & García, P. (2017). *Estudio del estándar Passivhaus, aplicación y comparativa con el CTE.* Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/69349/1/ESTUDIO_DEL_ESTANDAR_PASSIVHAUS_APLICACION_Y__Prieto_Garcia_Francisco_Fermin.pdf

IRAM 11603. (2012). *Acondicionamiento Termico en Edicios. Clasificación Bioambiental de la Republica Argentina.*

IRAM 11605. (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos.*

IRAM 11900. (2009). *Etiqueta de eficiencia energética de calefacción para edificios. Clasificación según la transmitancia térmica de la envolvente.*

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.*

Ponce de León Saavedra, Á. G. (2023). *Cálculo de Iluminación Natural en Edificaciones.* Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Perú. Obtenido de https://proyectoceela.com/wp-content/uploads/2023/07/Calculo-de-Iluminacion-Natural-en-Edificaciones.pdf

Reyna, S. M., & Jualia, M. S. (2020). *Proyecto de Ley Etiquetado Ambiental Edilicio.* Córdoba.

Romano Pamies, C., Alías Herminia, M., & Jacobo, G. J. (2018). *Lineamientos e indicadores para la valoración de la sustentabilidad edilicia, de factible incorporación a las normativas de edificación vigentes en Resistencia y Corrientes.* .

Simancas Yovane, K. (2003). *Reacondicionamiento bioclimatico de viviendas de segunda residencia en clima mediterraneo.* Universitat Politècnica de Catalunya.

DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTAL LABELLING SYSTEM FOR BUILDINGS TO MEET SUSTAINABILITY GOALS IN CORDOBA PROVINCE

ABSTRACT: The current context drives the search for actions to mitigate the crisis associated with climate change, where building environmental labeling positions itself as a highly relevant tool to reduce greenhouse gas emissions associated with the residential sector by promoting sustainable construction practices and assessing the energy consumption of homes. This work proposes the basic guidelines for the development of a building environmental labeling system in the province of Córdoba. The methodology employed is based on the study of legal regulations, standards, and existing environmental certification systems to develop sustainability criteria that will form the structure of this system and serve as the basis for the evaluation and environmental classification of the assessed housing. The main result is the design of a building environmental labeling system that includes clear guidelines for its implementation and the structure of the label to be awarded. This system offers a reliable tool to promote sustainable construction, providing homeowners and investors with a trustworthy foundation to evaluate and compare different construction proposals.

Key words: Environmental certification, energy efficiency, sustainable architecture.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 57-68, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

VALORACIÓN ECONÓMICA DE LOS EFECTOS DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN: ESTADO DEL ARTE

Paris, Melisa[1]; Farreras, Verónica.I.[23]; Correa, Érica N[134]

[1] INAHE – CONICET - CCT MENDOZA - Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín. Mendoza, Argentina. CP 5500 - Tel: 54-261-5244310

[2] IANIGLA - CONICET – CCT - MENDOZA - Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín. Mendoza, Argentina. CP 5500 - Tel: +54 261 5244200

[3] Universidad Nacional de Cuyo - Centro Universitario Parque General San Martin, Mendoza, Argentina. CP 5500 - Teléfono: +54261 4135000

[4] Universidad Tecnológica Nacional – FRM – Rodríguez 273, Mendoza, Argentina. CP: 5500

E-mail: mparis@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: Las islas de calor urbano generan impactos en los ecosistemas que afectan el bienestar de los individuos y las posibilidades de crecimiento de una sociedad. Este trabajo busca conocer qué es lo que se valoró en la literatura internacional en relación a este tema, cómo se abordó y cuáles son las principales preocupaciones por continente. Para esto, se hizo una revisión de la literatura y fue clasificada según los trabajos valoren las islas de calor urbano, las estrategias de mitigación o los impactos sobre servicios ecosistémicos. Los resultados muestran que no es homogéneo el grado de evolución de la investigación en los diferentes continentes y que las metodologías utilizadas varían según la ubicación geográfica. Además, se observa un cambio en los servicios ecosistémicos valorados, comenzando por el servicio de regulación, cambiando paulatinamente hacia los servicios culturales y de soporte, haciendo necesaria la incorporación de metodologías que no utilicen precios de mercado. Se observa además, que mientras que en Argentina si bien hay trabajos para desarrollar estrategias de mitigación, no se encontraron trabajos de valoración económica.

Palabras claves: Islas de calor urbano, valoración económica, estrategias de mitigación, revisión literatura

INTRODUCCIÓN

Las islas de calor urbana (UHI, por sus siglas en inglés) en las ciudades se originan principalmente por el avance del espacio urbano-edilicio que modifica las características del sitio de implantación de las ciudades, impactando negativamente sobre el microclima local (Zhao et al., 2017). En presencia de este fenómeno las ciudades suelen ser más cálidas que el medio rural que las rodea, generando efectos adversos que pueden afectar la calidad ambiental de las ciudades y el bienestar de sus habitantes. El microclima urbano juega un rol importante en el consumo energético de los edificios, la sensación de confort térmico y habitabilidad de los espacios exteriores, la contaminación del aire, la salud y la calidad de vida del habitante urbano. Las ciudades deben tender a una planificación y rehabilitación del espacio urbano-edilicio que incorpore estrategias eficientes que contribuyan a mitigar los efectos de la UHI. Durante los últimos años, se ha llevado a cabo una intensa actividad de investigación para desarrollar, probar e implementar estrategias para mitigar la UHI (Zinzi et al., 2012; Correa et al., 2012; La incorporación de estrategias para un diseño adecuado, techos verdes y materiales permeables permite la disminución del calor, al igual que la forestación urbana que, además produce sombra y

facilita los procesos de enfriamiento convectivos y radiativos. (Zinzi et al, 2012). Estas estrategias pueden impactar en la calidad ambiental de las ciudades y bienestar de sus habitantes a través del descenso de la temperatura, ahorro energético, disminución de la contaminación atmosférica, reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mejora del confort térmico y salud humana, entre otros beneficios. ¿Pero qué es más importante para las personas, tener ahorro energético, que aumente la cantidad o especies en su entorno urbano o que se reduzcan las emisiones de GEI? ¿Preferirían una disminución de la contaminación sonora o del aire? Para resolver estas y otras inquietudes ambientales es necesario identificar primero los servicios ecosistémicos (SSEE) afectados, siendo estos, los procesos a través de los cuales los ecosistemas sostienen y satisfacen la vida humana y directa o indirectamente mantienen calidad de vida (Costanza et al., 1997).

Existen diversos marcos conceptuales con diferentes clasificaciones de los SSEE, pero en este trabajo se sigue la clasificación sugerida por la iniciativa conocida como 'La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad'(TEEB), que clasifica los SSEE según sean de abastecimiento, regulación, culturales o de hábitat. Esto facilita la identificación de los individuos o grupo de personas afectados por algún tipo de variación en la cantidad o en la calidad de un bien o servicio ambiental determinado. A partir de esto, es posible estimar su Valor Económico Total (VET), entendiéndose como tal a la sumatoria del valor de uso y de no uso de los bienes y servicios eco-sistémicos. El valor de uso puede ser directo, indirecto o de opción, y el de no uso, de existencia o herencia. Muchos de estos servicios ecosistémicos carecen de un mercado donde observar sus precios, dificultando para los responsables en la formulación de políticas ambientales, su inclusión en los procesos de toma de decisiones La economía ha desarrollado un conjunto de métodos de valoración que permiten inferir en términos monetarios el valor que tienen para la sociedad estos servicios (Azqueta et al., 2007). Suelen agruparse en dos grandes categorías: los métodos de preferencias reveladas y los métodos de preferencias declaradas. Los de preferencias reveladas, se basan en la observación de mercados de algún bien relacionado en el que los individuos a través de sus decisiones revelan sus preferencias, aunque el mercado no sea el del bien a valorar (Freeman, 2003) y los principales métodos son el de precios hedónicos y el del costo de viaje. Por otro lado, los métodos de preferencias declaradas, simulan mercados hipotéticos en los que los individuos expresan sus preferencias mediante la utilización de cuestionarios. Suponiendo que el bienestar de las personas se origina a través de la satisfacción de sus preferencias, la medida de bienestar puede expresarse mediante la disposición a pagar o la disposición a ser compensado ante un cambio en el estado inicial; dentro de este grupo, están el Método de Valoración Contingente (MVC) y los Métodos de Experimentos de Elección (ME).

Conocer el valor de los servicios ecosistémicos permite a los tomadores de decisiones en materia ambiental, contar con herramientas para implementar políticas de mitigación de la UHI y maximizar la percepción de bienestar de las personas afectadas. El objetivo de este trabajo es conocer el estado del arte en materia de valoración económica de islas de calor urbano o de políticas tendientes a su mitigación e identificar las metodologías utilizadas

METODOLOGÍA

Para realizar la revisión de la literatura se consultó Google Scholar, utilizando principalmente los términos "Isla de calor urbana", "valoración", "políticas de mitigación" e "impacto ambiental". A partir de esto, se seleccionaron 52 trabajos empíricos que fueron sistematizados según el objeto de estudio sea la valoración de los efectos de la isla de calor urbana (a), de estrategias de mitigación de la UHI (b) o de los impactos en los servicios ecosistémicos a partir de las estrategias de mitigación (c) distinguiendo además, la estrategia analizada, ubicación geográfica y temporal, metodología utilizada y los atributos y/o servicios ecosistémicos afectados.

RESULTADOS

Las UHI y la valoración monetaria el mundo. Antecedentes

A nivel internacional existen diversos estudios que buscan estimar monetariamente aspectos relacionados con las UHI, ambientales y no ambientales. En la Tabla 1, se presentan los trabajos encontrados, agrupados según el objeto de estudio.

Tabla 1.a. Literatura relevada. Valoración de los efectos de la UHI

Autor	País	Objetivo	Metodología	Atributos
Costa et al. (2016)	España, Bélgica y Reino Unido	Calcular los costos de la UHI	PPE	Productividad laboral
Estrada et al. (2024)	Estados Unidos, China, India, Rusia	Cuantificar los efectos, interacciones y políticas climáticas globales y locales	MCE	Costo Social del Carbono
Huang et al. (2023)	Diferentes AM	Estimar el valor monetario de las muertes relacionadas con la temperatura por las UHI	VSL	Mortalidad
Jones et al. (2024)	Reino Unido	Calcular los costos de la UHI	PPE	Productividad laboral
Lin et al. (2022)	China	Calcular el valor marginal de la UHI	MPH	Impacto en el precio de las viviendas
Miner et al. (2016)	Estados Unidos	Calcular los costos de la UHI	MCI	Gastos de funcionamiento y mantenimiento de los A.A
Monbouquette et al. (2012)	Estados Unidos	Calcular los costos de la UHI	MCI	Consumo energético
Roxon et al. (2020)	Estados Unidos	Calcular los costos de la UHI	MCE	Costos de energía eléctrica
Souza et al. (2009)	Brasil	Calcular los costos de la UHI	MCI	Consumo energético
Van Raalte (2012)	Australia	Proporcionar una evaluación económica de los impactos de las olas de calor y el efecto de UHI	MCI	Mortalidad, salud, consumo energético, consumo de agua

A.A: Aire acondicionado; MCE: Método de costos evitados: MCI: Método de costos incurridos; MPH: Método de precios hedónicos; PPE: Productividad perdida evitada; VSL: Valor estadístico de una vida; Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.b. Literatura relevada. Continuación (Valoración estrategias de mitigación)

Autor	País	Estrategia	Metodología
Atherton et al. (2021)	Estados Unidos	Techos verdes	MCE
Bizuneh, T. F (2021)	Etiopia	Espacios verdes urbanos	MVC
Chan et al. (2013)	China	Techos verdes	MCI
Donovan et al. (2009)	Estados Unidos	Arbolado urbano	MPH
Estrada et al (2017)	Diferentes AM	Techos y pavimentos fríos	MCE
Fruth et al. (2019)	Alemania	Muros verdes	MED
Hasan et al. (2023)	Bangladesh	Materiales	MCE
Ji et al. (2022)	Corea del Sur	Techos verdes	MVC
Kim et al. (2016)	Corea	Arbolado urbano	MED
Latinopoulos (2016)	Grecia	Parques	MVC
Mell et al. (2013)	Estados Unidos	Infraestructura verde	MVC
Shickman et al. (2020)	Estados Unidos	Arbolado urbano y techos verdes	MCE
Tong et al. (2017)	Singapur	Techos verdes	MCI
William et al. (2016)	Estados Unidos	Techos fríos	MCI
Wong et al. (2003)	Singapur	Techos verdes	MCE y MCI
Zhang et al. (2019)	China	Techos verdes	MVC

MCE: Método de costos evitados; MCI: Método de costos incurridos; PPE: Productividad perdida evitada; MPH: Método de precios hedónicos; MVC: Método de valoración contingente; MED: Método de elección discreta. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.c. Literatura relevada. Continuación (Valoración SSEE)

Autor	País	Metodología	SSEE
Akbari (2005)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Akbari et al. (1990)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Akbari et al. (2001)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Arce Correa (2023)	Colombia	MED	Regulación
Azis et al. (2021)	Malasia	MCE	Regulación
Bianchini et al. (2012)	Sin especificar	MTV	Regulación, culturales, soporte
Borzino et al. (2020)	Singapur	MVC	Regulación
Capotorti et al. (2019)	Italia	MCE	Regulación
Carter et al. (2008)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Chau et al. (2010)	China	MED	Regulación, culturales
Clark et al. (2008)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Collins et al. (2017)	Reino Unido	MED	No es un SSEE, sino que provee diversos SSEE
Feng (2018)	Diferentes AM	MTV	Regulación, culturales
Hui et al. (2022)	China	MED	Regulación, culturales, soporte
Jim et al. (2022)	China	MED	Regulación, culturales, soporte
Johnson et al. (2021)	Austria	MCE	Regulación, culturales, hábitat
Johnson et al. (2022)	Alemania	MED	Regulación, culturales
Lo et al. (2010)	China	MVC	Culturales
Netusil et al. (2022)	Estados Unidos	MED	Regulación, soporte
Peng et al. (2015)	China	MCI	Regulación
Perini et al. (2013)	Sin especificar	MCE	Soporte, regulación, culturales
Pomerantz (2017)	Estados Unidos	MCE	Regulación
Sinha et al. (2021)	Diferentes AM	MPH y MED	Regulación
Van Oijstaeijen et al (2022)	Alemania	MED	Regulación, culturales
Veinstein et al. (2012)	Diferentes AM del mundo	MPH	Regulación, culturales
Whiteoak et al. (2019)	Australia	MTV y MCE	Soporte

AM: Áreas Metropolitanas; MCE: Método de costos evitados; MCI: Método de costos incurridos; MED: Método de elección discreta; MPH: Método de precios hedónicos; MVC: Método de valoración contingente; PPE: Productividad perdida evitada; Fuente: Elaboración propia.

Distribución geográfica

En la Figura 1 se muestra para cada línea de investigaciones el grado de desarrollo por continente: en la Figura 1.a se pueden ver los estudios que valoran las UHI, mientras que en las figuras 1.b y 1.c se muestran respectivamente los trabajos que valoran las estrategias de mitigación de la UHI, pero que no especifican los SSEE afectados y los que valoran la percepción sobre el cambio en el bienestar de los individuos por cambios en los SSEE producto de las políticas de mitigación. Finalmente, en la Figura 1.d se presentan todos los estudios independientemente del enfoque de análisis.



a) Valoración de los efectos de la isla de calor urbana



b) Valoración estrategias de mitigación de la UHI



c) Valoración de los impactos en los SSEE a partir de las estrategias de mitigación



d) Trabajos de valoración

Figura1. Distribución de los trabajos por línea de investigación.

Si bien son pocos los trabajos que abordan temas relacionados a la valoración de las UHI, en el caso particular de cuánto las UHI afectan el bienestar de las personas, el continente con mayor cantidad de trabajos es Norte América (4), seguido por Asia y Europa, ambos con 2 trabajos. Completan el ranking de publicaciones Latino América y Oceanía con 1 publicación cada uno, no habiéndose encontrado trabajos para África (Figura 1.a).

Respecto a la valoración de estrategias de mitigación de la UHI, Asia con 6 trabajos encabeza el estudio, seguido por América del Norte (5), Europa (2) y África (1). De acuerdo a la bibliografía que pudo relevarse, en Oceanía y América Latina no hay estudios que estimen el cambio en la percepción de bienestar de las personas producto de políticas de mitigación de la UHI (Figura 1.b).

En todos los continentes, a excepción de África y Oceanía se realizaron estudios para estimar los cambios en la percepción de bienestar de las personas por los efectos de las políticas de mitigación de la UHI sobre los SSEE. Los autores asiáticos lideran este abordaje, analizando principalmente el impacto de los techos verdes. En Europa y América del Norte, también se hay un desarrollo de esta línea de investigación. Finalmente, América del Norte y Asia encabezan el análisis general de la preocupación por los efectos de la UHI y las alternativas de mitigación, sobre el bienestar humano (Figura 1.c). Al agregar toda la literatura relevada, los continentes con mayor cantidad de estudio son América del Norte y Asia, con 15 y 16 artículos respectivamente (Figura 1.d).

III.3) Distribución temporal

En la Figura 2 se muestra cómo evolucionó el enfoque de análisis de la valoración de las UHI (1), las estrategias de mitigación (2) y los SSEE (3).

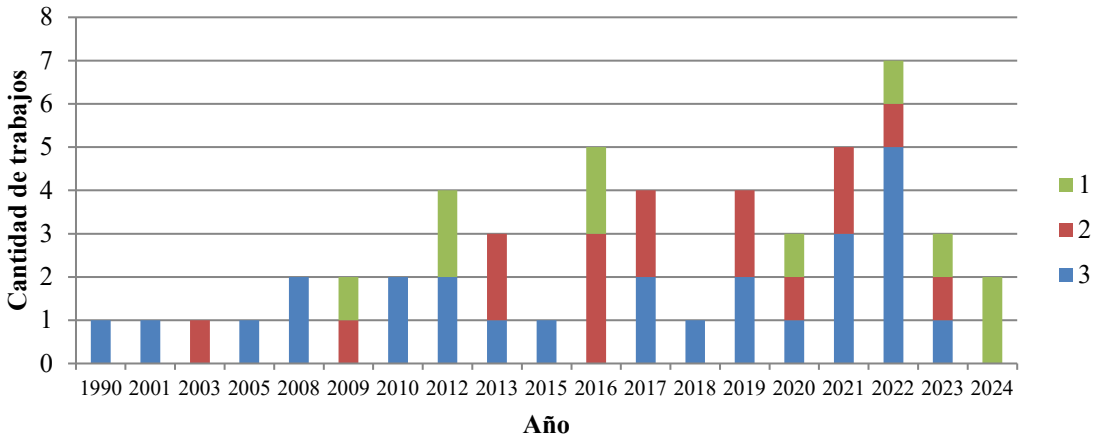


Figura 2: Evolución del estado de arte.
1: Valoración de las UHI; 2: valoración de las estrategias de mitigación; 3: valoración de los SSEE.
Fuente: Elaboración propia

Se observa que hasta el año 2010 se valoró principalmente la percepción de los cambios en el bienestar de los individuos por cambios en la calidad o cantidad de los SSEE, a excepción de algunos trabajos que abordaron los impactos de la UHI o de las estrategias de mitigación. A partir de ahí, empezó a encontrarse una mayor variabilidad en el enfoque de análisis. Luego, en la Figura 3 se observa cómo cambió el foco de análisis de los servicios eco-sistémicos.

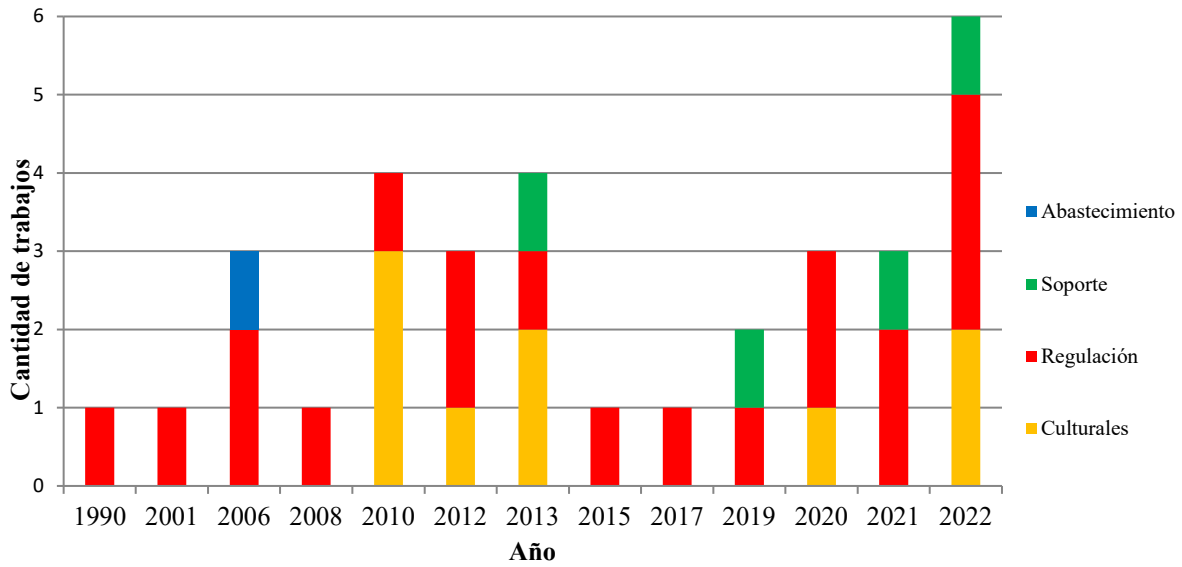
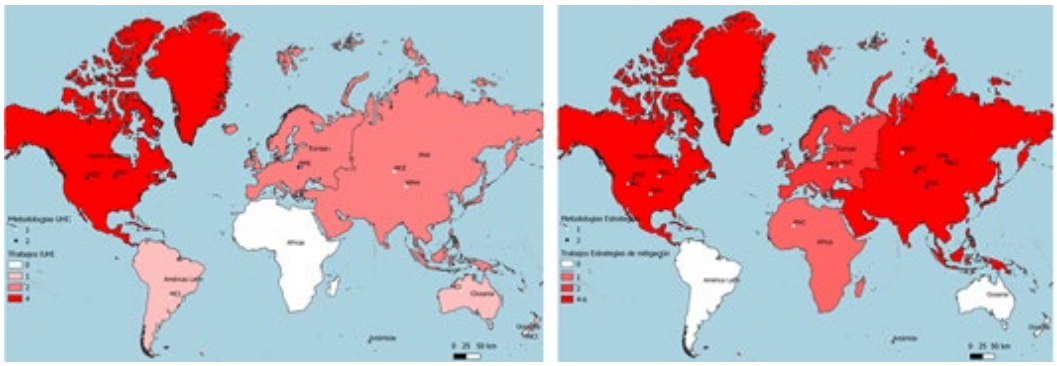


Figura 3. Servicios ecosistémicos analizados. Fuente: Elaboración propia

Al principio se valoró el servicio eco-sistémico de regulación y abastecimiento, luego, en el año 2010, en consonancia con la flexibilidad que fue adquiriendo el análisis de las UHI, comenzó a ganar importancia el servicio cultural y finalmente, en el año 2013 se encontró el primer trabajo en valorar el SSEE de soporte en el ámbito de las UHI.

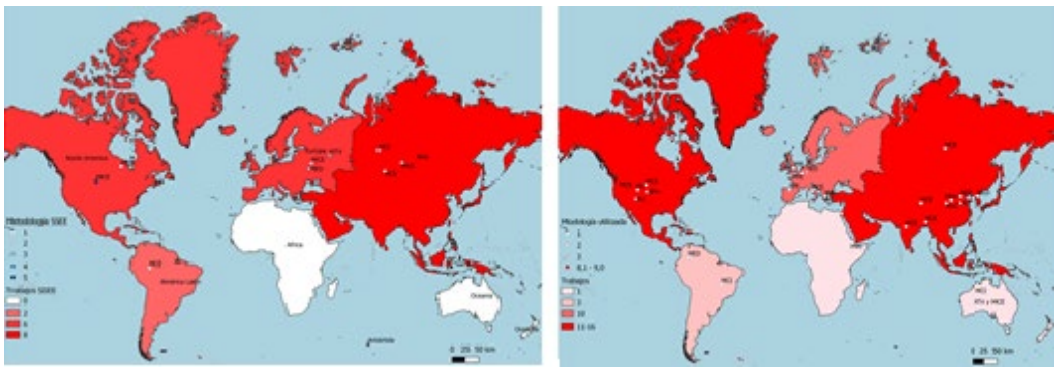
III.4) Metodologías utilizadas

Las metodologías de valoración, fueron clasificadas en función a la línea de investigación seguida. La Figura 4 muestra por continente y abordaje de análisis las metodologías de valoración utilizadas: a) los impactos de las UHI, b) las estrategias de mitigación, c) y d) los impactos sobre los SSEE (c). Por último, se muestran las metodologías aplicadas en términos generales (c).



a) Metodologías utilizadas para valorar para valorarlas estrategias de mitigación de las UHI.

b) Metodologías utilizadas las UHI.



c) Metodologías utilizadas para valorar los SSEE

d) Metodologías utilizadas en el estudio global

Figura 4. Metodologías utilizadas por línea de investigación. Fuente: Elaboración propia

Los autores que analizaron cómo las UHI afectan la percepción de bienestar de los individuos, utilizaron principalmente el MCI, para calcular el aumento del costo del consumo eléctrico por el mayor consumo de aire acondicionado que implica. Además, fue analizado el valor marginal de la UHI, estimando su efecto sobre el precio de las viviendas, aplicando el MPH. Otros autores, estimaron el valor monetario de las muertes relacionadas con la UHI, mediante el Valor Estadístico de una Vida, que representa la cantidad monetaria que se debe pagar a las personas para que acepten riesgos adicionales en sus vidas.

Las políticas de mitigación se valoraron también principalmente con precios de mercado, calculando los costos evitados (MCE) e incurridos (MCI), pero también metodologías de no mercado, realizando experimentos de elección (particularmente MED) y valoraciones contingentes (MVC). Finalmente, los servicios ecosistémicos se valoraron en su mayoría con herramientas que no utilizan precios de mercado, mediante la simulación de mercados hipotéticos (EE y MVC) y la transferencia de resultados provenientes de otros estudios (MTV). Finalmente, en términos agregados, las metodologías con mayor aplicación fueron el MCE (16), de MED (10) y MVC (8), Figura 4.d.

III.5) Aspectos analizados

El objeto de estudio fue clasificado según las líneas de investigación identificadas. En la Figura 5 se muestran diferentes nubes de palabras que permiten identificar los términos más nombrados cuando se valoraron: a) los impactos de las UHI, b) las estrategias de mitigación, y c) los impactos sobre los SSEE (c). Por último, se muestran las palabras claves del abordaje global de la valoración económica de UHI y de las políticas tendientes a su mitigación.



a) *Palabras clave "Valoración UHI"*



b) *Palabras clave "Valoración de las estrategias de mitigación de las UHI*



c) *Palabras clave "Valoración SSEE"*



d) *Palabras clave "Valoración global"*

Figura 5. Tópicos analizados por línea de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Se observa en el panel (a), que la valoración de las UHI se centró principalmente en los cambios en el consumo energético, la productividad laboral y la mortalidad, aunque también se analizó cómo la intensidad de la isla de calor urbana afecta el precio de las viviendas, mediante la valoración hedónica. En el panel (b) se resalta que la implementación de techos verdes es la principal política analizada, aunque también hubo valoraciones de otras infraestructuras verdes como el arbolado urbano y los parques y otras áreas verdes. En el panel (c) el color de las palabras corresponde a una categoría de SSEE de la clasificación TEEB: en color azul están los servicios de abastecimiento, en color rojo, los de regulación, en amarillo, lo culturales, en verde los de hábitat y finalmente, en negro, aunque no es un SSEE, están los términos que no refieren a un SSEE, sino que aspectos que pueden ser valorados con precios de mercado y que fueron analizados junto con los SSEE. Por último, a nivel general (panel d), los puntos más analizados fueron la energía (ya sea consumo o ahorro), la calidad (del aire, agua o sonora), la contaminación y la regulación.

CONCLUSIONES

Los resultados muestran que no es homogéneo el estado de avance de la investigación científica en los diferentes continentes, aunque en términos generales y con diferentes grados de intensidad, se centra en América del Norte, Asia (especialmente China) y Europa. Las metodologías utilizadas varían

según la ubicación geográfica y la línea de investigación: se recurrió para calcular el costo de las UHI, principalmente a precios de mercado, que permitieron estimar los costos adicionales en que incurrieron los individuos para adaptarse a las nuevas condiciones del entorno térmico urbano, y metodologías de preferencias reveladas, que mediante otros mercados, como el de las viviendas, que mediante una valoración hedónica permitió conocer cómo cambian las decisiones de los individuos en función de la intensidad de la UHI. También se utilizó el mercado laboral para ver cómo impacta la UHI en la productividad laboral.

La forma en que las estrategias de mitigación afectan la percepción de bienestar de los individuos fue valorado principalmente mediante el MCE y MVC, lo cual permitió estimar el valor de uso y no uso en diferentes escenarios. Es notoria la preponderancia de los efectos de las políticas de mitigación de la UHI como objeto de estudio y dentro de estas, la política más abordada fue la implementación de techos verdes. Se observa además, un cambio en los servicios ecosistémicos valorados, comenzando por el servicio de regulación, y cambiando paulatinamente hacia los servicios culturales y de soporte, haciendo necesaria la incorporación de metodologías que no utilicen precios de mercado. Se observa además, que mientras que en Argentina si bien hay trabajos para desarrollar estrategias de mitigación, no se encontraron trabajos que busquen estimar los cambios en la percepción de bienestar de las personas para Argentina

REFERENCIAS

Akbari, H., Rosenfeld, A. y Taha, H. (1990). Summer Heat Islands, Urban Trees, and White Surfaces. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Report #: LBL-28308. Retrieved from https://escholarship.org/uc/item/3wz109ch

Akbari, H., Pomerantz, M. y Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, 70(3), 295–310.

Akbari, H. (2005). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban HeatIslandMitigation. First International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment.

Arce Correa, J. A. (2023). Is there a willingness to pay for shade provision as part of cycling urban infrastructure? Eliciting attributes of a discrete choice experiment in Neiva, Colombia (Dissertation). Retrieved from https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-506015

Atherton, A.; Dambal, V.; Miller, T.; Smith, I.; Wright, J. (2021). Reducing Urban Heat Island Effects While Providing Affordable Housing in Bunker Hill, Journal of Science Policy and Governance, Inc., 18, 04.

Azis, S. S. A. y Zulkifli, N. A. A. (2021). Green roof for sustainable urban flash flood control via cost benefit approach for local authority. Urban Forestry y Urban Greening, 57, 126876.

Azqueta, D., Alviar, M., Dominguez, L. y Ryan, R. (2007). Introducción a la economia ambiental. Segunda edición revisada y ampliada. Madrid, McGrawHill.

Bianchini, F. y Hewage, K. (2012). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. Building and Environment, 58, 152–162.

Bizuneh, T. Y. (2021). The Economic Valuation of Urban Green Parks: The Application of Contingent Valuation Method. Journal of Economics and Sustainable Development, November 2021.

Borzino, N., Chng, S., Mughal, M. O. y Schubert, R. (2020). Willingness to pay for urban heat island mitigation: A case study of Singapore. Climate, 8(8), 1–26. https://doi.org/10.3390/CLI8070082

Capotorti, G.; Alós Ortí, M. M., Copiz, R., Fusaro, L., Mollo, B., Salvatori, E. y Zavattero, L. (2019). Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning: A case study from the metropolitan area of Rome (Italy). Urban Forestry and Urban Greening, 37, 87–96.

Carter, T. y Keeler, A. (2008). Life-Cycle Cost-Benefit Analysis of Extensive Vegetated Roof Systems. Journal of environmental management. 87. 350-63. 10.1016/j.jenvman.2007.01.024.

Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. Energy and Buildings, 64, 182–198.

Chau, C. K., Tse, M. S. y Chung, K. Y. (2010). A choice experiment to estimate the effect of green experience on preferences and willingness-to-pay for green building attributes. Building and Environment, 45(11), 2553–2561. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.017

Clark, C., Adriaens, P. y Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: A probabilistic economic analysis of environmental benefits. Environmental Science and Technology, 42(6), 2155–2161.

Collins, R., Schaafsma, M. y Hudson, M. D. (2017). The value of green walls to urban biodiversity. Land Use Policy, 64, 114–123. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.02.025
Correa, E; Ruiz, M.A; Cantón, A.M; Lesino, G (2012). Thermal Comfort In Forested Urban Canyons Of Low Building Density.An Assessment For The City Of Mendoza, Argentina, Building And Environment; Lugar: Amsterdam, 58, 219 - 230.
Costa, H.; Floater, G.; Hooyberghs, H. y De Ridder, Koen. (2016). Climate change, heat stress and labour productivity: a cost methodology for city economies.
Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. LK - Nature TA - TT -, 387(6630), 253–260.
Donovan, G. y Butry, D. (2010). Trees in the city: Valuing street trees in Portland, Oregon. Landscape and Urban Planning. 94. 77-83. 10.1016/j.landurbplan.2009.07.019.
Estrada, F., Botzen, W. J. W. y Tol, R. S. J. (2017). A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. 7(May), 1–6. https://doi.org/10.1038/NCLIMATE3301
Estrada, F.; Lupi, V.; Botzen, W.J. y Tol, R. (2024). Urban and Non-Urban Contributions to the Social Cost of Carbon. 10.21203/rs.3.rs-4671262/v1.
Feng, H. y Hewage, K. N. (2018). Economic Benefits and Costs of Green Roofs. In Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00028-8
Freeman, M; Herriges, J.; Kling, C. (2003), The measurement of environmental and resource values. Theory and methods, New York, Resources for the Future Press, 24-26.
Fruth, E., Kvistad, M., Marshall, J., Pfeifer, L., Rau, L., Sagebiel, J., Soto, D., Tarpey, J., Weir, J. y Winiarski, B. (2019). Economic valuation of street-level urban greening: A case study from an evolving mixed-use area in Berlin. Land Use Policy, 89, 104237.
Hasan, S.; Yousuf, S. y hossain, S.. (2023). Effects of vegetation and PCM in reducing Urban Heat Island. Engineering Heritage Journal. 4. 138-145.
Huang, W. T. K., Masselot, P., Bou-Zeid, E., Fatichi, S., Paschalis, A., Sun, T., Gasparrini, A. y Manoli, G. (2023). Economic valuation of temperature-related mortality attributed to urban heat islands in European cities. Nature Communications, 14(1), 1–12.
Hui, L. C., Jim, C. Y. y Tian, Y. (2022). Public views on green roofs and green walls in two major Asian cities and implications for promotion policy. Urban Forestry y Urban Greening, 70, 127546.
Ji, Q.; Lee, H y Huh, S. (2022). Measuring the economic value of green roofing in South Korea: A contingent valuation approach. Energy and Buildings, 261, 111975.
Jim, C. Y. y Hui, L. C. (2022). Offering green roofs in a compact city: Benefits and landscape preferences of socio-demographic cohorts. Applied Geography, 145, 102733.
Jones, L., Fletcher, D., Fitch, A., Kuyer, J. y Dickie, I. (2024). Economic value of the hot-day cooling provided by urban green and blue space. Urban Forestry y Urban Greening, 93, 128212.
Johnson, D., See, L., Oswald, S. M., Prokop, G., Krisztin, T. (2021). A cost–benefit analysis of implementing urban heat island adaptation measures in small- and medium-sized cities in Austria. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 48(8), 2326–2345.
Johnson, D. y Geisendorf, S. (2022). Valuing ecosystem services of sustainable urban drainage systems: A discrete choice experiment to elicit preferences and willingness to pay. Journal of Environmental Management, 307, 114508.
Kim, D. H., Ahn, B. Il y Kim, E. G. (2016). Metropolitan residents' preferences and willingness to pay for a life zone forest for mitigating heat island effects during summer season in Korea. Sustainability (Switzerland), 8(11). https://doi.org/10.3390/su8111155
Latinopoulos, D., Mallios, Z. y Latinopoulos, P. (2016). Valuing the benefits of an urban park project: A contingent valuation study in Thessaloniki, Greece. Land Use Policy, 55, 130–141.
Lin, L.; Meng, L.; Mei, Y.; Zhang, W.; Liu, H. y Xiang, W. (2022). Spatial–temporal patterns of summer urban islands and their economic implications in Beijing. Environmental Science and Pollution Research. 29. 1-11. 10.1007/s11356-021-18029-6.
Lo, A. y Jim, C. (2010). Willingness of residents to pay and motives for conservation of urban green spaces in the compact city of Hong Kong. Urban Forestry and Urban Greening, 9(2), 113-120.
Mell, I. C., Henneberry, J., Hehl-Lange, S. y Keskin, B. (2013). Promoting urban greening: Valuing the development of green infrastructure investments in the urban core of Manchester, UK. Urban Forestry and Urban Greening, 12(3), 296–306. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.006

Miner, Mark y Taylor, Robert y Jones, Cassandra y Phelan, Patrick. (2016). Efficiency, economics, and the urban heat island. Environment and Urbanization. 29. 10.1177/0956247816655676.
Monbouquette, M.R. (2012). Modeling the urban heat island effect's impact on residential heating and cooling loads in the United States from 1960-2010, https://api.semanticscholar.org/CorpusID:130951545
Netusil, N. R., Lavelle, L., Dissanayake, S. y Ando, A. W. (2022). Valuing the public benefits of green roofs. Landscape and Urban Planning, 224, 104426.
Peng, L. L. H. y Jim, C. Y. (2015). Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong. Urban Forestry and Urban Greening, 14(3), 554–561. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.05.006
Perini, K. y Rosasco, P. (2013). Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. Building and Environment, 70, 110–121. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.08.012
Pomerantz, M. (2017). Are cooler surfaces a cost-effect mitigation of urban heat islands? Urban Climate, 24, 393–397. https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2017.04.009
Roxon, J., Ulm, F. J. y Pellenq, R. J. M. (2020). Urban heat island impact on state residential energy cost and CO2 emissions in the United States. Urban Climate, 31, 100546.
Shickman, Kurt y Rogers, Martha. (2020). Capturing the true value of trees, cool roofs, and other urban heat island mitigation strategies for utilities. Energy Efficiency. 13. 10.1007/s12053-019-09789-9.
Sinha, P., Caulkins, M. y Cropper, M. (2021). The value of climate amenities: A comparison of hedonic and discrete choice approaches. Journal of Urban Economics, 126(June 2019), 103371.
Souza, Lea y Postigo, C. y Oliveira, Alinne y Nakata-Osaki, Camila. (2009). Urban heat islands and electrical energy consumption. International Journal of Sustainable Energy. 28. 113-121.
Sukhdev, P., Wittmer, H. y Miller, D., 'La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad (TEEB): desafíos y respuestas', en el libro editado por D. Helm y C. Hepburn, Nature in the Balance: the Economics of Biodiversity, Oxford University Press (2014).
Tong, S. y Li, H. (2017). Life-cycle cost analysis of roofing technologies in tropical areas. Energy and Buildings, 151, 283–292. https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.06.054
Van Oijstaeijen, W.; Van Passel, S.; Back, P. y Cools, J. (2022). The politics of green infrastructure: A discrete choice experiment with Flemish local decision-makers. Ecological Economics, 199(October 2021), 107493. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107493
Van Raalte, L.; Nolan, M., Thakur, P., Xue, S., Parker, N. y AECOM Australia. (2012). Economic Assessment of the Urban Heat Island Effect. City of Melbourne, 1–71.
Veisten, K.; Smyrnova, Y.; Klæboe, R.; Hornikx, M.; Mosslemi, M.; Kang, J. (2012). Valuation of green walls and green roofs as soundscape measures: including monetised amenity values together with noise-attenuation values in a cost-benefit analysis of a green wall affecting courtyards. International journal of environmental research and public health. 9. 3770-88.
Whiteoak, K. y Saigar, J. (2019). Estimating the economic benefits of Urban Heat Island mitigation – Economic Analysis. 1–43. www.watersensitivecities.org.au
William, R.; Goodwell, A.; Richardson, M.; Le, P.; Kumar, P.; Stillwell, A. (2016). An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. Ecological Engineering, 95, 1–9.
Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L. y Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. Building and Environment, 38(3), 499–509.
Zhang, L., Fukuda, H. y Liu, Z. (2019). The value of cool roof as a strategy to mitigate urban heat island effect: A contingent valuation approach. Journal of Cleaner Production, 228, 770–777.
Zhao, D.X., He, B.J. (2017). Effects of architectural shapes on surface wind pressure distribution: case studies of oval-shaped tall buildings. J. Build. Eng. 12, 219–228.

Zinzi,M.; Agnoli,S. (2012) Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, Energy and Buildings, Volume 55, Pages 66-76, ISSN 0378-7788.

ECONOMIC ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF URBAN HEAT ISLANDS AND MITIGATION STRATEGIES: STATE OF THE ART

ABSTRACT: Urban heat islands generate impacts on ecosystems that affect the well-being of individuals and the growth possibilities of a society. This work looks for to know what has been valued in international literature in relation to this topic, how it was addressed and what the main concerns are by continent. For this, a review of the literature was carried out and it was classified according to the works that assess urban heat islands, mitigation strategies or impacts on ecosystem services. The results show that the degree of evolution of research on the different continents is not homogeneous and that the methodologies used vary depending on geographical location. Furthermore, a change is observed in the valued ecosystem services, starting with the regulation service, and gradually changing towards cultural and support services, making it necessary to incorporate methodologies that do not use market prices. It is also observed that while in Argentina, although there is work to develop mitigation strategies, no economic valuation works were found.
Key words*:* urban heat islands, economic valuation, mitigation strategies, literature review

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 69-80, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANÁLISIS DE LA UBICACIÓN DE ESTACIONES DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA CIUDAD DE RAFAELA: UNA PRIMERA APROXIMACIÓN

Bordón, Maximiliano R.[1,2], Kühn, Priscila A.[2], Cravero, Luisina[2], Lang, Anahí[2]
[1]Centro de Investigación y Transferencia Rafaela (CIT Rafaela), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
[2]Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) – Bv. Roca 989, Rafaela, C.P. 2300 – Santa Fe
Tel. 3492-501155 – e-mail: mbordon@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta un análisis cualitativo preliminar sobre la viabilidad de instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos compartidos (bicicletas) en la ciudad de Rafaela, considerando distintos tipos de infraestructuras de carga, ya sea mediante diferentes capacidades de carga o tipo de conexión (on-grid/off-grid). Para abordar este desafío se presenta un modelo matemático mixto-entero lineal que permite determinar en forma óptima la ubicación y el tipo de estaciones de carga a instalar, minimizando los costos totales de instalación y operación como así también maximizando los niveles de cobertura de la ciudad. A partir de información recolectada a través de encuestas, en donde se identifican necesidades de movimiento entre distintos sectores de la ciudad, se construye un caso de estudio prototipo para el desarrollo del análisis pertinente. De los resultados obtenidos por el modelo en el caso de estudio analizado, se concluye que la instalación de estaciones de carga no solo permitiría reducir los costos (de instalación y operativos) al tiempo que se maximiza la cobertura de la ciudad, sino que también habilitaría el acceso a usuarios potenciales del sistema vehículos eléctricos compartidos, promoviendo una mayor adopción de esta tecnología en la ciudad.

Palabras clave: vehículos eléctricos, modelado matemático, infraestructura de carga, logística urbana, micro-movilidad.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos eléctricos a base de baterías (VEBs) han experimentado un crecimiento significativo en la última década, impulsados por avances tecnológicos, políticas gubernamentales favorables y una mayor conciencia ambiental, especialmente en lo que respecta a micro-movilidad (Moschopoulou et al., 2023). De acuerdo con (Loustric y Matyas, 2020), los principales beneficios con los que cuenta este tipo de tecnología están relacionados con el uso de baterías (mínima contaminación y bajos costos de operación), el tamaño (ocupan poco espacio en tránsito y en estacionamientos), la maniobrabilidad (facilidad de operación, adecuados para conducción en ciudad), velocidades máximas y condiciones de uso. Estos beneficios han sido motivadores para incorporar este tipo de tecnología en los sistemas de transporte público de pasajeros en el formato multimodal (Ignaccolo et al., 2022; Pedroza-Perez et al., 2024).

Si bien las soluciones basadas en micro-movilidad tienen un rol clave en la persecución de los objetivos de desarrollo sustentable de las ciudades (Olabi et al., 2023), éstas aún presentan diferentes barreras en cuanto a su plena implementación. De acuerdo con (Corti et al., 2024), estas barreras pueden agruparse en seis factores: ansiedad por la autonomía (inseguridad relacionada con el desconocimiento de tener disponible o no un lugar para recargar energía durante el trayecto), accesibilidad limitada (no contar con un sector de carga cercano al lugar de destino), regulaciones urbanas (instalaciones de carga no planificadas y protocolos de carga no unificados), costos asociados (fijos relacionados con la instalación de carga y variables relacionados con su mantenimiento), percepción/opinión pública (la inexistencia de instalaciones de carga pueden sugerir a la comunidad que el uso de VEBs no es conveniente), y

manufactura (elaboración y distribución de VEBs y gestión de baterías y componentes de instalaciones de carga). Los autores mencionan que la mayoría de estas barreras están directa o indirectamente vinculadas a la infraestructura de carga: el establecimiento de una red extensa de infraestructuras de carga puede ayudar a aliviar la ansiedad por la autonomía y reducir la accesibilidad limitada de los VEBs, aunque esto solo es posible si la infraestructura de carga está optimizada para tener un bajo costo de producción (alcanzable trabajando en la planificación urbana y la regulación).

Como se citó previamente, la infraestructura de carga es uno de los factores clave que determinan si los VEBs pueden o no ingresar al mercado a gran escala. Si la planificación y la selección de sitios para la instalación de infraestructura de carga no son razonables, esto provocará una serie de problemas, como una baja tasa de utilización de los cargadores, dificultades de carga para los usuarios de VEBs y obstáculos para la promoción del mercado de VEBs. Según (Tao et al, 2021), una planificación razonable de la selección de sitios y la capacidad de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos no solo puede reducir el impacto adverso en la estabilidad de la red, sino que también mejora considerablemente la conveniencia de viaje de los VEBs.

Dada la importancia y relevancia de la temática, en este trabajo se aborda (desde el punto de vista de investigación de operaciones) la problemática de la instalación de infraestructura de carga para VEBs de uso compartido, en el contexto de la ciudad de Rafaela. Este estudio está en consonancia con las políticas activas que lleva a cabo el Municipio, hecho que se manifiesta en diversos decretos y convenios con distintos agentes del entramado local, como por ejemplo convenios con empresas para la adquisición de VEBs (IDSR, 2021), como así también con instituciones de educación superior (IDSR, 2019) para el fomento del uso de VEBs. El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación financiado por la Universidad Nacional de Rafaela, en donde el objetivo es proponer soluciones efectivas y eficientes para los tópicos que se enmarcan en lo que se conoce como "logística urbana" (Patier y Routhier, 2020). En este contexto, se propuso realizar un primer análisis para evaluar la factibilidad de implementar tecnologías que favorezcan el desarrollo sostenible de la ciudad, entre ellas, fomentar el uso de vehículos eléctricos para el traslado de los ciudadanos. Para realizar un primer análisis sobre la viabilidad de implementación de infraestructura de carga en la ciudad de Rafaela se plantearon los siguientes pasos: (1) Diseño de encuesta para analizar los patrones de movimiento de los habitantes de la ciudad; (2) Recolección y análisis de la información; (3) Construcción/representación de la ciudad en términos propicios para el estudio que se realiza en este trabajo (construcción de grafo); (4) Modelado del problema de instalación de estaciones de carga; y (5) Análisis de los resultados preliminares obtenidos. En lo que respecta al problema a abordar en este trabajo, lo que se pretende es determinar la cantidad y tipo de estaciones de carga a instalar en la ciudad de manera tal que se maximice el acceso a dichas estaciones de carga y se minimicen tanto los costos de instalación de las mismas como las distancias entre los demandantes y las estaciones instaladas.

Desde el punto de vista estrictamente matemático, este problema es uno de cobertura capacitado (Snyder, 2011), el cual está estrechamente relacionado con el problema de cobertura y localización capacitado (CSCLP, de sus siglas en inglés) (Toregas et al., 1971), y el problema de localización y cobertura máxima capacitado (CMCLP, de sus siglas en inglés) (Church y ReVelle, 1974). La meta del CSCLP es determinar la cantidad mínima de instalaciones necesarias para asegurar que todos los nodos de demanda estén cubiertos (es decir, ubicados dentro de la distancia máxima de servicio, S, de una instalación operativa) y que ninguna instalación reciba una demanda total que exceda su capacidad. Por otro lado, el objetivo del CMCLP es posicionar un número fijo de instalaciones, p, de tal forma que se maximice la demanda total cubierta, garantizando que ninguna instalación sobrepase su capacidad en términos de demanda asignada. Bajo ciertas suposiciones (Current y Storbeck, 1988), ambos problemas pueden ser representados como un problema de localización de plantas capacitado, como un problema de p-medias capacitado o, incluso, como un problema de asignación generalizado, por lo que las formulaciones encontradas en la literatura responden, por lo general, a una de estas representaciones. En (Wang, 2007) se presenta un modelo para la localización de estaciones de recarga, utilizando programación entera para optimizar la ubicación de las estaciones. El modelo fue validado y sometido a análisis de sensibilidad, considerando factores como el tiempo mínimo de recarga, la duración de la estancia en el destino, el tamaño de la flota, la capacidad de las estaciones y los costos asociados. Por su parte, en (He et al., 2016) se analiza el impacto de las principales formulaciones tradicionales

(cobertura de conjunto, localización y cobertura máxima, y p-medias, en sus versiones no capacitadas) en un caso de estudio de Beijing, China. En (Chen et al., 2018) los autores proponen un modelo matemático entero para decidir sobre la instalación de estaciones de carga o estaciones de intercambio de baterías, buscando maximizar la rentabilidad asociada a la operación. Dada la complejidad del problema, recurren a una metaheurística para su abordaje (metaheurística de optimización de enjambre de partículas multi-objetivo, PSO, de sus siglas en inglés). En (Wang y Lin, 2013) se discute la instalación de estaciones de carga bajo el supuesto de una formulación basada en localización de plantas, considerando como función objetivo la maximización del flujo en red. El problema subyacente que trabajan los autores es en qué lugar de un determinado recorrido han de instalarse estaciones de carga de forma tal que se garantice el suministro de energía para el trayecto completo, desde el punto de vista del proveedor del servicio (no así de los usuarios).

A diferencia de los trabajos mencionados anteriormente, aquí se considera como variable de decisión la selección de la capacidad de las estaciones de carga a instalar, como así también se integran diversos objetivos en la misma función, a saber, maximizar cobertura de la ciudad y minimizar los costos de instalación. En este trabajo no se consideran aspectos relacionados con la operatoria semanal/mensual, ya que se trata de un problema de índole estratégica. En la siguiente sección se presenta la descripción formal del problema a modelar, como así también el modelo matemático desarrollado.

METODOLOGÍA

En esta sección se describe en detalle el problema a abordar y se analiza un ejemplo ilustrativo para explicar los resultados obtenibles. Específicamente, en la sub-sección "*Descripción del problema*" se presenta la descripción matemática formal del problema a abordar, mientras que en la sub-sección "*Validación del modelo: ejemplo ilustrativo*" se presenta un ejemplo numérico para comprender los alcances de la metodología, la relación entre las variables de decisión y las soluciones de compromiso.

A través del modelo matemático se busca optimizar la ubicación y capacidad de las estaciones de carga en una red, con el objetivo de minimizar los costos totales asociados a la instalación de estaciones, la operación de las mismas y el traslado de los clientes (usuarios) hacia las estaciones instaladas. El modelo no solo considera estos costos, sino también penalizaciones por demanda no cubierta, estableciendo un equilibrio entre cubrir la mayor demanda posible y los costos de instalación. Para ejemplificar esto, supóngase que un usuario demanda 100 unidades de carga, y que existen dos opciones: instalar una estación de carga de menor capacidad (80 unidades) con un costo de instalación de $15.000 en un nodo cercado al cliente y no cubrir 20 unidades de carga demandadas, o bien instalar una estación de carga de mayor capacidad (150 unidades) con un costo de $25.000 en un nodo más alejado cubriendo toda la demanda (con distancias entre cliente y estación más largas): el modelo debe decidir no solo dónde instalar las estaciones, sino también qué tipo de estación instalar y qué parte de la demanda de cada cliente asignar a cada estación instalada. Además, si la distancia entre el cliente y una estación es mayor que la máxima permitida (digamos 10 km), esa demanda no podrá ser cubierta, lo que implica una solución de compromiso entre el costo de instalar nuevas estaciones y el costo de no cubrir la demanda. Así, el modelo enfrenta decisiones estratégicas: ¿es preferible instalar más estaciones cercanas para minimizar la penalización por demanda no cubierta, o centralizar las estaciones y aceptar un mayor costo por no cubrir algunas demandas? Este tipo de análisis permite identificar los compromisos o "trade-offs" que se deben gestionar entre los costos de instalación, el nivel de servicio y las distancias de desplazamiento. A continuación, se presenta formalmente el modelo matemático que considera las decisiones previamente mencionadas.

Descripción del problema

El modelo propuesto busca optimizar la ubicación y capacidad de las estaciones de carga para cubrir la demanda de clientes en una red, minimizando los costos asociados a la instalación, operación y traslado hacia las estaciones instaladas, mientras se respetan las capacidades de las estaciones y se cumplen ciertos requisitos de cobertura y cantidad máxima de estaciones de carga a instalar.

Supóngase que se tiene un conjunto de *N* clientes $I = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$, que demandan un cierto número de cargas de la red (dem_i), la cual puede ser provista por un conjunto de *M* posibles estaciones de carga

$J = \{j_1, j_2, \dots, j_M\}$, siendo $J \subseteq I$. A su vez, las potenciales estaciones de carga *j* pueden albergar a lo sumo uno de los *L* tipos de instalaciones disponibles (diferentes capacidades de suministro de energía en términos de número de cargas completas), dadas por el conjunto $K = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$, siendo $k_1 \leq k_2 \leq \cdots \leq k_L$ en términos de energía provista. Cada una de las posibles *L* instalaciones de carga poseen una capacidad máxima de carga ($capmax_k$) y un costo de instalación asociado ($cfix_k$). Para que un cliente *i* pueda ser asignado a una estación instalada en la ubicación *j* (es decir, para que se asigne parcial o totalmente la demanda de un cliente a una estación) debe considerarse una distancia máxima tolerable de desplazamiento hacia la estación (*S*), siendo una ubicación potencial *j* admisible cuando $dist_{i,j} \leq S$, es decir, cuando la distancia de traslado desde *i* hacia *j* ($dist_{i,j}$) no supere un máximo permisible. En caso de que la estación se instale en una ubicación que supere dicho margen tolerable, esa demanda será considerada no cubierta (y, por ende, será penalizada).

El objetivo es determinar la ubicación óptima de estas instalaciones y la asignación de la demanda de los clientes a las mismas, de manera que se minimicen los costos totales. Estos costos incluyen: (a) costos por no cubrir demanda, en donde por cada unidad de demanda no atendida se incurre en un costo cu; (b) costos fijos de instalación de estaciones de carga; y (c) costos de traslado desde el cliente *i* hacia la estación de carga instalada en la ubicación *j*, si es que dicho cliente es asignado a la estación.

El modelo matemático desarrollado es el siguiente:

$$\min f^1 * \sum_i cu * dem_i * U_i + f^2 * \sum_j \sum_k cfix_k * Y_{j,k} + f^3 * \sum_i \sum_j dist_{i,j} * X_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{j|dist_{i,j} \leq S} X_{i,j} + U_i = 1, \ \ \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i|dist_{i,j} \leq S} dem_i * X_{i,j} - \sum_k capmax_k * Y_{j,k} \leq 0, \ \ \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{j,k} \leq 1, \ \ \forall j \in J \quad (4)$$

$$pmin_k \leq \sum_j Y_{j,k} \leq pmax_k, \ \ \forall k \in K \quad (5)$$

$$ptot \leq \sum_j \sum_k Y_{j,k} \quad (6)$$

$$Y_{j,k} \in \{0,1\}, \ \ \forall j \in J, \forall k \in K \quad (7)$$

$$0 \leq X_{i,j} \leq 1, \ \ \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$0 \leq U_i \leq 1, \ \ \forall i \in I \quad (9)$$

El objetivo del modelo se expresa en la Ec. (1), que busca minimizar los costos totales de operación, compuestos por costos asociados a la demanda no cubierta (primer término), costos de instalación de estaciones de carga (segundo término) y costos de traslado desde las ubicaciones de los clientes hacia las estaciones instaladas (tercer término). Este último término considera los costos asociados al traslado de la porción de la demanda cubierta del cliente. Los factores f^1, f^2 y f^3 permiten dar diferentes ponderaciones a los términos de la función objetivo según la importancia que tengan para quien ejerza el rol de tomador de decisión. La variable U_i representa la porción de la demanda del cliente *i* no cubierta. La variable $Y_{j,k}$ representa la decisión de instalar o no una estación de carga en la ubicación *j* con capacidad de suministro *k*. Finalmente, la variable $X_{i,j}$ representa la porción de la demanda del cliente *i* asignada (cubierta) por la estación de carga ubicada en la instalación *j*.

En lo que respecta al conjunto de restricciones, Ec. (2) asegura que toda la demanda de cada cliente *i* debe ser cubierta por una instalación *j* dentro de un rango máximo *S*, o bien debe ser considerada como no cubierta; Ec. (3) establece que la demanda total asignada a una instalación *j* no debe exceder su capacidad máxima, que depende del tipo de instalación *k* seleccionada; Ec. (4) garantiza que en una

ubicación *j* sólo puede instalarse una única estación; Ec. (5) asegura que el número de estaciones de carga a instalar de cada tipo *k* se mantenga entre un mínimo y máximo, es decir, limitar la cantidad total de estaciones de carga a instalar de una dada capacidad de carga (por ejemplo, como mucho se pueden instalar 3 estaciones de tipo k_1 pero necesariamente se debe instalar al menos una estación de ese tipo); Ec. (6) establece que, como mínimo, se deben instalar *ptot* estaciones de carga, independientemente del tipo; Ec. (7) expresa el dominio de la variable $Y_{j,k}$, limitándola a valores 0 o 1 (variable binaria); finalmente, Ecs. (8, 9) expresan el dominio de las variables $X_{i,j}$ y U_i, respectivamente, limitándolas a valores entre 0 y 1 (variables continuas).

Validación del modelo: ejemplo ilustrativo

Para analizar las soluciones de compromiso que afronta este modelo y para mostrar cómo se comporta el mismo ante diversas configuraciones de parámetros, analizaremos las soluciones obtenidas con el ejemplo ilustrativo que se describe en la Tabla 1.

Tabla 1: Coordenadas y demanda asociada a cada cliente

i	Coord.X	Coord.Y	Dem	i	Coord.X	Coord.Y	Dem	i	Coord.X	Coord.Y	Dem
1	12	16	10	6	8	15	15	11	10	10	1
2	16	9	1	7	3	4	18	12	4	5	1
3	9	13	10	8	18	15	19	13	13	5	2
4	3	16	1	9	5	19	5	14	20	19	30
5	3	14	1	10	10	12	1	15	3	8	10

Por cuestiones de espacio sólo se analizará el impacto de: la distancia máxima tolerable, *S*, y la cantidad mínima de estaciones a instalar, *ptot*. En todas las corridas, se considerarán 2 tipos de estaciones de carga (k_1 y k_2), con capacidades de suministro de 80 y 150 cargas completas, respectivamente. Los costos fijos asociados a la instalación de cada tipo de estación de carga serán \$15.000 y \$25.000, respectivamente. Como máximo se podrán instalar 3 y 2 estaciones de carga, respectivamente. El costo unitario por demanda no cubierta será de \$10. Se asume, además, que los factores f^1, f^2 y f^3 tienen el mismo peso (por defecto, 1). La distancia entre dos nodos *i* y *j* es computada según distancia Manhattan, a saber, $dist_{i,j} = |coordx_i - coordx_j| + |coordy_i - coordy_j|$.

Los valores considerados para los parámetros en cuestión son los siguientes: *S = [5, 10, 15, 20]*, *ptot = [1, 2]*. Los resultados de cada corrida se expresan en la Tabla 2.

Tabla 2: Resultados obtenidos en los escenarios analizados

Escenario	S	ptot	Utot	Xtot	Ysel	Escenario	S	ptot	Utot	Xtot	Ysel
1	5	1	89	36	6(1)	5	5	2	59	66	6(1), 14(1)
2	10	1	50	75	8(1)	6	10	2	3	122	5(1), 8(1)
3	15	1	45	80	1(1)	7	15	2	1	124	1(1), 5(1)
4	20	1	45	80	1(1)	8	20	2	0	125	5(1), 10(1)

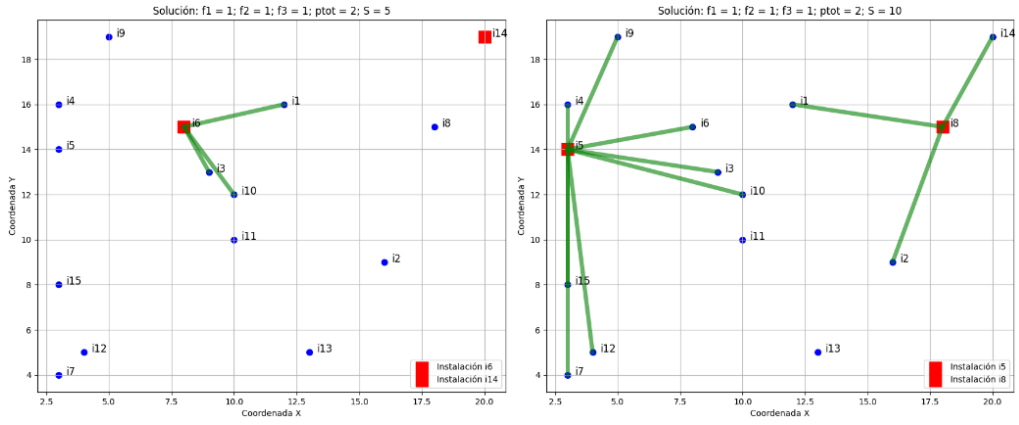
Cabe destacar que tanto para la resolución de este ejemplo introductorio como para la resolución del caso de estudio (ver siguiente sección) se utiliza el software comercial GAMS 41.5.0 (Rosenthal, 2007) y como solver se utiliza CPLEX. Todos los ejemplos son ejecutados en una laptop Dell Inspiron 15, procesador AMD A12-9700P 2.5 GHz, memoria RAM 8 GB.

En la Tabla 2, en *Utot* se presenta la demanda total no cubierta por la solución obtenida, en *Xtot* se presenta la demanda total cubierta, y en *Ysel* se presenta la selección de ubicaciones para instalar la estación y el tipo de estación instalada entre paréntesis (formato *nodo_seleccionado(tipo_estación)*). Los valores de la función objetivo para los escenarios 1 a 8 fueron {\$15.903; \$15.532; \$15.477,60; \$15477,60; \$30.603; \$30.109; \$30.101,53; \$30.098,60}, respectivamente. Existen diferentes situaciones para destacar en este ejemplo. Por empezar, notar que para el caso de los escenarios 3 y 4 la distancia máxima tolerable no influye en el resultado final (obtenemos la misma solución, tanto en costo como en ubicaciones). Esto se debe a que el costo unitario por demanda no cubierta es muy inferior al costo fijo de instalación de estaciones de carga (\$10 vs \$15.000/\$25.000), y como estamos penalizando no sólo la

demanda no cubierta sino también la distancia desde cada cliente hacia la estación de carga instalada (tercer término de la Ec. (1)) el modelo opta por no abrir otra estación ya que necesariamente incurrirá en mayores costos (notar que la demanda total cubierta, *Xtot* en la Tabla 1, se mantiene en 80 unidades de carga para los escenarios 3 y 4).

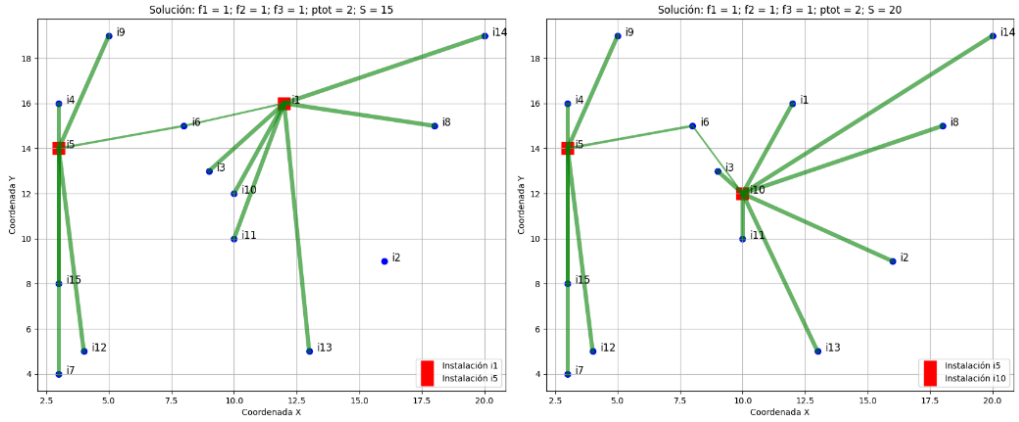
Si quisiéramos observar el efecto de no cubrir demanda, podríamos o bien modificar los factores f^1, f^2 y f^3 (distintas penalizaciones de la función objetivo) o bien podríamos modificar el costo unitario por no cubrir demanda, *cu*. Para simplificar el análisis, optaremos por modificar el parámetro *cu* a, digamos, $1.000: de esta manera, la solución óptima para este escenario (el número 4) es instalar una única estación de carga (de tipo k_2) en el nodo 6, siendo suficiente para cubrir toda la demanda existente. Notar que la demanda total de este ejemplo ilustrativo asciende a 125 unidades de carga, y para cubrir toda esa demanda podemos o bien instalar 2 estaciones de tipo k_1 (capacidad de suministro total: 160 unidades de carga) o bien instalar una única estación de tipo k_2 (capacidad de suministro total: 150 unidades de carga), como sucede en este caso. Optar por instalar dos estaciones de carga de 80 unidades de carga cada una es más costoso que instalar una única estación de 150 unidades de carga ($30.000 vs $25.000).

En lo que respecta al resto de los escenarios considerados, en la Figura 1 se detallan gráficamente las soluciones obtenidas para los escenarios 5 (Figura 1-a) y 6 (Figura 1-b), mientras que en la Figura 2 se detallan los resultados para los escenarios 7 (Figura 2-a) y 8 (Figura 2-b).



(a) *(b)*

Figura 1: Solución obtenida para los escenarios (a) 5 y (b) 6.



(a) *(b)*

Figura 2: Solución obtenida para los escenarios (a) 7 y (b) 8.

En la Figura 1 se aprecia el efecto que tiene la distancia máxima tolerable para asignar un cliente a una estación de carga instalada. Para el caso del escenario 5 (Figura 1-a), se decide instalar dos estaciones de tipo k_1 en los nodos 6 y 14. Lo primero que se observa es la instalación en el nodo 14, la justificación de esta elección por parte del modelo es que dicho nodo tiene una demanda de 30 unidades (ver Tabla 1), por lo que la instalación de una estación en este nodo justifica su existencia (notar que la demanda

total cubierta para este escenario es de 66 unidades de carga y que los 3 nodos con mayores requerimientos son cubiertos por al menos una estación de carga).

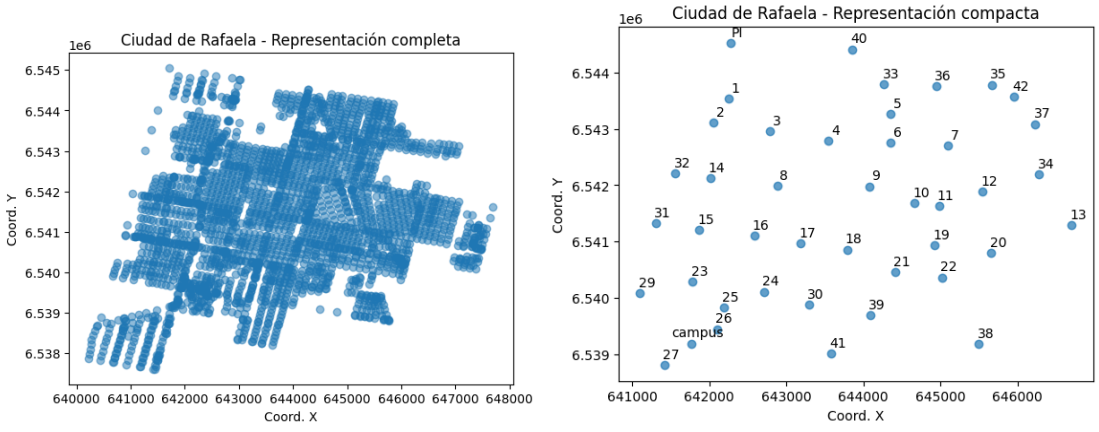
En el escenario 6 (Figura 1-b) puede observarse que, al elegirse los nodos 5 y 8 para instalar una estación de carga, la demanda total cubierta asciende a 122 unidades de carga, siendo las 3 unidades de carga no cubiertas las correspondientes a los nodos 11 y 13 (ver Tabla 1). En este caso, el costo total de operación disminuye debido a una mayor cobertura de la demanda (el costo asociado al primer término de la Ec. (1) es reducido respecto al escenario 5). De manera similar sucede en el escenario 7 (Figura 2-a), en donde un aumento de la distancia máxima tolerable genera un corrimiento de la estación de carga instalada en el nodo 8 (escenario 6) al nodo 1 (escenario 7), dejando sin atender la demanda del nodo 2 (1 unidad de carga). Tanto en este escenario como en el escenario 8 (Figura 2-b) se observa un comportamiento particular: la cobertura parcial del nodo 6 por dos estaciones de carga diferentes. En ambos escenarios (7 y 8) la mayor parte de la demanda del nodo 6 es asignada al nodo 5 (el nodo estación más lejano en ambos escenarios). Esto sucede así ya que los nodos 1, 8 y 14 tienen demandas importantes (ver Tabla 1) y resulta conveniente asignarlas a la estación más cercana (nodo 10), debido al tercer término de la Ec. (1).

Si bien el análisis anterior reviste de poco interés práctico, da un lineamiento general para comprender los diferentes compromisos y el impacto que tienen distintos parámetros en las soluciones obtenidas. En la siguiente sección se presenta el caso de estudio de la ciudad de Rafaela y se discuten resumidamente algunas consideraciones adicionales.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Retomando lo presentado en la sección de INTRODUCCIÓN, este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación financiado por la Universidad Nacional de Rafaela, en donde el objetivo es proponer soluciones efectivas y eficientes para los tópicos que se enmarcan en lo que se conoce como “logística urbana”. Para realizar un primer análisis sobre la viabilidad de implementación de infraestructura de carga en la ciudad de Rafaela se plantearon los siguientes pasos: (1) Diseño de encuesta para analizar los patrones de movimiento de los habitantes de la ciudad; (2) Recolección y análisis de la información; (3) Construcción/representación de la ciudad en términos propicios para el estudio que se realiza en este trabajo (construcción de grafo); (4) Modelado del problema de instalación de estaciones de carga; y (5) Análisis de los resultados preliminares obtenidos.

Este trabajo se enfoca en los pasos (3), (4) y (5), previamente mencionados. En línea con esto, en la Figura 3 se presenta una primera caracterización de la ciudad, en donde cada nodo representa una intersección de dos calles. En la Figura 3-a se presenta la versión completa de la ciudad (2861 nodos), mientras que en la Figura 3-b se presenta la versión compacta (43 nodos, cada nodo representa un punto emblemático de cada barrio o sector de la ciudad). Para obtener las coordenadas de cada nodo se utilizó la librería OSMnx de Python (Boeing, 2024).



(a) *(b)*

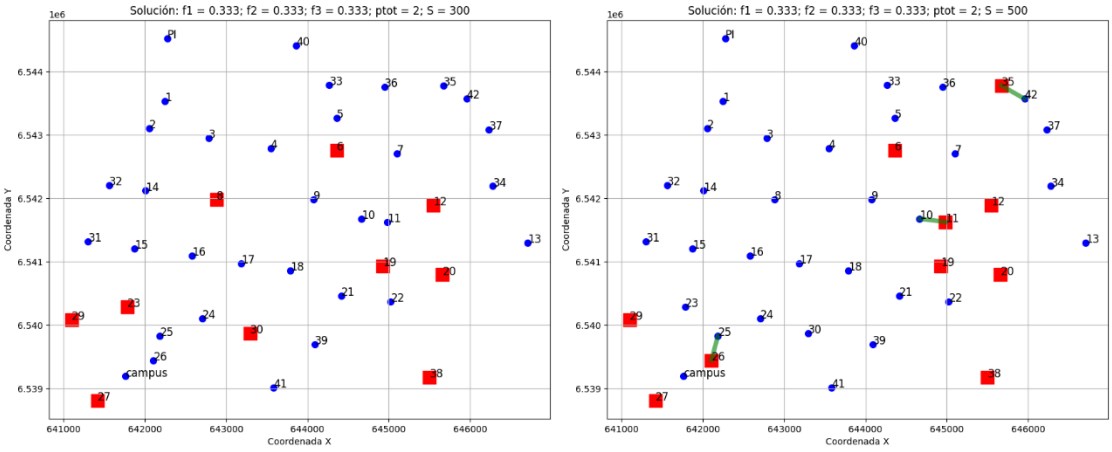
Figura 3: Representación de la ciudad de Rafaela (a) versión completa, (b) versión compacta

Dado que el modelo matemático propuesto para abordar la problemática es de tipo NP-Hard (Karp, 1972), se decide trabajar con una versión simplificada del grafo, sin comprometer la calidad de los resultados obtenibles. Esta simplificación es necesaria debido a la complejidad generada por el grafo original.

Con estas consideraciones, el caso de estudio consta de un conjunto de 43 clientes $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{43}\}$. Para determinar los niveles de demanda de este conjunto de clientes, se utilizaron resultados preliminares de la encuesta de movilidad en curso (paso (2) mencionado al inicio de esta sección), en donde se identificaron los requerimientos de clientes en el formato "par OD" (par origen-destino). Así, la demanda computada está compuesta por todos los requerimientos desde y hacia un determinado cliente *i*. A efectos de esta presentación, se modificaron aleatoriamente determinadas demandas (la encuesta aún está en desarrollo y no se cuenta con información definitiva). Cabe destacar que cada uno de los clientes también representa una ubicación potencial de estaciones de carga (es decir, $I = J$). Se aclara que en este caso de estudio también se computa la distancia en dos nodos según distancia Manhattan.

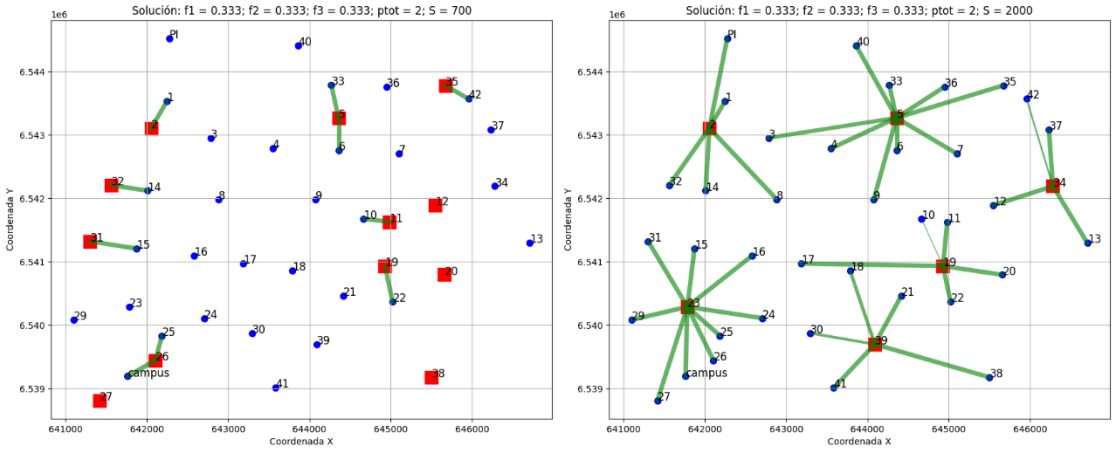
Para el caso de las potenciales estaciones de carga a instalar, se consideran 6 tipos diferentes ($K = \{k_1, k_2, \dots, k_6\}$, en donde k_1 a k_5 se asocian a estaciones autónomas con distintas capacidades, y k_6 a estaciones de tipo on-grid). Las capacidades de carga de cada tipo de estación, a modo de referencia y sin perder generalidad en lo que respecta al caso de estudio, se asumen de {480, 730, 975, 1215, 2430, 9320} en unidades de carga suministradas. Cabe destacar que se asume que la estación de carga on-grid k_6 tiene capacidad para abastecer la demanda completa del caso de estudio (9320 unidades de carga). Para este estudio preliminar se asume que la cantidad máxima de estaciones de carga a instalar, por tipo, es de {10, 10, 10, 7, 5, 1}. En lo que respecta a los costos de instalación de las estaciones de carga considerados, a modo de referencia y sin comprometer la calidad de los resultados, son de {10.300, 13.500, 16.000, 17.500, 30.000, 100.000} unidades monetarias ($). El costo unitario por carga no abastecida se considera de $50.

Los factores f^1, f^2 y f^3 nuevamente se consideran idénticos, y se asume un mínimo de 2 estaciones de carga a instalar (de cualquiera de los tipos disponibles). En las figuras Figura 4 y Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para *S* = [300, 500, 700, 2000], es decir, distancias máximas tolerables (para alcanzar una estación de carga) de 300, 500, 700 y 2000 metros, respectivamente.



(a) *(b)*

Figura 4: Soluciones obtenidas para (a) S=300, (b) S=500



(a) *(b)*

Figura 5: Soluciones obtenidas para (a) S=700, (b) S=2000

En el escenario representado por la Figura 4-a (*S=300*) se deciden instalar 10 estaciones de carga de tipo k_1 (off-grid) en los barrios/sectores 6, 8, 12, 19, 20, 23, 27, 29, 30 y 38, cubriendo sólo la demanda de los sectores mencionados, dejando sin cubrir un total de 6.781 unidades de carga (de 9320). Con esta configuración se obtiene una cobertura del 27,24%, a un costo total de $146.203,65.

En el escenario representado por la Figura 4-b (*S=500*) se deciden instalar 10 estaciones de carga de tipo k_1 (off-grid) en los barrios/sectores 6, 11, 12, 19, 20, 26, 27, 29, 35 y 38. En esta solución se decide cubrir la demanda del nodo 11 (sector caracterizado por una de las dos universidades más importantes de la ciudad), a costa de no cubrir la demanda de la zona céntrica (representada por el nodo 8, cubierta en el escenario anterior). En el escenario previo se instala una estación cercana al campus de la Universidad Nacional de Rafaela (en el nodo 27) pero no se asigna demanda específica del campus a dicho nodo, en cambio en este escenario se deciden instalar dos estaciones cercanas (en los nodos 27 y 26), siendo el nodo 26 el responsable de cubrir la demanda generada en dicho campus. La demanda total no cubierta en esta solución asciende a 6.266 unidades de carga. Aquí la cobertura asciende al 32,76%, con un costo de $138.072,78.

En el escenario representado por la Figura 5-a (*S=700*) se deciden instalar 12 estaciones de carga, 10 de tipo k_1 (off-grid) y 2 de tipo k_2 (off-grid). Las ubicaciones para las estaciones de tipo k_1 son 2, 11, 12, 19, 20, 27, 31, 32, 35 y 38, mientras que en los barrios/sectores 5 y 26 se deciden instalar estaciones de tipo k_2 (en este caso en particular, la máxima cantidad de estaciones de tipo k_1 estaban limitadas a 10, por lo que el modelo decide optar por incorporar 2 de k_2). En este caso, la demanda total no cubierta asciende a 4.605 unidades de carga, siendo el costo asociado a esta solución de $120.814,39.

Finalmente, en la Figura 5-b se presentan los resultados para un escenario en donde la distancia máxima tolerable para dirigirse hacia una estación de carga sea de 2 kilómetros. En este escenario se decide instalar un total de 6 estaciones de carga, siendo 1 estación de tipo k_3, 3 estaciones de tipo k_4 y 2 estaciones de tipo k_5, todas catalogadas como off-grid. La estación de tipo k_3 se instala en el nodo 34, las estaciones de tipo k_4 se instalan en los sectores 2, 19 y 39, y las estaciones de tipo k_5 se instalan en los sectores 5 y 23. Con esta solución, se logra cubrir el total de la demanda (9320 unidades de carga), con un costo de $58.529,05.

Luego de una cuidadosa observación de los resultados obtenidos en el caso de estudio, es posible identificar soluciones de compromiso relacionadas con cobertura de demanda, costos asociados, diversificación de las estaciones de carga instaladas y ubicaciones estratégicas. Por ejemplo, resulta evidente que el escenario representado en la Figura 5-b logra máxima cobertura a menor costo que la solución del escenario representado por la Figura 5-a (las reducciones de costo se derivan de las reducciones logradas en el primer término de la ecuación Ec. (1) discutida previamente, ver sección METODOLOGÍA), sin embargo, desde el punto de vista de promoción e introducción de estas tecnologías en la ciudad podría resultar inconveniente e incluso contraproducente la instalación de grandes estaciones de carga concentradas en pocos sectores. En este sentido, el modelo presentado sirve

y actúa como guía para tomadores de decisiones, en virtud de decisiones que no fueron consideradas al momento de desarrollar una primera formulación (decisiones de índole política, de inclusión, de fomento de turismo, etc.), siendo posible, por ejemplo, asignar valores fijos a variables de interés. El modelo matemático propuesto habilita incorporar restricciones del tipo $Y('campus',4) = 1$, indicando que la solución a un caso de estudio en particular debe incluir la instalación de una estación de tipo k_4 en el campus de la Universidad Nacional de Rafaela.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se ha desarrollado y presentado un primer modelo matemático para la instalación de estaciones de carga de vehículos eléctricos en la ciudad de Rafaela. Este modelo representa un avance en lo que respecta a la planificación urbana y la promoción de la movilidad eléctrica en la región. A partir de los resultados obtenidos, es posible resaltar varios aspectos clave. El modelo propuesto permite minimizar los costos asociados con la instalación de estaciones de carga, lo que resulta en una solución económicamente viable para los tomadores de decisiones. La metodología utilizada facilita la identificación de ubicaciones óptimas que no solo maximizan la cobertura para los usuarios de vehículos eléctricos, sino que también optimizan el uso de recursos financieros. El modelo se constituye como una herramienta preliminar valiosa para los planificadores urbanos y las autoridades locales, quienes pueden utilizarlo como base para la implementación de una red de estaciones de carga en la ciudad. Aunque es un primer paso, el modelo proporciona una guía fundamentada para orientar futuras inversiones y desarrollos en el ámbito de la movilidad eléctrica. En lo que respecta al contexto local, hasta la fecha no existía un estudio de estas características. La propuesta de este modelo intenta abordar este vacío y establece un precedente para futuros estudios. La investigación realizada destaca la necesidad y la urgencia de abordar la infraestructura para vehículos eléctricos en la ciudad, y este modelo sienta las bases para trabajos más detallados y específicos.

Aunque el modelo presentado en este estudio ofrece una herramienta valiosa para la planificación de estaciones de carga de vehículos eléctricos en Rafaela, es importante reconocer varias limitaciones inherentes a la metodología utilizada. Una gran limitante es la complejidad computacional asociada: el modelo formulado se inscribe en la lista de problemas NP-Hard, lo que significa que su resolución exacta es computacionalmente difícil, especialmente para instancias de gran tamaño. Esto plantea la necesidad de desarrollar algoritmos de resolución más eficientes, basados en algoritmos evolutivos y, preferentemente, en técnicas de simulación. Estas técnicas podrían ofrecer soluciones cercanas al óptimo en tiempos razonables, lo que es crucial para la aplicabilidad práctica del modelo. Lo anterior (complejidad computacional), se potencia con otra limitante del modelo propuesto: la ausencia de decisiones de índole operacional y táctica. El modelo se centra en la ubicación estratégica de las estaciones de carga, pero no considera aspectos como los patrones de carga de los VEBs y los ciclos de recarga de las estaciones, particularmente si se basan en fuentes de energía renovable como paneles solares. Para mejorar la utilidad del modelo, resulta necesario extenderlo para incorporar estas dimensiones, lo que permitiría una planificación más integral y ajustada a las necesidades reales del sistema de movilidad eléctrica. Esta ampliación del problema redunda en decisiones más complejas y, por lo tanto, implica una mayor dificultad a la hora de abordarlo.

Por último, pero no menos importante, se evidencian otras dos limitantes importantes en el modelo propuesto: simplificación en el diseño de las estaciones de carga y calidad de los datos utilizados. En referencia al diseño de las estaciones de carga, se asumieron parámetros de carga estándar sin entrar en detalles sobre el diseño físico y tecnológico de las estaciones. Sin embargo, el diseño adecuado de las estaciones es un factor crucial que debe ser considerado al determinar su ubicación. En futuras investigaciones, sería importante integrar el diseño de estaciones dentro del proceso de optimización para garantizar que las soluciones propuestas no solo sean óptimas en términos de ubicación, sino también en funcionalidad y eficiencia. Por otra parte, respecto a la calidad de los datos utilizados, el caso de estudio realizado se basó en gran medida en datos aleatorios, lo cual limita la precisión y la relevancia de los resultados obtenidos. Si bien la generación de datos se basó en los resultados preliminares de una encuesta de movilidad activa, fue necesario generar información aleatoria debido a la falta de datos. Es evidente que la disponibilidad de datos más fehacientes y de alta calidad mejoraría significativamente la precisión del modelo y la aplicabilidad de sus resultados.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Se agradece a la Universidad Nacional de Rafaela por el financiamiento otorgado para la realización del proyecto que integra el presente trabajo, titulado "*Optimización de operaciones logísticas urbanas: desarrollo e implementación de herramientas de apoyo para la toma de decisiones en Rafaela y la región*". Res. Rectoral N°: 760/2023. N° expediente: 0013/2024.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a especialmente a la Secretaría de Investigación y Transferencia Tecnológica de la Universidad Nacional de Rafaela por los aportes y esfuerzos realizados para el normal desarrollo de las actividades de investigación relacionadas con el presente trabajo, como así también a los/as revisores/as por sus comentarios constructivos, los cuales ayudaron a clarificar los conceptos vertidos en el presente trabajo.

REFERENCIAS

Boeing, G. (2024). Modeling and Analyzing Urban Networks and Amenities with OSMnx. Dirección URL: <https://geoffboeing.com/share/osmnx-paper.pdf> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Chen, Y. W., Cheng, C. Y., Li, S. F., & Yu, C. H. (2018). Location optimization for multiple types of charging stations for electric scooters. Applied Soft Computing, 67, 519-528. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.038

Church, R., y Velle, C. R. (1974). The maximal covering location problem. Papers in regional science, 32(1), 101-118. https://doi.org/10.1007/BF01942293

Corti, F., Iacono, S. D., Astolfi, D., Pasetti, M., Vasile, A., Reatti, A., y Flammini, A. (2024). A comprehensive review of charging infrastructure for Electric Micromobility Vehicles: Technologies and challenges. Energy Reports, 12, 545-567. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.026

Current, J. R., y Storbeck, J. E. (1988). Capacitated covering models. Environment and planning B: planning and Design, 15(2), 153-163. https://doi.org/10.1068/b150153

He, S. Y., Kuo, Y. H., & Wu, D. (2016). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 67, 131-148. https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.003

IDSR (2019) [en línea]. Convenio específico de vinculación tecnológica UNRaf-Municipalidad de Rafaela. Dirección URL: <https://rafaelasustentable.com.ar/wp-content/uploads/2023/03/Convenio-entre-IDSR-y-UNRaf-Movilidad-5538.pdf> [consulta: 10 de agosto de 2024]

IDSR (2021) [en línea]. Convenio de promoción de movilidad sustentable. Dirección URL: <https://rafaelasustentable.com.ar/wp-content/uploads/2023/03/Convenio-entre-IDSR-y-Bertolaccini-S.A.-Movilidad-sustentable-6273.pdf> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Ignaccolo, M., Inturri, G., Cocuzza, E., Giuffrida, N., Le Pira, M., y Torrisi, V. (2022). Developing micromobility in urban areas: network planning criteria for e-scooters and electric micromobility devices. Transportation research procedia, 60, 448-455. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.058

Karp, R.M. (1972). Reducibility among Combinatorial Problems. In: Miller, R.E., Thatcher, J.W., Bohlinger, J.D. (eds) Complexity of Computer Computations. The IBM Research Symposia Series. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2001-2_9

Loustric, I., y Matyas, M. (2020). Exploring city propensity for the market success of micro-electric vehicles. European Transport Research Review, 12, 1-13. https://doi.org/10.1186/s12544-020-00416-8

Moschopoulou, A., Frantzeskakis, I., Grizos, K., y Vlachopanagiotis, T. (2023). Park-and-Ride: The Case for Coupling EV Charging Stations with Micro-mobility Hubs. In Conference on Sustainable Urban Mobility (pp. 29-49). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23721-8_3

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Obaideen, K., Sayed, E. T., Shehata, N., Alami, A. H., y Abdelkareem, M. A. (2023). Micromobility: Progress, benefits, challenges, policy and regulations, energy sources and storage, and its role in achieving sustainable development goals. International Journal of Thermofluids, 17, 100292. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100292

Patier, D., y Routhier, J. L. (2020). Urban logistics in the light of sustainable development: Still a long way to go. Transportation Research Procedia, 46, 93-100. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.168

Pedroza-Perez, D., Toutouh, J., y Luque, G. (2024). Redesigning road infrastructure to integrate e-scooter micromobility as part of multimodal transportation. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (pp. 1336-1344). https://doi.org/10.1145/3638529.3654142

Rosenthal, R. E. (2007) [en línea]. A gams tutorial. GAMS-A User's Guide. Dirección URL: <https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/gams_prirucnik%5B1%5D.pdf> [consulta: 10 de agosto de 2024]

Snyder, L.V. (2011). Covering Problems. In: Eiselt, H., Marianov, V. (eds) Foundations of Location Analysis. International Series in Operations Research & Management Science, vol 155. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7572-0_6

Tao, Y., Huang, M. H., Chen, Y. P., y Yang, L. (2021). Review of optimized layout of electric vehicle charging infrastructures. Journal of Central South University, 28(10), 3268-3278. https://doi.org/10.1007/s11771-021-4842-3

Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., y Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. Operations research, 19(6), 1363-1373. https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363

Wang, Y. W. (2007). An optimal location choice model for recreation-oriented scooter recharge stations. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 12(3), 231-237. https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.02.002

Wang, Y. W., & Lin, C. C. (2013). Locating multiple types of recharging stations for battery-powered electric vehicle transport. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 58, 76-87. https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.07.003

ANALYSIS OF THE LOCATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS IN THE CITY OF RAFAELA: A FIRST APPROACH

ABSTRACT This work presents a preliminary qualitative analysis of the feasibility of installing charging stations for shared electric vehicles (bicycles) in the city of Rafaela, considering different types of charging infrastructures, whether through various charging capacities or connection types (on-grid/off-grid). To address this challenge, a mixed-integer linear mathematical model is presented, which optimally determines the location and type of charging stations to be installed, minimizing total installation and operational costs while maximizing the city's coverage levels. Based on information collected through surveys that identify movement needs between different sectors of the city, a prototype case study is constructed to develop the relevant analysis. The results obtained from the model in the analyzed case study conclude that the installation of charging stations would not only reduce costs (installation and operational) while maximizing city coverage but also enable access for potential users of the shared electric vehicle system, promoting greater adoption of this technology in the city.

Keywords: electric vehicles, mathematical modeling, charging infrastructure, urban logistics, micro-mobility.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 81-92, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

TENDENCIAS EN LA GESTIÓN DE CURSOS DE AGUA URBANOS: CASO DE ESTUDIO "PROYECTO ARROYOS VIVOS RAFAELA"

Corina Aimo[1,4], Edgardo Pero[1,6], Rocío Cordero[2], Mauro Williner[3], Matías Martínez Sella[4], Ana Paula Rosillo[4], Claudia Visintini[5,6], Edgardo Pic[6], Darío Rossi[7], Alejandro Welschen[8]
[1]Centro de Investigación y Transferencia (CIT) Rafaela, Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
[2]Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño – Universidad Nacional de Córdoba (FAUD – UNC)
[3]Facultad de Arquitectura Planeamiento y Diseño – Universidad Nacional de Rosario (DAPyD– UNR)
[4]Acción de Defensa Animal y Protección Ambiental (ADAPA), Rafaela
[5]Takku Arboretum de Especies Nativas
[6]Club de Observadores de Aves (COA) Calandria Rafaela – Aves Argentinas
[7]Fundación Co-Crear
[8]Instituto de Ecología, Genética y Evolución de Buenos Aires (IEGEBA) – CONICET
Tel. 03492 - 501155 – e-mail: corinaaimo@santafe-conicet.gob.ar

RESUMEN: En la ciudad de Rafaela se han venido ejecutando obras públicas de revestimiento y entubado en sus cursos de agua pluviales, que se encuentran conectados a la red hídrica de arroyos naturales. Estos proyectos van en línea con el antiguo paradigma preponderante del siglo XX en el manejo de los cursos de agua urbanos, que consistía en rectificaciones y canalizaciones de ríos mediante grandes obras civiles, con el fin de permitir un drenaje rápido y completo del agua. En las últimas décadas, muchas ciudades en diferentes partes del mundo, con una visión de futuro sobre sus desarrollos urbanos, están tendiendo a dejar de entubar los arroyos y ríos urbanos; más aún, se evidencia una propensión a desentubarlos. Estas prácticas son un cambio de paradigma desde una mirada de infraestructura gris, centrada exclusivamente en la funcionalidad hidráulica, a una más integral y socio-ecosistémica de infraestructura azul-verde (Blue-green infrastructure), basada en revalorizar el contacto con los ecosistemas acuáticos y todos los beneficios que tienen para la sociedad. En este trabajo se presentan antecedentes del nuevo paradigma, y avances y resultados preliminares desarrollados en el marco de un proyecto impulsado por organizaciones civiles y académicas, cuyo principal objetivo es generar y revitalizar espacios verdes de calidad asociados a los cursos de agua de la ciudad de Rafaela. Las principales conclusiones subrayan la importancia de adoptar un enfoque integral que combine esfuerzos de restauración ecológica con educación ambiental y participación ciudadana, para lograr una gestión sostenible de estos espacios.

Palabras clave: rehabilitación, infraestructura azul-verde, restauración ecológica y planificación urbana.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se ha llegado a un nivel de reconocimiento relevante sobre los cambios ambientales abruptos, y en ocasiones irreversibles, que muchas actividades humanas pueden ocasionar (Steffen et al., 2015). Las sociedades enfrentan serios desafíos que derivan del cambio climático, tales como extremos meteorológicos, el mantenimiento de la seguridad alimentaria, la provisión de agua segura y un mayor riesgo de desastres naturales y pandemias.

Durante el siglo XX, el enfoque predominante en la gestión de cursos de agua urbanos se centró en una visión puramente hidráulica. Esto implicaba intervenciones como el entubado y revestimiento de arroyos

y ríos en las ciudades, con el objetivo principal de facilitar un drenaje rápido de las precipitaciones. Si bien estas medidas lograron proteger contra inundaciones y reducir vectores de enfermedades, también generaron consecuencias negativas, como la torrencialización de los cursos de agua aguas abajo, la disminución de la recarga natural de napas freáticas, la interrupción e invisibilización de corredores verdes, y la pérdida de beneficios ecosistémicos (Booth et al., 2015).

En las últimas décadas, muchas ciudades en diferentes partes del mundo han ido abandonando el viejo paradigma hidráulico de infraestructuras grises para dar paso a uno socio-ecosistémico, basado en revalorizar el contacto con los ecosistemas acuáticos para aprovechar todos los beneficios que tienen para la sociedad, el ambiente y la biodiversidad. Esta transición hacia el concepto de infraestructuras azul-verde implicó dejar de entubar y revestir los arroyos y ríos urbanos y hasta en algunos casos revertir dichas obras. Dicha tendencia fue impulsada principalmente debido a los desafíos urgentes que la humanidad tiene en el siglo XXI con respecto al manejo integral de los ecosistemas y, en particular, a la lucha contra el cambio climático. Estas iniciativas, que consisten en la rehabilitación y en ocasiones en la remediación de los cursos de agua (Feijoó et al. 2021), buscan mejorar la calidad de vida de los habitantes, promover la biodiversidad en las ciudades, mejorar la calidad del agua por purificación biológica natural, fomentar la actividad física y crear entornos urbanos más atractivos y sostenibles, en resumen, mantener e incrementar el acceso de las personas a servicios ecosistémicos (SE).

Diferentes reportes e informes de organismos internacionales han destacado la relación entre el bienestar humano y la integridad de los ecosistemas (Rice et al., 2018) y consideran al concepto de SE como clave para analizar esta relación. Por ejemplo, los ecosistemas de agua continental brindan una amplia gama de SE que contribuyen al bienestar humano, tales como la provisión de alimento (peces) y fibras; abastecimiento y purificación de agua; regulación del clima y de caudales; recreación y turismo. Sin embargo, en los últimos años se ha determinado que un 80 % de la población mundial está expuesta a altos niveles de amenaza para la seguridad del agua de consumo y existen hábitats asociados a un 65 % de los sistemas fluviales continentales clasificados como moderados a altamente amenazados (Vörösmarty et al., 2010). Entre los objetivos de la Agenda del Desarrollo Sustentable 2030 de las Naciones Unidas (ONU) se incluye asegurar la disponibilidad, el acceso a agua segura y el manejo sustentable de la misma y para ello uno de los sub-objetivos planteados es restaurar ecosistemas relacionados al agua, entre ellos bosques, humedales y ríos. En ese marco, la ONU ha declarado la década de la restauración de ecosistemas al decenio 2021-2030. La restauración ecológica (RE) es el proceso de asistencia a un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido (SER, 2004). El objetivo de este proceso es recuperar la estructura, funcionamiento, diversidad y dinámica del ecosistema especificado. La RE de ecosistemas fluviales y sus riberas puede ser una opción de SBN para la resolución de diversos problemas en sistemas socioecológicos asociados a las ciudades, como por ejemplo inundaciones, pérdida de suelo por erosión de márgenes, contaminación del agua, entre otros.

En los últimos años, han surgido estudios principalmente en el Norte Global (NG) sobre los ecosistemas fluviales (ríos, arroyos y canales) que atraviesan zonas urbanas (Walsh et al, 2005; Booth et al., 2015). En general, se han determinado una serie de cambios en los ecosistemas fluviales producto de su paso por las zonas urbanas, los cuales en conjunto se han denominado como “Síndrome de Ríos Urbanos”. Este síndrome incluye crecidas más fuertes, elevada concentración de nutrientes y contaminantes, alteraciones de la morfología del canal, reducción de la riqueza biológica con incremento de la dominancia de especies tolerantes y principalmente reducción en la absorción de nutrientes por parte de las comunidades biológicas. Sin embargo, los factores causantes de estos cambios ambientales pueden variar en gran medida entre las diferentes regiones climáticas y geográficas del planeta (Hale et al., 2015).

En el Sur Global (SG), los ríos urbanos han sido poco estudiados. Un trabajo pionero en la temática es el de Wantzen et al (2019), en el que se presenta una revisión cualitativa detallada sobre la situación en Sudamérica, aplicando una versión ampliada del enfoque DPSIR (Sigla en inglés de: Fuerzas Motrices, Presiones, Estado, Impacto y Respuestas). Este estudio subraya la necesidad de continuar investigando los ríos y arroyos urbanos en nuestra región, no solo para mejorar la gestión y calidad de vida en las

ciudades, sino también para enriquecer el conocimiento sobre el funcionamiento de estos ecosistemas en diferentes contextos locales.

Partiendo de esta premisa, los objetivos de este trabajo son:

- Presentar experiencias internacionales en proyectos de restauración de cursos de agua urbanos, con un enfoque especial en la situación de nuestra región.
- Analizar el caso de estudio de la ciudad de Rafaela, donde se está desarrollando el proyecto interorganizacional "Arroyos Vivos Rafaela (AVR): Revalorización Ambiental y Social del Paisaje Fluvial Urbano".
- Promover el estudio de esta temática en la Provincia de Santa Fe y proponer enfoques y protocolos de acción para la resolución de problemas.

Este trabajo pretende articular información clave para analizar la situación de los cursos de agua urbanos en nuestra región y destacar las acciones en el marco del proyecto AVR. En una ciudad como Rafaela, donde predomina una concepción puramente hidráulica del manejo de los cursos pluviales, este proyecto representa una novedad al fomentar un enfoque de restauración ecosistémica a través de un esfuerzo colectivo entre diversos actores sociales.

METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo se basa en una revisión bibliográfica sobre el tema, opiniones de expertos de diferentes disciplinas como la biología, la ingeniería, la geografía social, la arquitectura y la planificación urbana. Además, el proyecto AVR está basado en numerosos debates y reuniones con los diversos actores claves involucrados: organizaciones civiles socioambientales de Rafaela y la región, docentes investigadores, ciudadanos/as particulares y profesionales involucrados en la temática y personal técnico y político del gobierno municipal.

RESULTADOS

Proyectos pioneros a nivel mundial

Existen numerosos proyectos de restauración de cursos de agua urbanos, cuyos objetivos principales han sido sanearlos, generar un ambiente verde y sano e incrementar la biodiversidad en torno a los mismos. En la Tabla 1 se resumen algunos casos de éxito con las correspondientes referencias.

Tabla 1: Listado de proyectos de restauración de cursos de agua urbanos.

Lugar	Periodo	Breve descripción del proyecto	Referencia
California, Estados Unidos	1984	Es considerado un caso pionero de restauración de arroyos, impulsado por el paisajista Douglas Wolfe. El proyecto consistió en transformar un patio ferroviario abandonado en un parque natural, liberando al arroyo "Strawberry Creek" en Berkeley, California. El parque cuenta con canchas de juego, colinas ajardinadas, prados verdes, árboles nativos y 60 metros de arroyo natural.	(Pinkham, 2000).
Valencia, España	1980-actualidad	Se realizó un proceso de limpieza y descontaminación del Río Turia, y se creó un nuevo cauce de 12 kilómetros. El antiguo cauce del río Turia fue transformado en el Jardín del Turia, un extenso parque lineal de 9 km que recorre la ciudad de Valencia.	(Pita da Veiga y Nogueira)
Madrid, España	1990 - actualidad	Recuperación de costas del Río Manzanares construyendo un gran parque lineal. Se plantaron 34.000 nuevos árboles y 471.000 nuevos arbustos, y se lograron 211.000 m^2 de pradera.	(Pita da Veiga y Nogueira; Gobierno de España)
Bilbao, España	1990 - actualidad	Restauración y creación de un parque lineal aledaño al Río Nervión, lo que logró reactivar el empleo y el turismo.	(Pita da Veiga y Nogueira; Pouso, 2020)

Sheffield, Inglaterra	1990-2000	Restauración del Río Porter Brook para devolverle su valor ecológico, aumentar la biodiversidad y crear un entorno más saludable para la vida acuática y las comunidades locales.	(The Sheaf and Porter Rivers Trust)
Munich, Alemania	2000-2011	Se eliminaron las estructuras de canalización de un tramo de 8 km del Río Isar, para su rehabilitación. Para la playa pública se instalaron plantas de tratamiento con luz ultravioleta. Resultados muy positivos con el río totalmente integrado en la ciudad.	(Porta, 2013)
Ontario, Canadá	2002-actualidad	Gestión integral y adaptativa de planificación y diseño para la gestión de cursos de agua en la provincia de Ontario.	
Seúl, Corea del Sur	2003-2005	Se recuperó y restauró el Río Cheonggyecheon, que había sido entubado y recubierto con una autopista. Resultó ser un proyecto ejemplar a nivel mundial de planificación estratégica y renovación urbana sobre las bases de historia, cultura y naturaleza.	(Shin y Lee, 2005, 2006; Sadik-Khan, 2014)

Situación en Sudamérica

La situación de los humedales y arroyos urbanos en los países del Sur Global (SG) revela un enfoque predominantemente hidráulico, centrado en la gestión de escorrentías y el vertido de aguas residuales, en su mayoría no tratadas. Estos ecosistemas de agua dulce, que originalmente proporcionaban servicios ecosistémicos como transporte, alimento y suministro de agua, son ignorados o eliminados en los planes de desarrollo urbano a medida que las ciudades se expanden. Como resultado, muchos de estos cuerpos de agua han sido transformados en canales de hormigón o embalses, incluso hay casos que han sido enterrados y cubiertos por asfalto para dar paso a infraestructuras de transporte. Las orillas se usan como vertederos, y las comunidades cercanas, y generalmente más pobres, perciben estos lugares de manera negativa debido al mal olor, la apariencia del agua y la posibilidad de albergar vectores de enfermedades (Wantzen et al., 2019; Walteros y Ramírez, 2020).

Los principales hallazgos del artículo de revisión de (Wantzen et al., 2019) son: i) los cursos de agua del SG enfrentan un "síndrome del hidrosistema urbano del sur" único debido a un entorno distintivo en cuanto aspectos geográficos y sociopolíticos, lo que implica desarrollar enfoques de restauración innovadores, creativos e interdisciplinarios. ii) Las restauraciones exitosas en estos contextos requieren no solo soluciones técnicas, sino también la participación y aceptación de las comunidades locales, vinculando la restauración a beneficios culturales y de salud pública. iii) Además, se sugiere que, al integrar la "cultura fluvial" en la planificación, se puede revitalizar la relación entre las personas y los ríos, promoviendo una identidad urbana que respete y valore los ecosistemas acuáticos. iv) Finalmente, se destaca la importancia de documentar y analizar proyectos de restauración en esta región para fomentar un intercambio de conocimientos y soluciones a nivel global, subrayando la necesidad de integrar la sostenibilidad ambiental y social en la gestión de estos ecosistemas para evitar su deterioro futuro y mejorar la calidad de vida de las comunidades ribereñas. En este trabajo se podrá encontrar un análisis enfocado a proyectos de restauración aplicados principalmente en Brasil. En el presente documento, con el objetivo de regionalizar aún más el análisis de antecedentes, presentaremos dos proyectos de restauración de cursos de agua urbanos en desarrollo de Argentina: Proyecto Hábitat Claypole y Parque-Canal Arroyo “El Gato” La Plata.

Proyecto Hábitat Claypole Claypole, Arroyo San Francisco, Argentina

El crecimiento descontrolado del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) en las últimas seis décadas ha generado graves problemas ambientales, especialmente en los cuerpos de agua, como el arroyo San Francisco en Claypole, que ha sufrido modificaciones drásticas y contaminación. La situación alcanzó un punto crítico en 2007 con una grave inundación que causó una muerte y movilizó a la comunidad a exigir soluciones. A partir de las movilizaciones vecinales, se delineó el "Proyecto Hábitat Claypole" (PHC) para abordar las inundaciones mediante la preservación de espacios verdes, la construcción de reservorios de agua, la reforestación con plantas nativas, la limpieza del arroyo y la evitación de su canalización. El proyecto también promueve la participación comunitaria en el manejo del arroyo.



Figura 1: Estado actual del arroyo San Francisco, Claypole Argentina, y regreso de aves acuáticas.

En 2017, se formó la "Asamblea Basta de Inundaciones Claypole" y el consolidó el PHC, con el objetivo de crear corredores verdes urbanos, establecer un humedal para mitigar las inundaciones y desarrollar una Reserva Ecológica-Deportiva. Se ha trabajado en conjunto con la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la UBA, el Instituto Nacional del Agua (INA) y la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Buenos Aires (Argentina.gob, 2022). El proyecto ha seguido creciendo y consolidándose, con actividades de mantenimiento de plantas nativas, intervención en los campos y construcción de infraestructura. Se busca la participación activa de la comunidad en la planificación y construcción de un mejor hábitat en Claypole (ver @proyectohabitatclaypole).

Parque-Canal Arroyo "Del Gato" La Plata, Buenos Aires

Existen muchos proyectos en torno a este arroyo, cuyos objetivos son la construcción y aplicación de propuestas de valoración e intervención, para contribuir a la formulación de estrategias de tratamiento integral del caso de estudio y generar aportes para otras cuencas de la Región Metropolitana de Buenos Aires (Rotger, 2017). La propuesta de intervención de Sessa et al., (2018) consiste en la instalación de un espacio verde en un tramo canalizado del Arroyo dentro del ejido urbano. Este espacio funcionará canalizando de manera superficial las aguas de lluvias, permitiendo obtener espacios inundables controlados cuyas superficies, una vez retiradas las aguas, se utilizan como áreas verdes de uso público. El proyecto pretende aminorar los efectos negativos que genera el hormigonado de cauces de cursos fluviales.



Figura 2: Propuesta de intervención de vivienda colectiva y espacio público. Elaboración: Laboratorio de Investigación LITPA – FAU – UNLP

Contexto y análisis de situación del caso de estudio

La ciudad de Rafaela está ubicada en la llanura Chaco-Pampeana sobre una unidad geomorfológica conocida como el Bloque de San Guillermo que es caracterizada por su planicie con escasa pendiente y propensa a anegamientos en las depresiones del terreno. Históricamente, la ciudad ha optado por construir canales artificiales en casi toda su superficie, ya que la actividad principal es la agrícola - ganadera y se buscó eliminar el problema de los anegamientos en época de lluvias. La ciudad cuenta con varios canales pluviales (Canal Noroeste, Canal Norte, Canal Brasil, y Canal Sur), construidos para drenar rápidamente el agua durante las precipitaciones.



Figura 3: Bloque Geomorfológico de San Guillermo. Derivación del Canal Sur en el Arroyo natural Las Prusianas.

El Canal Sur se construye con la finalidad de recoger y escurrir las aguas del bajo Amancay, una zona naturalmente deprimida del terreno ubicada al sudoeste de la ciudad, en donde se producía el almacenamiento de excedentes hídricos superficiales. Hoy este canal, al igual que el resto, se conecta a la red hídrica natural, elimina de manera rápida el agua que llega de las lluvias y donde antes había un microhábitat asociado a suelos momentáneamente anegados (bajos y cañadas), hoy se redujo gran parte de la flora y fauna asociada.



Figura 4: Obra de entubado tipo cajón y revestimiento del Canal Sur en el tramo que atraviesa el predio del Club Sportivo Ben Hur, de la ciudad de Rafaela.

Cuando comenzó el desarrollo industrial de la ciudad, los canales se convirtieron en el lugar destinado a recibir los efluentes de las industrias. Los procesos de urbanización también han avanzado sobre ambos canales. De este modo, la contaminación empezó a construirse no solo como un problema ambiental, sino también como una problemática social. El Canal Norte es el epicentro de un histórico problema de contaminación, que afecta a la ciudad de Rafaela desde hace más de 30 años. Actualmente, la principal fuente de contaminación en este curso pluvial tiene que ver con el desecho de basura sólida urbana y por conexiones clandestinas para el desecho de efluentes cloacales.

Desde su creación hasta la actualidad los canales han sido intervenidos con considerables obras civiles de revestimiento y entubado en relación con el rol funcional que se le otorga dentro del ejido urbano. La obra más reciente fue realizada durante el 2023 en el tramo del Canal Sur cercano Club Sportivo Ben

Hur; según lo informado por el gobierno local a los medios, los objetivos de esta obra fueron "sanear" el espacio verde de la ciclovía, mejorar el escurrimiento del agua y prevenir la probabilidad de desmoronamientos en una zona puntual a las cercanías del club.

Estas intervenciones continúan reflejando un enfoque tradicional de infraestructura gris, característico del siglo pasado, que prioriza la funcionalidad hidráulica por sobre la sostenibilidad ecológica. Sin embargo, el entubamiento o revestimiento de los canales no garantiza la reducción de los efluentes contaminantes que circulan por la ciudad. Las aguas que atraviesan varios barrios están a menudo expuestas a rotura de desagües con una consecuente contaminación posterior con efluentes cloacales, sumado a la detección de niveles elevados de poblaciones de bacterias coliformes, y la constante contaminación por residuos sólidos, lo que plantea serios desafíos tanto para la salud pública como para la protección del medio ambiente. Tal como se presentó anteriormente, en las últimas décadas, muchas ciudades en diferentes partes del mundo, con una visión de futuro sobre sus desarrollos urbanos, están tendiendo a dejar de entubar los arroyos y ríos urbanos; más aún, se evidencia una propensión a desentubarlos, debido principalmente a los desafíos urgentes que la humanidad tiene en el siglo XXI con respecto al manejo integral de los ecosistemas y, en particular, a la lucha contra el cambio climático. Estas prácticas son un cambio de paradigma desde una mirada de infraestructura gris, centrada exclusivamente en la funcionalidad hidráulica, a una de socio-ecosistemas, basada en revalorizar el contacto con los ecosistemas acuáticos y todos los beneficios que tienen para la sociedad. En ese sentido, se desarrolló la propuesta de gestión integral y ecosistémica de los cuerpos de agua pluviales que circulan y atraviesan la ciudad de Rafaela, cuyos objetivos y plan de trabajo se presentan en la siguiente sección.

Objetivos del proyecto y plan de trabajo

Sobre la base de los antecedentes descritos y referenciados anteriormente, que consisten en proyectos de rehabilitación de cursos de agua urbanos cuyos resultados demostraron brindar múltiples beneficios ambientales y sociales, además de lograr acciones efectivas de mitigación contra el cambio climático, se plantea como objetivo del presente documento generar y renaturalizar espacios verdes de calidad asociados a los cursos de agua urbanos en la Ciudad de Rafaela, sobre la base del cuidado ambiental y la conservación de la biodiversidad.
En este marco, los objetivos generales son:

- Mitigar la contaminación urbana de los cursos de agua que atraviesan la Ciudad de Rafaela.
- Diseñar, crear e implementar espacios verdes asociados a los cursos de agua urbanos.
- Conservar y aumentar la biodiversidad acuática y de ribera en cursos de agua urbanos.
- Promover prácticas de convivencia ciudadana respetuosas del ambiente y la biodiversidad urbana.

Objetivos específicos:

1. Generar un diagnóstico a partir de una evaluación de la calidad ecológica (química y biológica) del agua de cursos fluviales urbanos (arroyos y canales) en zonas con márgenes de ribera en diferentes estados de conservación y de calidad (márgenes de ribera en buena, mediana calidad o degradados).
2. Realizar un censo de aves acuáticas y asociadas a los cursos fluviales urbanos de Rafaela.
3. Estimar servicios ecosistémicos brindados por la vegetación de ribera en cursos de agua urbanos e identificar los beneficios producidos para la comunidad rafaelina.
4. Mapear los cursos de agua urbanos y sus márgenes de ribera, clasificar sus tramos de acuerdo con su calidad ecológica para poder establecer áreas con necesidad de restauración ecológica.
5. Identificar la situación de la propiedad de terrenos en los márgenes de ribera de los cursos pluviales urbanos.
6. Proponer proyectos de restauración ecológica para las áreas con márgenes de ribera degradados y analizar su factibilidad.
7. Incorporar Soluciones Basadas en la Naturaleza como los humedales construidos para mejorar la calidad del agua.
8. Realizar talleres de educación ambiental y difusión gráfica y web sobre la biodiversidad de ríos urbanos y la problemática de su contaminación.

Plan de trabajo

1. Objetivo específico 1: Colecta de datos y muestreo en los sitios seleccionados a través de trabajo de campo realizando una visita en cada estación hídrica (aguas bajas y aguas altas) durante el año de

duración del proyecto. En cada visita se colectarán 3 muestras cuantitativas (red Surber de 0,25 mm) y 1 cualitativa (red D y de pateo). Las muestras de bentos serán procesadas e identificadas a nivel de género en laboratorio utilizando microscopio estereoscópico y guías regionales de identificación [25]. En cada sitio se relevará la vegetación de ribera a través de transectas paralelas al cauce principal de los ríos (2 por sitio) registrando la identidad (especie), altura y perímetro a la altura del pecho de cada espécimen leñoso. Se calculará el índice de calidad de bosque de ribera adaptado para la región [26] a fin de determinar la calidad y estado de conservación de los márgenes de ribera de cada sitio. En cada sitio además se registrarán diferentes variables ambientales: físico-químicas (temperatura del agua, pH, conductividad eléctrica, turbidez, total de sólidos disueltos, oxígeno disuelto, concentración de sales inorgánicas, concentración de nutrientes, metales pesados y análisis bacteriológicos); e hidrológicas (caudal, potencia y ancho del área de inundación).

2. Objetivo específico 2: Se realizarán transectas de avistamiento de aves en los tramos y sitios de los canales y arroyos a visitar. En grupos de 4 o 5 personas se recorrerán los tramos de arroyo o canal en un tiempo determinado contabilizando la cantidad de especies de aves identificadas y un estimado de sus abundancias (cantidad de avistamientos). Se realizarán visitas a los sitios en cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante un año para tener representada la variabilidad estacional. Luego se analizarán los datos obtenidos a través de curvas de rango-abundancia para analizar la estructura y composición de los ensambles de aves en cada sitio.

3. Objetivo específico 3: Estimar servicios ecosistémicos brindados por la vegetación de ribera en cursos de agua urbanos e identificar los beneficios producidos para la comunidad rafaelina. Según las clasificaciones actuales de servicios ecosistémicos provistos por cuerpos de agua y vegetación ribereña se enlistan los principales identificados para zonas urbanas. Con esa información se diseñará una encuesta de valoración para realizar a vecinos/as de la ciudad, cercanos a los canales y arroyos y alejados de los mismos para evaluar la valoración vecinal de estos ecosistemas según la distancia a la que viven de los mismos y poder contar con una aproximación a la opinión vecinal.

4. Objetivo específico 4: Mapear los cursos de agua urbanos y sus márgenes de ribera, clasificar sus tramos de acuerdo a su calidad ecológica para poder establecer áreas con necesidad de restauración ecológica. Una vez recolectados y analizados los datos de calidad ambiental (agua, invertebrados, vegetación y aves) se clasificarán los sitios evaluados según índice integral que abarque todos los aspectos evaluados. Luego, a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG, QGis) y la plataforma *Google Earth Engine* (https://earthengine.google.com/) se realizará un mapa de la ciudad y sus cuerpos de agua fluviales clasificados según la categorización previa en base a su calidad ambiental. Se identificarán zonas de mayor y menor calidad ambiental y zonas con necesidad de restauración o rehabilitación.

5. Objetivo específico 5: plantear actividades enfocadas en la investigación, recopilación de información y mapeo de los terrenos ubicados en los márgenes de ribera de los canales, incluyendo el uso actual de la tierra, su titularidad, condiciones legales y restricciones existentes. Establecer diálogos con los propietarios y las comunidades cercanas, gestionar conflictos y alcanzar acuerdos para comprender sus necesidades, intereses y preocupaciones, e involucrarlos en el proceso de revalorización de estos espacios. Integrar toda esta información en un plan territorial que asegure un desarrollo coherente y sostenible en las zonas de los canales y sus márgenes de ribera. Asimismo, considerar la creación de áreas protegidas para su restauración y conservación para amparar la biodiversidad y la calidad ambiental. Integrar estas actividades en un marco Colaboración Interinstitucional, trabajando en conjunto con autoridades locales, instituciones gubernamentales, instituciones civiles no gubernamentales y organizaciones privadas.

6. Objetivo específico 6: Proponer proyectos de restauración ecológica para las áreas con márgenes de ribera degradados y analizar su factibilidad. En base a los diagnósticos y mapas realizados se planificará una propuesta de restauración ecológica para los sitios evaluados. Para la misma se seguirán los estándares y principios de restauración de ecosistemas establecidos por la Sociedad Internacional para la restauración ecológica y la ONU Decana de la Restauración 2021-2030 [27].

7. Objetivo específico 7: Las actividades para incorporar Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) son las siguientes: Diseño y construcción de humedales artificiales en diferentes puntos de los canales para filtrar y purificar el agua, eliminando contaminantes y mejorando su calidad. En torno a estos desarrollos realizar monitoreo regular de la calidad del agua para medir la efectividad de los humedales construidos. Organización de jornadas de limpieza y gestión de residuos en los canales para reducir la contaminación y mejorar la salud del ecosistema acuático. Reforestación promoviendo la plantación de vegetación ribereña nativa en las orillas de los canales para estabilizar los bancos, reducir la erosión, proporcionar refugio para la fauna local y mejorar la calidad del agua. Planificación y desarrollo coherente con la preservación ambiental de senderos y áreas recreativas a lo largo de los canales para fomentar el acceso público y la conexión con la naturaleza, alentando a la comunidad a disfrutar y cuidar estos espacios. Impulsar actividades educativas y de investigación y desarrollo para mejorar las técnicas de restauración y manejo de los cursos de agua urbanos con enfoque en SBN.

8. Objetivo específico 8: Talleres educativos: Paralelamente y en coordinación con las tareas de investigación, se llevarán adelante talleres educativos en escuelas cercanas a los sitios de muestreo. Los talleres consisten en entre tres o cuatro encuentros con estudiantes entre los cuales se incluyen salidas de campo para colecta de invertebrados acuáticos y posterior identificación en el aula con lupas y guías de identificación de uso sencillo para calcular de forma muy sencilla un índice de calidad ecológica del agua de ríos y arroyos (http://ibn-conicet.gob.ar/recursos-didacticos/). De esta manera se espera empoderar a los/as estudiantes y docentes a fin de que ellos/as mismos/as sean capaces de monitorear la calidad del agua de ríos, arroyos o canales cercanos a sus escuelas y/u hogares. Este monitoreo podrá ser coordinado y facilitado por los/as investigadores/as del proyecto para asegurar su continuidad y articular los datos registrados en las distintas áreas. Se realizarán también talleres de avistaje de aves para profundizar el conocimiento de la fauna local y monitorear sus poblaciones.

IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO: AVANCES Y ESPECTATIVAS

Acciones realizadas

Diversas organizaciones civiles ambientales, ciudadanos y profesionales venían expresado desde hace tiempo su preocupación por el estado y tratamiento de los cursos de agua en la Ciudad de Rafaela, preocupación que se fue profundizando con el inicio de las obras de entubado y revestimiento de ambos canales de la ciudad. El primer indicio de desarrollo de un proyecto colectivo comenzó con una actividad de observación de aves en la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf), donde se encontraron los primeros actores claves para impulsar el proyecto.

En abril de 2023, se inició la formulación de un proyecto formal para presentar al municipio como un trabajo conjunto entre Club de Observadores de Aves de Rafaela (COA Calandria), Acción de Defensa Animal y Protección Ambiental (ADAPA) e investigadores del Centro de Investigación y Transferencia de Rafaela (CIT, UNRaf - CONICET). El 16 de septiembre de 2023 se llevó a cabo un operativo de limpieza del Canal Norte en el marco del Día Mundial de la Limpieza. Esta actividad atrajo a más organizaciones al proyecto, como la Fundación Co-crear y Arboretum Takku. Además, para esta actividad participaron activamente la vecinal del barrio Virgen del Rosario, vecinas/os, la Escuela Laboral N° 2082 brindando todas las herramientas necesarias para el operativo, y un trabajador autónomo que ofreció su camión para transportar la basura, mientras que la municipalidad facilitó un contenedor. En esta jornada, se extrajeron dos toneladas de basura del canal con la participación de 20 a 30 voluntarios, trabajando de 14 a 18 horas. La logística proporcionada por el camión fue crucial, ya que un solo contenedor no habría sido suficiente. Esta actividad recibió amplia difusión en los medios de comunicación, convirtiéndose en un punto de inflexión en la consideración del proyecto por parte de las autoridades gubernamentales. La limpieza expuso nuevamente, después de varios años, la situación crítica del Canal Norte y los barrios adyacentes, poniendo sobre la mesa nuevamente el potencial problema de salud pública debido a la gran cantidad de basura sólida urbana arrojada al canal y el estado del agua.



Figura 5: Operativo de limpieza del Canal Norte impulsado por las organizaciones civiles socioambientales.

El 17 de noviembre de 2023 investigadores del CIT Rafaela y representantes de las organizaciones civiles presentaron el proyecto "Arroyos Vivos" en la última reunión del Consejo Ambiental de la municipalidad de Rafaela. En dicha reunión se contó con la presencia de representantes de diversas organizaciones que conforman el consejo, autoridades políticas y personal técnico de la municipalidad del área de medio ambiente. El 29 de diciembre del 2023 se llevó a cabo el primer "Taller de Mapeo Socioambiental Colectivo" entre las organizaciones impulsoras del proyecto. En este taller se realizó un relevamiento de actores clave, intereses y expectativas de la situación. Finalmente, se elaboró un plan de acción para el año siguiente.

Durante los primeros meses de 2024, con el cambio de gobierno, se iniciaron nuevas tratativas para analizar la posibilidad de implementar el proyecto como una colaboración entre el estado, organizaciones civiles, académicas y la ciudadanía. Se llevaron a cabo varias reuniones con diversas áreas de la municipalidad, gracias a la apertura e interés de funcionarios puntuales del Instituto para el Desarrollo Sustentable (IDSR), quienes facilitaron la presentación de las ideas del proyecto al personal de las áreas de ambiente, desarrollo urbano y obras públicas. El 23 de abril de 2024 se presentó el proyecto en el evento internacional "The Nature of Cities Festival". El domingo 5 de mayo de 2024 se organizó un "Taller de Debate Ambiental" en la vecinal del barrio Virgen del Rosario, seguido de una plantación de 25 ejemplares de timbó en la plaza.

Durante todo este período, las distintas organizaciones continuaron cooperando en diversas actividades para alcanzar los objetivos del proyecto, tales como censos de aves, muestreo y análisis (físico-químico, bacteriológico y biológico) de los cursos de agua en Rafaela y otros sitios de la cuenca, a través de la articulación con otro proyecto de investigación (Restauración de ecosistemas ribereños de la cuenca lechera del Espinal santafesino en busca de su sustentabilidad: diagnóstico socio-ambiental, UNRaf Expediente Nº 0036/2024) para potenciar el enfoque de cuenca hídrica en ambos proyectos. También se realizo difusión en redes sociales, medios de comunicación y entornos educativos y académicos. Esta colaboración ha dado lugar a la creación de la "Red Ambiental del Oeste Santafesino", con el objetivo de unir los esfuerzos atomizados de diversas ONGs, particulares y profesionales de la región para alcanzar objetivos comunes en torno al cuidado de la naturaleza y los ecosistemas.

Expectativas y potencial impacto

Se espera poder aplicar acciones concretas comenzando por zonas pilotos de los Canales Norte y Sur de la Ciudad de Rafaela en el marco de un convenio entre CONICET, las organizaciones civiles impulsoras y la municipalidad. La concreción de un convenio de este tipo permitirá definir un plan de trabajo claro, establecer los equipos responsables, y formalizar las acciones, responsabilidades y el seguimiento del proyecto, asegurando así una ejecución eficiente y coordinada. Además, se espera que la experiencia acumulada durante el desarrollo de este proyecto sirva como base para:

- Elaboración de un Protocolo de Acción: Consolidar toda la información generada en un "protocolo de acción" que guíe el desarrollo de proyectos de restauración y rehabilitación de cursos de agua urbanos, abarcando aspectos técnicos, ambientales y sociales.
- Coordinación y Unificación de Criterios: Colaborar con grupos de investigación y organizaciones regionales para estandarizar la recolección de datos y metodologías, así como diseñar

indicadores que permitan generar conjuntos de datos integrales. Esto facilitará el desarrollo de análisis cuantitativos y la creación de herramientas precisas para la evaluación, predicción y toma de decisiones estratégicas.

CONCLUSIONES

El proyecto de rehabilitación de los cursos de agua en Rafaela se erige como una respuesta integral a la problemática ambiental que afecta a la ciudad. Iniciado en el ámbito de la sociedad civil y luego fortalecido por la colaboración con el ámbito académico, el proyecto ha logrado un primer posicionamiento en la agenda política local, impulsando una alternativa de tratamiento más sostenible de los cuerpos de agua urbanos. Los antecedentes estudiados subrayan la necesidad de adoptar enfoques integrados y colaborativos que involucren a las comunidades locales, organizaciones civiles y a las autoridades locales, integrando la educación ambiental y la participación ciudadana en los proyectos de gestión de recursos naturales, con el fin de garantizar su sostenibilidad a largo plazo. La evaluación de la calidad del agua, junto con el censo de aves acuáticas y la estimación de los servicios ecosistémicos, permitirá identificar áreas prioritarias para la restauración, desarrollar estrategias efectivas de intervención y calcular indicadores de mejora. El Proyecto Arroyos Vivos Rafaela busca equilibrar las necesidades hidráulicas con la preservación ambiental, promoviendo un enfoque que integra lo técnico, lo social y lo ambiental. La aplicación de estas estrategias en zonas piloto, en el marco de convenios formales, permitirá generar datos e indicadores que fortalezcan la base científica y técnica para futuros proyectos similares, contribuyendo así al estudio y manejo de los cursos de agua en la región y Sudamérica.

REFERENCIAS

Booth, D. B., Roy, A. H., Smith, B., & Capps, K. A. (2016). Global perspectives on the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, *35*(1), 412-420.

Feijoó, C., Giorgi, A., & F. Sabater. (2021). Teoría de la restauración fluvial, 121-136. En: Feijoó (Ed) .2021. Conservación, Manejo y Restauración de Sistemas Fluviales. Una aproximación ecológica. 1era edición, Lujan: Libros del INEDES. 182 pp.

Hale, R. L., Scoggins, M., Smucker, N. J., & Suchy, A. (2016). Effects of climate on the expression of the urban stream syndrome. *Freshwater Science*, *35*(1), 421-428.

Restauración fluvial del Río Manzanares en el entorno del Real Sitio de El Pardo [En línea], Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Dirección URL:< https://restauracionfluvialriomanzanares.es/>

Naciones Unidas 2018. The 2030 Agenda for Sustainable Development. A/Res/70/1.

Pinkham, R. (2000). Daylighting: new life for buried streams. 1° Edición, Rocky Mountain Institute, Old Snowmassss, Colorado.

Pita da Veiga, C. y Nogueira R., [En línea] Cómo Tres Ciudades Se Reconciliaron Con Sus Ríos, El Español. Dirección URL:<https://www.elespanol.com/porfolio/20230318/cambiaron-madrid-bilbao-valencia-ciudades-reconciliaron-rios/1002995770394_32.html>

Porta P.S. (2013). Recuperación del paisaje en la ciudad: Las riberas urbanas en las cuencas de los ríos Garona e Isar, Facultad de Filosofía y Letras - Universidad de Zaragoza. https://zaguan.unizar.es/record/12767/files/TAZ-TFM-2013-1027.pdf

Pouso, S., Borja, Á., y Uyarra, M. C. (2020). An interdisciplinary approach for valuing changes after ecological restoration in marine cultural ecosystem services. *Frontiers in Marine Science*, *7*, 715. https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00715

"Proyecto Hábitat Claypole" (PHC), [En línea]. Dirección URL:< https://linktr.ee/proyectohabitatclaypole>

"Rehabilitación de arroyos urbanos e implementación de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) en Argentina," 7 Enero 2022. [En línea]. Dirección URL:<: https://www.argentina.gob.ar/noticias/rehabilitacion-de-arroyos-urbanos-e-implementacion-de-soluciones-basadas-en-la-naturaleza>

Rice, J., Seixas, C. S., Zaccagnini, M. E., BedoyaGaitán, M., Valderrama, N., Anderson, C. B., ... & Farinaci, J. S. (2018). Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity

and ecosystem services for the Americas of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES book.
Rotger, D. V. (2017). Paisaje fluvial y planificación del territorio: Perspectivas de integración en la Región Metropolitana de Buenos Aires.
Sadik-Khan J., [En línea]. Global Designing Cities Initiative, Island Press, 2014. Dirección URL:<https://globaldesigningcities.org/publication/global-street-design-guide/streets/special-conditions/elevated-structure-removal/case-study-cheonggyecheon-s>
SER [En línea]. Society for Ecological Restoration 2004. Dirección URL:< www.ser.org>
Sessa, E. T., Pace L. R., Martin; M. A. [en línea]. Arroyo "el gato" La Plata – Pcia de Buenos Aires. Funcionalidad Hídrica+Parque-Cana+Espacio Público+Continuidad de Trama Urbana. Dirección URL:<https://www.dropbox.com/scl/fi/hap167qpcc1yvjvsx16qf/PROYECTO-ARROYO-ELGATO-Ideas-for-Action.pdf?rlkey=0cpx59pgbsu2xlyhpet6s0oti&e=1&dl=0>
Shin, J. H., Lee, Y. H., Kwon, W. T. K., & Kim, Y. J. (2005). A large scale demolition in a densely populated urban area–a case study. *11–13 April 2005* (pp. 195-202). Thomas Telford Publishing.
Shin, J. H., & Lee, I. K. (2006, November). Cheong Gye Cheon restoration in Seoul, Korea. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering* (Vol. 159, No. 4, pp. 162-170). Thomas Telford Ltd.
Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *science*, *347*(6223), 1259855. DOI: 10.1126/science.1259855
The Sheaf and Porter Rivers Trust, [En línea]. Dirección URL:< https://www.sheafportertrust.org/projects>
Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., ... & Davies, P. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. nature, 467(7315), 555-561.
Walteros, J. M., & Ramírez, A. (2020). Urban streams in Latin America: Current conditions and research needs. Revista de Biología Tropical, 68, 13-28.
Walsh, C. J., Roy, A. H., Feminella, J. W., Cottingham, P. D., Groffman, P. M., & Morgan, R. P. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *Journal of the North American Benthological Society*, *24*(3), 706-723.
Wantzen, K. M., Alves, C. B. M., Badiane, S. D., Bala, R., Blettler, M., Callisto, M., ... & Zingraff-Hamed, A. (2019). Urban stream and wetland restoration in the Global South—A DPSIR analysis. Sustainability, 11(18), 4975.

TRENDS IN URBAN WATERFLOW MANAGEMENT: CASE STUDY "RAFAELA LIVING STREAMS PROJECT"

ABSTRACT In the city of Rafaela, public lining and piping works have been carried out in its storm watercourses, which are connected to the water network of natural streams. These projects are in line with a predominant paradigm of the 20th century in the management of urban watercourses, which consisted in rectifications and channeling of rivers, to allow rapid and complete drainage of water. In recent decades, many cities of the world, are tending to stop piping urban streams and rivers; Furthermore, there is a tendency to extubate them. These practices are a paradigm shift from a view of gray infrastructure, focused exclusively on hydraulic functionality, to a more comprehensive and socio-ecosystemic blue-green infrastructure, based on revaluing contact with aquatic ecosystems, and all the benefits they have for society. This work presents background information on the new paradigm and preliminary results developed within the framework of a project promoted by civil and academic organizations, whose main objective is to restore quality green spaces associated with the water courses of the city of Rafaela. The main conclusions highlight the importance of a comprehensive approach that combines ecological restoration efforts with environmental education and citizen participation to achieve sustainable management of urban watercourses.

Keywords: rehabilitation, blue-green infrastructure, ecological restoration and urban planning.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 93-103, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ESPACIO PÚBLICO Y CALIDAD DE VIDA EN UN BARRIO DE YERBA BUENA, TUCUMÁN. EVALUACIÓN CUALI-CUANTITATIVA

Marta S. Cisterna[1], Gabriela Márquez Vega[1], Sebastián Atencia Gualda[1]
Cintya Villa[1], Luciano M. Garbero[1], Fernando Martínez[1].

[1]Centro de Estudios Energía, Habitabilidad y Arquitectura Sustentable (CEEHAS). Instituto de Acondicionamiento Ambiental (IAA). Facultad de Arquitectura y Urbanismo – Universidad Nacional de Tucumán. Av. Roca 1900, S.M. de Tucumán, CP 4000, Tucumán. www.ceehas.org.ar.
Tel. (54) (381) 4364093, interno 114.
E mail mcisterna@herrera.unt.edu.ar - sgmarquezvega@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN: Se presenta un estudio realizado en el Barrio 126 Viviendas e Infraestructura, construido por el IPVDU Tucumán en la localidad de Yerba Buena. El objetivo es conocer la calidad de vida en relación al espacio público del barrio, con inclusión de la valoración de los habitantes. Como parte de la investigación, se analizaron la ubicación, el acceso a servicios y equipamiento público y se determinó la disponibilidad y calidad de espacios verdes, como así también necesidades y expectativas de los vecinos sobre los mismos. La metodología complementaria cuali-cuantitativa incluyó análisis planimétricos, relevamientos físicos y fotográficos, observación borrosa, relevamiento de datos por técnica de encuesta y entrevistas a vecinos. Los resultados muestran que la ubicación y los servicios de infraestructura, en general, satisfacen las necesidades y son valorados positivamente por la mayoría de vecinos. Sobre la disponibilidad y calidad del espacio público, se observa un déficit de superficie verde, también falta de equipamiento y tratamiento adecuado. Sobre el espacio verde, servicios y equipamiento público, se conocieron expectativas y necesidades registradas por los vecinos como no satisfechas. Se proponen recomendaciones y estrategias para gestionar el espacio público y mejorar la calidad de vida en barrios construidos por el estado.

Palabras clave: calidad de vida, espacio público barrial, valoración subjetiva.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se realiza en el marco del proyecto de investigación PIUNT B 706: “Diseño del Espacio Público Urbano y Confort Ambiental en el Área Metropolitana de Tucumán”, actualmente en desarrollo. Se ha propuesto como objetivo evaluar las condiciones ambientales que presentan espacios públicos urbanos en el Área Metropolitana de Tucumán (AMeT), a través de una metodología que permita determinar las condiciones físico-ambientales y la valoración, según las expresiones de los habitantes de la ciudad. En la investigación que presentamos nos interesa conocer la calidad de vida en un barrio de viviendas, relacionada principalmente con aspectos del espacio público, el medio ambiente construido y el colectivo que lo habita.

La calidad de vida es un concepto amplio que abarca factores o dimensiones factibles de analizar a través de indicadores. Incluye tanto factores objetivos como subjetivos, relacionados con la percepción de los mismos y la valoración de las personas. Tradicionalmente, el producto interior bruto (PIB) se ha utilizado como medida del desarrollo económico y social. Actualmente se proponen otros nueve indicadores que complementan el concepto de calidad de vida: (i) las condiciones materiales de vida, (ii) la actividad productiva principal, (iii) salud, (iv) educación, (v) ocio y las interacciones sociales, (vi) economía y seguridad física, (vii) gobernabilidad y derechos básicos, (viii) entorno natural, (ix) la experiencia de la vida en general (EUROSTAT, 2022). Sobre el entorno natural, se reconoce su

importancia para la calidad de vida de las personas. Las condiciones ambientales no solo afectan a la salud y el bienestar de forma directa, sino también indirecta, ya que pueden tener efectos adversos sobre los ecosistemas, la biodiversidad o incluso consecuencias más extremas, como desastres naturales o accidentes industriales. Se señala la necesidad creciente de los ciudadanos a disfrutar de los beneficios que puede ofrecer un medio ambiente de alta calidad, desde derechos básicos como el suministro de agua potable hasta aspectos más intangibles como el fácil acceso a la naturaleza y los espacios verdes, o los entornos residenciales y laborales libres de ruido, entre otros (Sánchez-Sellero et al, 2023).

Es posible afirmar que el concepto de calidad de vida se relaciona al bienestar del individuo y depende de la satisfacción de necesidades básicas, de carácter universal (Díscoli et all, 2010), su evaluación es multidimensional, y se basa en criterios objetivos y subjetivos, donde se consideran la satisfacción de necesidades y la valoración subjetiva de bienestar. El lugar donde se ubica, los servicios e infraestructura disponibles, las condiciones físico-ambientales de su espacio urbano y la convivencia entre vecinos, son considerados aspectos que inciden en la calidad de vida de los habitantes. Los mismos se corresponden con indicadores que pueden ser medidos, cuantificados y con otros de carácter subjetivo, relacionados con la percepción y valoración de los vecinos (Galeana Cruz, 2020). En el caso de estudio se focaliza el espacio urbano, espacio colectivo común del barrio donde transcurre parte de la vida comunitaria.

El espacio público de un barrio se identifica con la interacción en el espacio abierto, se caracteriza por ser accesible y visible, constituye un ámbito donde es posible socializar y desarrollar actividades compartidas por los vecinos (Rabotnikof, 2011), y también es un lugar donde las condiciones pueden impactar de manera positiva o negativa en la vida de la comunidad. La adecuación al clima, el equipamiento, las condiciones ambientales, la seguridad, el paisaje, son algunos de los aspectos que inciden en la calidad de vida y se consideran relevantes (Cisterna et al, 2023).

La importancia y calidad de los espacios públicos se ha estudiado en base a diferentes enfoques. Bambó Naya et al (2023), proponen como punto de partida el modelo urbano que promueve Naciones Unidas a través de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Señalan que la importancia de los espacios públicos se destaca especialmente en el ODS 11.7: "*proporcionar acceso universal a espacios verdes y públicos seguros, inclusivos y accesibles*…" En su investigación se identifican parámetros para el análisis y se propone una metodología que permite evaluar la calidad de dichos espacios y determinar su relación con las condiciones de seguridad, accesibilidad e inclusión que ofrecen. La metodología propuesta se basa en la revisión de una serie de proyectos urbanos en ciudades europeas en los que el espacio público tiene una especial relevancia. Junto a la observación empírica de los proyectos, se analizan textos clave que abordan la calidad del espacio público junto a directrices de diseño urbano.

Sobre las prácticas sociales en áreas verdes públicas de diversa tipología, en la investigación de Campari et al, (2020) a través de un análisis empírico del paisaje basado en relevamientos de áreas verdes, con técnica de observación participante, se identifican tendencias de uso desarrolladas por los habitantes en espacios barriales: caminar, pasear, llevar niños a jugar, descansar, hacer gimnasia y deportes. El trabajo de campo se realizó en espacios verdes como plazas y parques, emplazados en barrios de la Comuna 4 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (La Boca, Barracas, Parque Patricios y Nueva Pompeya), y se orientó a relevar entre otros aspectos el tipo de relación con el espacio verde, la frecuencia de concurrencia y los usos sociales practicados en ellos. Se aplicó una encuesta como técnica para la recolección de datos. A partir de los resultados, se realizan propuestas para ser consideradas en la formulación de políticas públicas orientadas a planificar y diseñar los espacios públicos con mayor participación de la comunidad barrial.

Estudios sobre las formas de apropiación del espacio público barrial señalan que existen problemáticas y carencias generales e identifican condiciones que motivan el proceso de apropiación en los casos de estudio. Algunos ejemplos son: para sentirse cómodos, por la necesidad de los vecinos de proyectarse en el espacio urbano; porque el espacio público del barrio ofrece un lugar con dimensiones y condiciones físicas que el hogar no tiene para la realización de actividades específicas. Indican que algunos tipos de apropiación del espacio común del barrio se ven inhibidos por la percepción de inseguridad o por falta de cohesión social. En base a ello se proponen atributos socio espaciales que deben presentarse en el espacio para permitir los procesos de apropiación en el espacio público barrial (Soto Parra, 2018).

Metodología de la investigación
Para la investigación se utilizó metodología complementaria cuali-cuantitativa que incluyó análisis planimétricos, relevamientos físicos y fotográficos. En el trabajo de campo se llevó a cabo observación borrosa y relevamiento de datos por técnica de encuesta y entrevistas a vecinos. Para el análisis de los datos cuantitativos se utilizó Estadística Descriptiva.

Se trabajó en forma conjunta con el colectivo de vecinos, con informantes clave. En las primeras visitas al barrio se trabajó con la técnica de observación borrosa y se realizaron relevamientos físicos y fotográficos de los espacios urbanos. A partir de los datos se plantearon variables de análisis y se desarrolló una encuesta, tipo cuestionario, que se gestionó de forma virtual a través del celular, y fue enviada a los vecinos con la aplicación WhatsApp. En sucesivas visitas al barrio se realizaron entrevistas a vecinos, a referentes clave barriales, y también hubo una reunión con autoridades del área de Planeamiento del IPVDU Tucumán, para recabar datos sobre el barrio, la forma de adjudicación y las reglamentaciones vigentes. En el tratamiento de los datos cualitativos obtenidos por encuestas y entrevistas, se aplicó la denominada Teoría de Base (TB) o Teoría Fundamentada (TF), definida como una "aproximación inductiva" en la cual el análisis de datos sirve de punto de partida para el desarrollo de una teoría sobre un fenómeno o sobre un caso de estudio (Hernández Sampieri y Mendoza, 2018).

La encuesta aplicada consiste en un cuestionario, diseñado con preguntas abiertas y cerradas y escala de Likert de 5 puntos. A través de la misma se pudo registrar la valoración de los vecinos sobre el espacio urbano del barrio, sobre las condiciones actuales, las expectativas y necesidades. Se realizó durante el mes de junio de 2024, y fueron respondidas por el 25% de las familias que habitan el barrio.
Los aspectos que se abordan son los siguientes:

1- Personas por vivienda: Número y constitución del grupo familiar.
2 - Tiempo de residencia en el barrio.
3 - Tipo de vivienda anterior.
4 – Valoración de los vecinos sobre el barrio: Ubicación, imagen, entorno, paisaje, calles y veredas, espacios verdes, infraestructura de servicios urbanos: agua, gas, limpieza de calles, iluminación, recolección de residuos, escurrimiento del agua de lluvia en las calles.
5 – Elección de actividades para realizar en el barrio.
6 –Equipamiento urbano que considera necesario.
7 – Beneficios del arbolado en periodo cálido.
8 – Beneficios del arbolado en periodo frío.
9 – Valoración de aspectos ambientales del espacio público y sobre la convivencia entre vecinos.
10 – Necesidades y expectativas sobre el espacio común del barrio, condiciones generales y en particular sobre el arbolado y el equipamiento urbano.

Caso de estudio
El Barrio 126 Viviendas e Infraestructura, construido por el estado a través del Instituto Provincial de la Vivienda y Desarrollo Urbano, IPVDU Tucumán, se encuentra en el municipio de Yerba Buena, al oeste del departamento Capital. El barrio se ubica en el sector Noreste del municipio, y está vinculado a través de la Av. P. Perón y la Av. J.L. Fanzolato, la cual, en una futura ampliación, se unirá con la ruta provincial 315 que llega hasta la localidad de Villa Carmela, en la Comuna de Cevil Redondo del departamento de Yerba Buena.

La zona presenta un importante desarrollo urbano, hacia el este se encuentran barrios abiertos como Las Acacias, Bernel y Santa Clara; hacia el Oeste predominan los barrios cerrados como El Portillo, Los Tipales, Las Marías. El sector cuenta con servicios primarios de salud y de educación. También presenta nodos comerciales bien desarrollados, con variedad de rubros (Figura 1). Además, la zona dispone de servicios de agua, gas, cloacas, barrido y alumbrado de calles, y recolección de residuos.



Figura 1: Ubicación del Barrio 126 viviendas e Infraestructura, principales vías de circulación, barrios vecinos y principales servicios.

El barrio se desarrolla en cuatro manzanas rectangulares, sobre un eje este-oeste, con sus lados mayores orientados norte y sur (Figura 2 y 3). Las viviendas se terminaron de construir en el año 2018 y fueron adjudicadas entre el 2021 y 2022. El barrio cuenta con cuatro espacios verdes, uno de los cuales está planteado como una superficie para retención de agua de lluvia, pero no ha sido aún resuelto para cumplir esa función (Figura 4). La superficie total de espacio verde público es de 3078 m^2, considerando lo establecido por la Secretaría de Vivienda en los estándares mínimos de calidad para barrios de viviendas de interés social, se debe contar con 9m^2 de espacio verde público por habitante, existe un déficit de aproximadamente 1500m^2 de espacio verde en el barrio. El espacio urbano además no cuenta con tratamiento, carece de arbolado y de equipamiento (Figura 5). Si bien las viviendas con sus fachadas brindan una imagen que resulta agradable, la falta de tratamiento del espacio exterior impacta negativamente en las condiciones ambientales y en la estética del barrio (Figura 6).

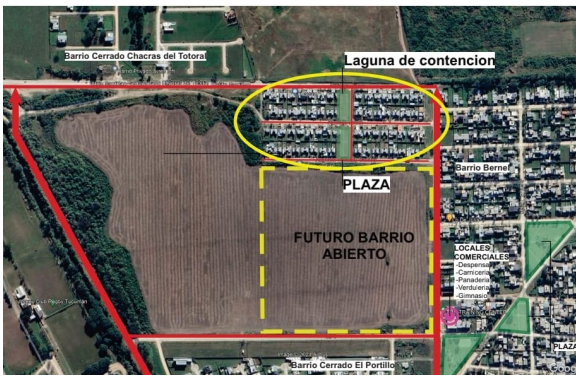


Figura 2: Ubicación del Barrio 126 Viviendas e Infraestructura, barrios vecinos, espacios verdes y servicios disponibles en la zona.



Figura 3: Disposición de las viviendas, espacios verdes y vías de circulación.



Figura 4: Espacio verde proyectado como laguna de retención. Se observa la falta de resolución urbanística.



Figura 5: Espacios verdes con escasa intervención proyectual, sin vegetación, sin equipamiento urbano.



Figura 6: Aspecto que presentan las calles del barrio, sin arbolado y fachadas cerradas al espacio urbano.

Sobre la infraestructura urbana, la escorrentía del agua de lluvia de la calle central del barrio, no ha sido resuelta, esto produce inundaciones en la calle y en el predio de uno de los espacios verdes, durante y después de las tormentas (Figura 7 y 8). Es importante señalar que el terreno del barrio es adyacente a la zona del pedemonte, la escorrentía natural del agua se produce hacia la zona de localización. Las urbanizaciones de esta zona han reemplazado terreno natural por superficies impermeables, motivo por el cual es de suma importancia el correcto manejo del escurrimiento pluvial para evitar inundaciones.



Figura 7: Inadecuado funcionamiento del desagüe pluvial urbano por falta de resolución.



Figura 8: Presencia permanente de agua de lluvia por inadecuada resolución del desagüe pluvial urbano.

El barrio no cuenta con iluminación suficiente en las calles, resultando un aspecto negativo (Figura 9 y 10), valorado así por los vecinos que lo relacionan con la inseguridad, principalmente en las horas que no se dispone de luz natural.

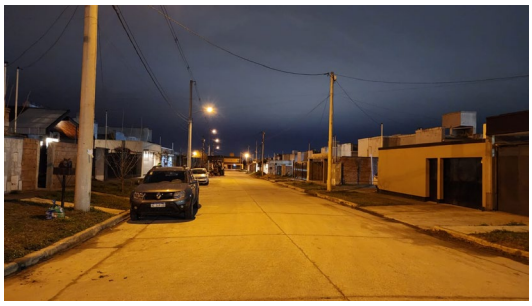


Figura 9: Aspecto de una calle del barrio con insuficiente Iluminación nocturna.



Figura 10: El espacio verde del barrio cuenta con mayores niveles de iluminación artificial.

Resultado de encuestas y entrevistas

El análisis de las respuestas brindadas por los vecinos en las encuestas y entrevistas permiten conocer la valoración sobre aspectos que inciden en la calidad de vida en el barrio. El análisis de algunas de las respuestas se muestra a continuación.

Población, tiempo de residencia en el barrio y residencia anterior:

El 50% de las viviendas fueron entregadas en el año 2021, el otro 50%, durante el 2022. La cantidad promedio de habitantes por casa es de 4 personas, resultando un total de 496 habitantes. El 57% de los

casos se trata de familias con hijos pequeños. Sobre la residencia anterior, 57% de las familias declaran que vivían en casas de barrios, 39% en departamentos y 4% en barrio privado

Valoración de los vecinos sobre el barrio:
El 86% de los vecinos valora positivamente la ubicación, como muy buena y buena; solo un 3% la considera mala y el 11% es indiferente, no les parece ni buena ni mala (Tabla 1).

Tabla 1: Valoración de la ubicación del barrio.

Valoración de la ubicación del barrio.	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.1. La ubicación del barrio le parece:	61	25	11	3	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	86		11	3		100

Sobre la imagen del barrio, 32% la valora positivamente, 22% la considera mala y al 46% no la encuentra ni buena ni mala. La mayoría se manifestó neutral o indiferente sobre la valoración del aspecto visual, estético del barrio. Sobre el paisaje y las visuales que pueden observarse desde el barrio, 71% las considera muy buenas y buenas, 11% manifiesta una valoración negativa y 18% es indiferente (Tabla2).

Tabla 2: Valoración de la imagen del barrio.

Valoración de la imagen del barrio.	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.2. La imagen del barrio le parece:	14	18	46	22	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	32		46	22		100

La mayoría, 57%, considera buenas o muy buenas las calles y veredas del barrio. Sólo un 18% las considera malas y 25% de los vecinos se manifestó neutral o indiferente. En las entrevistas los vecinos mencionaron la falta de arbolado y de equipamiento urbano, y la mala iluminación nocturna de las calles como aspectos que impactan negativamente en su valoración (Tabla 3 y Figura 11).

Tabla 3: Valoración del espacio urbano.

Valoración de las calles y veredas del	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.3. Las calles y veredas del barrio le	7	50	25	14	4	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	57		25	18		100

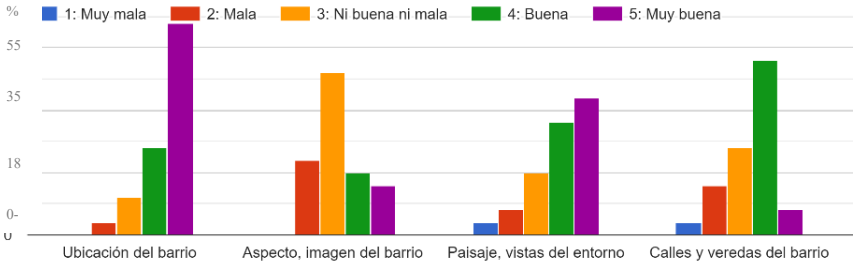


Figura 11: Valoración de la ubicación, imagen, visuales y espacio urbano del barrio.

La mayoría de los vecinos,75%, valora negativamente el estado de los espacios verdes y 25% se manifiesta indiferente. El motivo principal se debe a que los mismos no se han considerado en el diseño del barrio y actualmente se encuentran sin tratamiento alguno, carecen de equipamiento, de arbolado, y se perciben estéticamente neutros o negativos (Tabla 4).

Tabla 4: Valoración de los espacios verdes.

Valoración de los espacios verdes del	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.4. Los espacios verdes le parecen:	0	0	25	75	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	0		25	75		100

Sobre el servicio de agua, la mayoría, 57%, lo considera bueno; el 25% piensa que es malo y 18% se manifiesta indiferente. Sobre gas natural, la mayoría, 86%, lo considera bueno, y el 14% es neutral o indiferente, no se registraron valoraciones negativas. Sobre desagües cloacales, 71%, lo considera bueno y el 28,5% se manifiesta indiferente. No se registraron valoraciones negativas (Tabla 5 y Figura 12).

Tabla 5: Valoración de servicios urbanos

Valoración de los servicios urbanos:	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5a. Servicio de Agua Potable	18	39	18	21	4	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	57		18	25		100
	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5b. Servicio de Gas Natural:	0	86	14	0	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	86		14	0		100
	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5c. Servicio de cloacas:	0	71	29	0	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	71		29	0		100

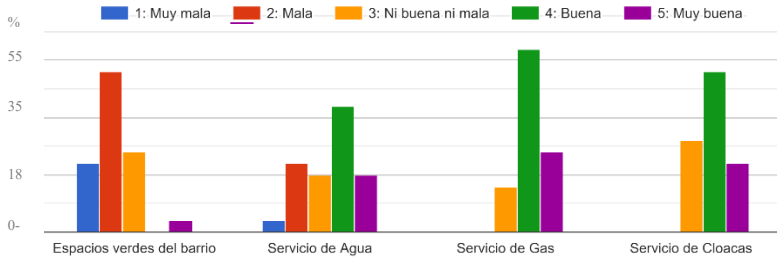


Figura 12: Valoración de espacios verdes y servicios de agua, gas y cloacas.

Sobre la limpieza de las calles, la mayoría (86%) la considera mala y el 14% se manifiesta indiferente. No se registraron valoraciones positivas. Sobre la iluminación de las calles del barrio, la mayoría de los vecinos (64%) la considera mala, un 14% la valora positivamente y 22% se manifiesta indiferente. Para el 18% de vecinos la iluminación del barrio es suficiente y adecuada, la mayoría, 68%, opina lo contrario. Sobre la recolección de residuos, la mayoría (71%) la considera buena, 11% considera que es mala y 18% se manifiesta indiferente. Sobre el escurrimiento del agua de lluvia en las calles, la mayoría (47%) la considera mala, al 32% le parece buena y 21% se manifiesta indiferente. La valoración negativa se debe a la falta de solución que se observa en la obra de desagüe pluvial del barrio, lo cual trae como consecuencia la acumulación de agua de lluvia en algunos sectores. También los vecinos comentan que, durante las tormentas de verano, un gran caudal de agua se encausa por las calles que corren de este a oeste, haciendo imposible, y peligrosa, la circulación por las mismas (Tabla 6 y Figura 13).

Tabla 6: Valoración de servicios urbanos.

Valoración de los servicios urbanos:	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5d. Servicio de Limpieza de calles	0	0	14	86	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	0		14	86		100
	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5e. Iluminación de calles:	0	14	22	64	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	14		22	64		100
	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5e. Recolección de residuos:	0	71	18	11	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	71		18	11		100
	MB	B	NbNm	M	MM	∑
4.5f. Escurrimiento de agua de lluvia e	0	32	21	47	0	100
Respuestas por vertientes	MB + B		NbNm	M+MM		∑
Valores % por vertientes	32		21	47		100

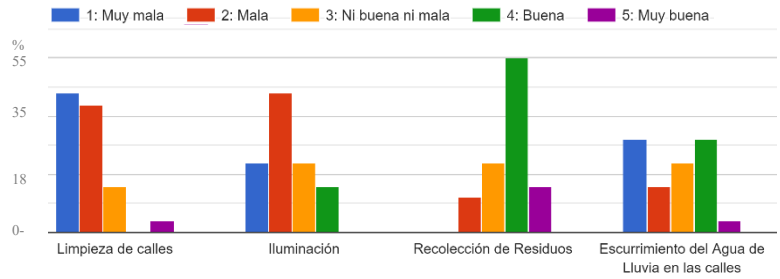


Figura 13: Valoración de servicio de limpieza de calles, iluminación, recolección de residuos y escurrimiento de agua de lluvia en las calles.

Equipamiento urbano que consideran necesario incorporar al barrio.

La totalidad de los vecinos mencionó la necesidad de agregar iluminación en las calles. Si bien el barrio cuenta con iluminación, manifiestan que les resulta insuficiente y consideran necesario aumentar la cantidad y mejorar la calidad la iluminación en el exterior. Cerca del total, 96%, considera importante contar con rampas en las veredas y con refugios en las paradas de colectivos, solo el 4% se manifestó indiferente. Sobre la necesidad de contar con cestos para residuos para peatones, 89% manifestó que le parece necesario, 11% le parece indiferente. El 96% de los vecinos considera importante contar con zonas sombreadas en los espacios urbanos del barrio, protegidas de la radiación solar. En las entrevistas la mayoría de vecinos expresó que le gustaría contar con un espacio verde adecuado para realizar actividades en el barrio y compartir con los vecinos. La totalidad de vecinos considera importante contar con un sector con juegos infantiles en el barrio. El 89% considera necesario contar con bancos y mesas en los espacios verde, y la mayoría de vecinos (93%) considera importante contar con árboles en las veredas y en los espacios verdes (Tabla 7, Figura 14 y 15).

Tabla 7: Equipamiento que se considera necesario.

Escala: MI: muy importante; I: importante; Indif.: indiferente; PI: poco importante; NI: nada importante.

Equipamiento que se considera necesario incorporar:	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.1. Iluminación	100	0	0	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	100		0	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.2. Rampas en veredas:	96	0	4	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	96		4	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.3. Refugios para espera de colectivos:	96	0	4	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	96		4	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.4. Cestos para residuos:	89	0	11	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	89		11	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.5. Protección del sol en espacio urbano (Pérgolas, toldos)	96	0	4	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	96		4	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.6. Juegos infantiles:	100	0	0	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	100		0	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.7. Equipamiento en espacios verdes (mesas, bancos):	0	89	11	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	89		11	0		100
	MI	I	Indif.	PI	NI	∑
6.8. Árboles en espacios verdes y calles:	93	0	7	0	0	100
Respuestas por vertientes	MI + I		Indif.	PI+NI		∑
Valores % por vertientes	93		7	0		100

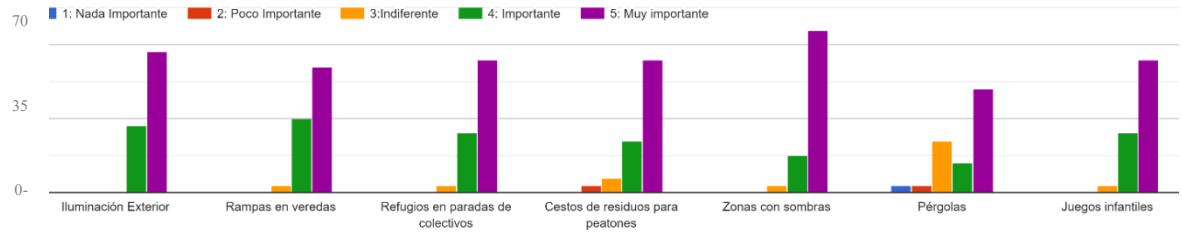


Figura 14: Equipamiento que los vecinos consideran necesario incorporar al barrio.

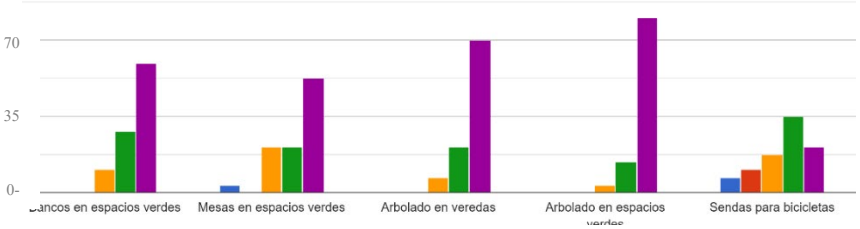


Figura 15: Equipamiento que los vecinos consideran necesario incorporar al barrio.

Valoración de aspectos ambientales y convivencia entre vecinos.

Sobre la ubicación del barrio, la mayoría (79%) considera que el barrio está bien conectado con otros barrios y sectores de la ciudad, que su localización es adecuada para sus actividades y les permite contar con comercios cercanos para realizar compras. El 71% de los vecinos percibe los barrios vecinos como amigables, y 64% considera agradables las visuales que cuenta desde su casa. Sobre las calles del barrio, 36% de los vecinos manifiesta que le agrada caminar por ellas, en igual porcentaje, 36%, expresa que no le agrada y el 28% es indiferente. Sobre los ruidos urbanos, 57% considera que el barrio es tranquilo, no percibe molestias por ruidos, 25% no lo considera un barrio tranquilo y 18% es indiferente. En las entrevistas los vecinos manifestaron que los ruidos molestos provienen de los automóviles que circulan a gran velocidad por las calles del barrio. También comentan que la mayoría provienen de barrios vecinos, circulan por las calles del barrio, y se dirigen a la vía principal, Av. J.L. Fanzolato, que se vincula con otros sectores de YB.

Sobre la convivencia barrial, 43% manifiesta que conoce a la mayoría de los vecinos del barrio, 36% expresa lo contrario y 21% es indiferente. Si bien la socialización no es alta, la mayoría (68%) expresa que tiene confianza y no dudaría en pedir ayuda a sus vecinos, 18% expresa lo contrario y 14% es indiferente. Sobre la propuesta de compartir actividades con los vecinos, al 50% le gustaría, 21% no está de acuerdo y para el 29% es indiferente (Tabla 8 y Figura 16).

Tabla 8: Convivencia entre vecinos.

Convivencia entre vecinos						
	Ta	Pa	NaNd	Pd	Td	∑
Conozco a la mayoría de mis vecinos	14	29	21	25	11	100
Respuestas por vertientes	Ta + Pa		NaNd	Pd+Td		∑
Valores % por vertientes	43		21	36		100
	Ta	Pa	NaNd	Pd	Td	∑
Tengo confianza para pedir ayuda a mis vecinos	36	32	14	14	4	100
Respuestas por vertientes	Ta + Pa		NaNd	Pd+Td		∑
Valores % por vertientes	68		14	18		100
	Ta	Pa	NaNd	Pd	Td	∑
Me gustaría compartir algunas actividades con mis vecinos	25	25	29	21	0	100
Respuestas por vertientes	Ta + Pa		NaNd	Pd+Td		∑
Valores % por vertientes	50		29	21		100

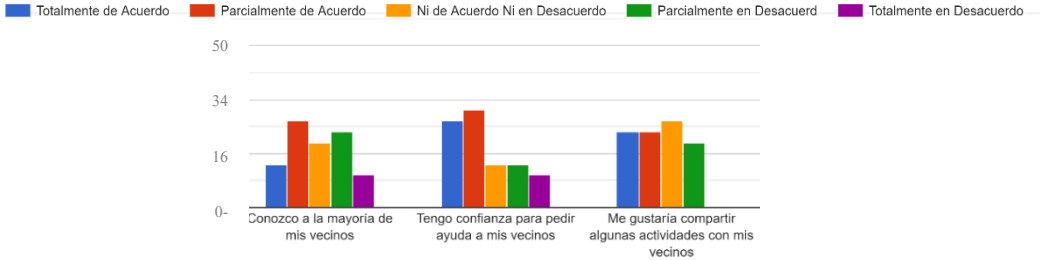


Figura 16: Convivencia barrial.

CONCLUSIONES

La metodología aplicada permite conocer las condiciones ambientales que ofrece el barrio 126 Viviendas e Infraestructura, construido por el IPVDU en Yerba Buena Tucumán. Se encuentra cerca de dos importantes vías de circulación que lo conectan con otros barrios, también con las principales zonas de Yerba Buena y con otros municipios. Esta situación es valorada positivamente por los vecinos, la mayoría menciona que considera amigables los barrios vecinos, que diariamente recurren a los centros comerciales y utilizan los servicios que los mismos ofrecen. En el barrio disponen de dos líneas de colectivos y les resulta adecuada la ubicación para las actividades que realizan diariamente.

Sobre la infraestructura y servicios urbanos, la iluminación y la escorrentía del agua de lluvia en las calles son dos servicios que no han sido adecuadamente resueltos. La iluminación impacta sobre la seguridad que se ha tratado de mejorar con la instalación de alarmas y cámaras de seguridad, gestionadas por los vecinos. Sobre la disponibilidad de espacio verde, el barrio presenta un déficit de aproximadamente $3m^2$ de verde por habitante. Esto impacta negativamente en las condiciones ambientales. Además, actualmente, los espacios verdes del barrio son predios vacíos, no cuentan con equipamiento para desarrollar actividades y carecen de arbolado. Los vecinos comentan que, durante los meses de verano, no pueden ser usados durante las horas del día. En las calles tampoco se ha previsto arbolado, ni equipamiento. Esta falta de tratamiento del espacio urbano impacta negativamente en la imagen del barrio y también en la socialización que se logra con las actividades que la comunidad puede realizar en el espacio público y ayudan a construir los vínculos vecinales, la cohesión social y la organización como una comunidad barrial con objetivos comunes.

Recomendaciones y estrategias para mejorar la calidad de vida en el barrio.
Consideramos importante implementar una estrategia adecuada en los procesos de adjudicación con el fin de apoyar los procesos de socialización y de organización vecinal. En esa etapa se debería abordar la formación del colectivo de vecinos, para crear los vínculos de la comunidad que beneficiaran la convivencia en el barrio e impactará positivamente en la calidad de vida. En el barrio analizado, se observa que los vecinos no han podido organizarse para realizar ninguna de las mejoras necesarias, tampoco se plantean objetivos para cambiar las condiciones originales del espacio urbano barrial. Sin embargo, en las entrevistas y encuestas, reconocen la necesidad de contar dichas mejoras: arbolado, equipamiento urbano, mejor iluminación y solución al escurrimiento del agua de lluvia en las calles. También señalan los beneficios que se obtendrían en las condiciones ambientales, en la imagen y, principalmente, en la calidad de vida en el barrio, a través de las actividades al aire libre, el contacto con la naturaleza, la interacción entre vecinos, entre otras.

Consideramos que el rol de los organismos del estado, en este caso el IPVDU, no concluye con la entrega de las viviendas. Planteamos la necesidad de realizar estudios posteriores a la ocupación de las mismas, con el fin de conocer los aciertos y las falencias que se han producido. Estos análisis permitirán mejorar la planificación, diseño y gestión de los barrios de interés social.

Igualmente consideramos importante abordar el diseño del espacio urbano desde las primeras etapas del proyecto. Destacamos la importancia del espacio público planificado con el fin de motivar prácticas sociales y crear vínculos comunitarios a partir del uso, la apropiación e interacción social a escala barrial. Estos objetivos se podrán lograr con espacios que cuenten con el equipamiento para realizar actividades, con lugares que brinden condiciones ambientales adecuadas para estar confortables en la situación de verano o invierno, y que resulten seguros y accesible para la totalidad de vecinos.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecemos a los vecinos del Barrio 126 Viviendas e Infraestructura de Yerba Buena, Tucumán, por las respuestas y el interés manifestado durante las encuestas y entrevistas. Una mención especial merece el Arq. Sebastián Bollea, vecino y referente clave, que nos acompañó durante los relevamientos y en las diferentes instancias del trabajo de campo.

REFERENCIAS

Amerigo, M. (1995). Satisfacción Residencial: Un análisis psicológico de la vivienda y su entorno. Madrid. Alianza Editorial S.A.

Bambó Naya, R., de la Cal Nicolás, P., Díez Medina, C., Ezquerra, I., García-Pérez, S., Monclús, J. (2023). Calidad del espacio público y objetivos de desarrollo sostenible: análisis de nueve proyectos urbanos en ciudades españolas. Fronteras de la Investigación Arquitectónica, Vol. 12, N 3, Páginas 477-495. https://doi.org/10.1016/j.foar.2023.01.002

Campari, G., Dalle, L., Giacoia, G. y Olveira Rial, A. (2020). Prácticas sociales en la planificación y diseño de espacios verdes públicos. AREA, 26(1). Recuperado de https://area.fadu.uba.ar/area-2601/campari-et-al2601/

Cisterna, M., Garbero, L., Martínez, F., (2023). Arbolado en un espacio verde público de Yerba Buena, Tucumán. Metodología de análisis. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp.68-79. https://asades.org.ar/revista-averma-2023

Discoli, C., San Juan, G., Martini, I., Ferreyro, C., Dicroce, L., Barbero, D., & Esparza, J. (2010). Metodología para la evaluación de la calidad de vida urbana. Revista Bitácora Urbano Territorial, 17 (2), 95-112.

EUROSTAT [en línea] Calidad de Vida. https://ec.europa.eu/eurostat/web/qualityof-life/data

Galeana Cruz S. (2020). Evaluación de satisfacción: espacio público contiguo a la vivienda de interés social. Vivienda y Comunidades Sustentables, num.8, pp. 39-59, 2020. Universidad de Guadalajara. DOI: https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i8.148

Hernández Sampieri, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, pp. 114-120.

Landázuri, AM, Mercado, SJ, & Terán, A. (2013). Sostenibilidad de los entornos residenciales. Suma Psicológica, 20 (2), 191-202.

Naciones, U. (2017). Nueva agenda urbana. En Hábitat III. Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible.

Rabotnikof N. (2011). En busca de un lugar común. El espacio público en la teoría pública contemporánea. México: Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Investigaciones Filosóficas.

Sánchez-Sellero, M.C., García-Carro, B., & Fernández-Sánchez, E. (2023). Indicadores multidimensionales de la calidad de vida en los países de la UE. Cambios en las ponderaciones. Revista de Economía Mundial, (64), 79-96. https://doi.org/10.33776/rem.vi64.7518

Soto Parra J.M. (2018). El proceso de apropiación del espacio público barrial: El caso de la zona noreste de la colonia centro de la ciudad de Acámbaro 2010-2018. Problemas urbanos y del territorio. Vol. IX. Las ciencias sociales y la agenda nacional. Reflexiones y propuestas desde las Ciencias Sociales. México 2018: COMECSO.

PUBLIC SPACE AND QUALITY OF LIFE IN A NEIGHBORHOOD OF YERBA BUENA, TUCUMÁN. QUALI-QUANTITATIVE EVALUATION.

ABSTRACT: A study carried out in the 126 Housing and Infrastructure district, built by IPVDU Tucumán in the city of Yerba Buena, is presented. The objective is to understand the quality of life in relation to the public space of the neighbourhood, including the assessment of the inhabitants. As part of the investigation, the location, access to services and public equipment were analyzed and the availability and quality of green spaces were determined, as well as the needs and expectations of the neighbors regarding them. The complementary qualitative-quantitative methodology included planimetric analysis, physical and photographic surveys, fuzzy observation, data collection by survey technique and interviews with neighbors. The results show that location and infrastructure services, in general, meet the needs and are positively appreciated by the majority of neighbors. Regarding the availability and quality of green spaces, there is a deficit of surface area but also a lack of equipment and adequate treatment. Concerning green space, services and public facilities, the expectations and needs recorded as unmet by neighbors were known. Recommendations and strategies are proposed to manage public space and improve the quality of life in state-built neighborhoods.

Keywords: quality of life, urban neighborhood space, subjective evaluation.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 104-112, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE USO INDUSTRIAL ASISTIDO CON ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA

Rodolfo Stoll[1], Jorge Daghero[1], Ezequiel Podversic[1]
[1]Grupo de Energía Solar. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.
Ruta 36. Km 601. X5804BYA – Río Cuarto. Prov. de Córdoba
Tel. 0358-46768842 e-mail: rstoll@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se evalúa el desempeño de un sistema de generación de vapor de baja entalpía para uso industrial. El sistema incluye un circuito térmico acoplado a un captador de energía solar mediante un concentrador solar tipo cilíndrico parabólico. Además, cuenta con un sistema auxiliar de energía eléctrica que permite mantener una temperatura constante en el fluido térmico compensando, de esta manera, las fluctuaciones de la radiación solar incidente. Se realizaron ensayos experimentales de este sistema conectado al concentrador solar en el interior utilizando solo la energía proveniente del sistema auxiliar de energía con el fin de evaluar los saltos térmicos en cada uno de sus componentes y la capacidad de generación de vapor. Con el sistema aislado, el fluido térmico alcanzó una temperatura del orden 135 °C al ingreso del generador de vapor produciendo un salto térmico en el intercambiador de calor del generador de vapor de 15 ºC. También se estudió el tiempo de respuesta del sistema que permitirá determinar el comportamiento del concentrador solar en un ensayo de exterior. El caudal de vapor generado en estado estacionario de este sistema fue de 1,0 kg/h y la eficiencia térmica global fue del 45 %.

Palabras clave: Energía térmica, concentrador cilíndrico parabólico, circuito térmico, producción de vapor.

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía térmica representa casi la mitad del consumo global de energía. Los procesos industriales son responsables del 53 % de la energía consumida como calor mientras que otro 44 % se utiliza para la calefacción y agua caliente en edificios y en menor medida para cocinar. El resto se utiliza en la agricultura, principalmente para la calefacción de invernaderos. El creciente interés por el uso de energías renovables para cubrir esta demanda de energía se debe no sólo a consideraciones ambientales, sino también a la grave preocupación por la seguridad energética en el contexto de la actual crisis energética mundial. (IEA, 2022).

La utilización de la energía solar térmica se produce de tres maneras: baja temperatura (< 80 °C), media temperatura (80–250 °C) y alta temperatura (> 250 °C). Las aplicaciones de baja temperatura que utilizan sistemas de calefacción solar son relativamente maduras (Hansen & Vad Mathiesen, 2018). Por otro lado, las aplicaciones de alta temperatura que utilizan la tecnología de concentración solar de potencia (CSP) son para la generación de energía eléctrica (Behar, 2018). Las aplicaciones de temperatura media son utilizadas para generar calor solar en procesos industriales (SHIP: Solar Heat for Industrial Processes). Es un sector que ha mostrado en los últimos años un crecimiento significativo. En 2023 se instalaron en todo el mundo al menos 116 nuevas plantas SHIP con una capacidad de 94 MWth, triplicando la capacidad instalada en comparación con 2022. El número total de plantas SHIP es de aproximadamente 1.200 sistemas, con una superficie colectora de 1,4 millones de metros cuadrados y una capacidad de 951 MWth (Weiss & Spörk-Dür, 2024). Entre los proyectos destacados se incluye una

planta de producción de envases en Turnhout, Bélgica en donde se ha instalado la mayor planta termosolar de Europa. Esta planta utiliza concentradores cilíndricos parabólicos con una producción pico de 2,7 GW de potencia térmica (Azteq, 2024) y seis módulos de almacenamiento térmico con una capacidad de 5 MWh de energía térmica (Energynest, 2024). Este proyecto es uno de los ejemplos donde la tecnología de concentración solar se une al uso de sistemas de almacenamiento de energía (TES: Thermal Energy Storage) resolviendo de esta manera el desafío tecnológico de almacenar la energía que proviene de una fuente intermitente como lo es la energía solar y así poder suministrarla a demanda.

En Argentina, recientemente se han desarrollado herramientas numéricas para la simulación del comportamiento de sistemas de concentración solar. Para la validación experimental de un modelo propuesto por investigadores del INENCO en la Universidad Nacional de Salta se empleó un CCP con un área de apertura de 11 m2 y un tubo receptor 6 m de longitud (Aparicio et al, 2023). En el INENCO también se ha desarrollado un modelo térmico mediante el programa Simusol. Para este modelo tomaron como caso de estudio un CCP con un área de apertura de 5,41 m2 (Dellicompagni y Linares, 2023). Así mismo, el INENCO ha desarrollado, construido y ensayado un CCP con fines educativos para calentar agua. Las mediciones experimentales sobre este equipo permitieron obtener agua a 70 °C con una eficiencia global pico del 30 % (Dellicompagni et al. 2023)

El Grupo de Energía Solar (GES) de la Universidad Nacional de Río Cuarto ha estado investigando la tecnología de concentración solar desde el año 2013 enfocándose particularmente en el desarrollo de un prototipo de CCP destinado a la generación de vapor para uso industrial. La primera etapa consistió en el dis3eño del prototipo (Daghero et al, 2013), su construcción y evaluación experimental del rendimiento térmico (Daghero et al, 2015). Posteriormente se desarrolló un circuito térmico para transmitir la energía solar captada por el CCP a un generador de vapor de agua (Garnica et al, 2018). Para ello se seleccionó como fluido caloportador un aceite nafténico de grado alimenticio (Paratherm, 2023). Debido al bajo rendimiento térmico global obtenido por problemas asociados a la disipación de calor en el circuito térmico, se decidió realizar una modificación del sistema con el fin de mejorar la aislación térmica del mismo. En la nueva versión se incorporaron en el tanque pulmón del sistema, resistencias eléctricas halógenas para asegurar la estabilidad de la temperatura ante fluctuaciones de la radiación solar incidente. La performance de este sistema modificado funcionando en circuito cerrado (sin acoplar al CCP) se evaluó con éxito. El fluido térmico alcanzó una temperatura del orden 150°C al ingreso del generador de vapor. El caudal de vapor generado en estado estacionario fue de 1,3 kg/h con lo cual la eficiencia térmica global fue del 60 %. (Stoll et al, 2023)

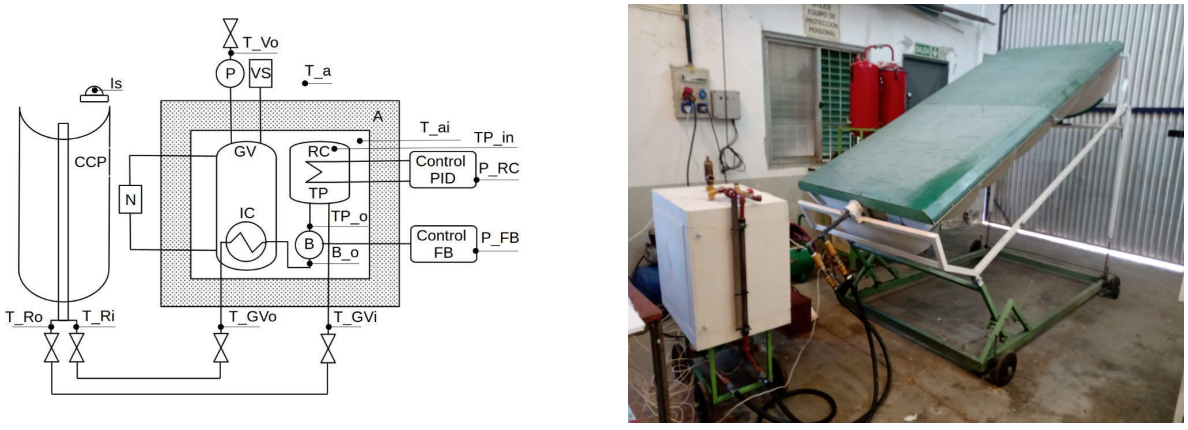
En este trabajo se presentan los resultados de los ensayos realizados a este sistema conectado al CCP en el interior utilizando solo la energía proveniente del sistema auxiliar que posee con el fin de evaluar los saltos térmicos en cada uno de sus componentes y la capacidad de generación de vapor.

EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

La configuración adoptada para la generación de vapor de uso industrial mediante un CCP (Akbarzadeh & Valipour, 2018) fue el uso de un generador vapor (GV) en donde la energía colectada por el CCP es transferida al agua mediante un fluido térmico. El fluido térmico utilizado es un aceite nafténico de grado alimenticio, cuyo nombre comercial, es Paratherm NF. Este fluido se ha diseñado para operar libre de mantenimiento y con alta durabilidad en sistemas cerrados de fase líquida hasta 300 °C, posee baja viscosidad y alto coeficiente de transferencia térmica. (Paratherm, 2023).

El sistema de generación de vapor está formado por un prototipo de CCP de 2,5 m^2 de superficie efectiva de captación. El eje de rotación del concentrador (línea focal) está orientado hacia el norte y gira en el sentido de este a oeste. La inclinación del eje con respecto al plano horizontal es regulable según el día del año. El concentrador se encuentra fijado en una estructura móvil que puede fijarse a la plataforma de ensayo exterior. La lámina reflectante modelo 4400 GP del CCP fue provista por la Alanod Gmbh. El receptor tipo anular de este dispositivo está conectado a un generador de vapor mediante mangueras flexibles de caucho utilizadas comercialmente en sistemas hidráulicos.

El diagrama del circuito y su conexión con el CCP se muestra en la Figura 1 (a). El circuito está provisto con un generador de vapor (GV) construido en acero inoxidable, el fluido térmico circula en su interior por medio de un intercambiador de calor (IC) con forma de serpentina. El generador tiene incorporado un manómetro (P), un medidor de nivel de agua (N) con una escala graduada cuya apreciación es de 50 ml/mm y una válvula de seguridad tipo resorte (VS). Entre el generador de vapor y la bomba (B) se ubica un tanque pulmón (TP). La función principal del (TP) es permitir la expansión volumétrica del fluido térmico y mantener una temperatura constante a la entrada del intercambiador de calor (IC), compensando así cualquier fluctuación en la radiación solar incidente. Esta parte contiene un sistema de calentamiento auxiliar (RC) compuesto de 4 resistencias halógenas de 350W al TP, cada una de ellas alojadas en un tubo de acero de 25 mm de diámetro y de 1,6 mm de espesor, los cuales están soldados al TP con una aleación de cobre-zinc. El accionamiento del sistema auxiliar de calentamiento es por medio de dos relés de estado sólido comandados por un dispositivo de control tipo PID modelo N1100, de la marca Novus. El generador de vapor (GV), la Bomba (B) y el tanque de pulmón (TP) se encuentran en un recinto que está aislado térmicamente (A). El fluido térmico es impulsado por una bomba de bajo caudal modificada para funcionar a mayor temperatura, es del tipo a engranajes, marca Venturi Serie A92. Esta bomba tiene un caudal máximo de 8 l/min y es accionada con un motor trifásico de 0,5 Hp. El caudal del fluido térmico se puede modificar por un variador de frecuencia modelo ATV11, marca Schneider Electric, el cual permite modificar la velocidad de rotación del motor que acciona la bomba. La bomba serie A92 seleccionada desplaza 4 ml por rpm. En la Figura 1 (b) se muestra el prototipo de sistema descrito sin la aislación colocada en las mangueras flexibles.



(a) *(b)*

Figura 1: (a) Esquema del circuito térmico con identificación de los sensores. (b) Imagen del sistema ensayado en el interior.

El TP se aloja por encima de B y dentro del recinto aislado. La salida de B está conectada al IC que se encuentra en el interior del GV, que es un recipiente de acero inoxidable. Estos elementos se encuentran montados en una sección de la caja aislada (A), que tiene un recubrimiento de madera de fenólico de 10 mm de espesor y está compuesta de placas de poliestireno expandido de alta densidad de 50 mm de espesor. Los detalles constructivos de este sistema fueron presentados por Stoll et al (2023).

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

Se llevaron a cabo dos tipos de ensayos experimentales en el interior con el CCP conectado al circuito térmico, el primero sin generar vapor y otro produciendo vapor.

Los ensayos sin generación de vapor consistieron en determinar las temperaturas en cada punto del sistema sin aislación colocada en las mangueras flexibles que conectan el CCP con el GV. Luego, se repitieron las mediciones, pero con aislación térmica aplicada en las mangueras flexibles. Durante estas pruebas, la energía fue provista por el sistema de calentamiento auxiliar, como se muestra en la Figura 1 (b). En ambas pruebas, se midió el consumo de energía necesario para alcanzar una temperatura de 125 °C a la entrada del intercambiador de calor (IC).

Los ensayos con generación de vapor se realizaron para determinar el tiempo de respuesta del sistema, la altura del fluido térmico que mejora el aprovechamiento de la estratificación y el caudal de vapor generado.

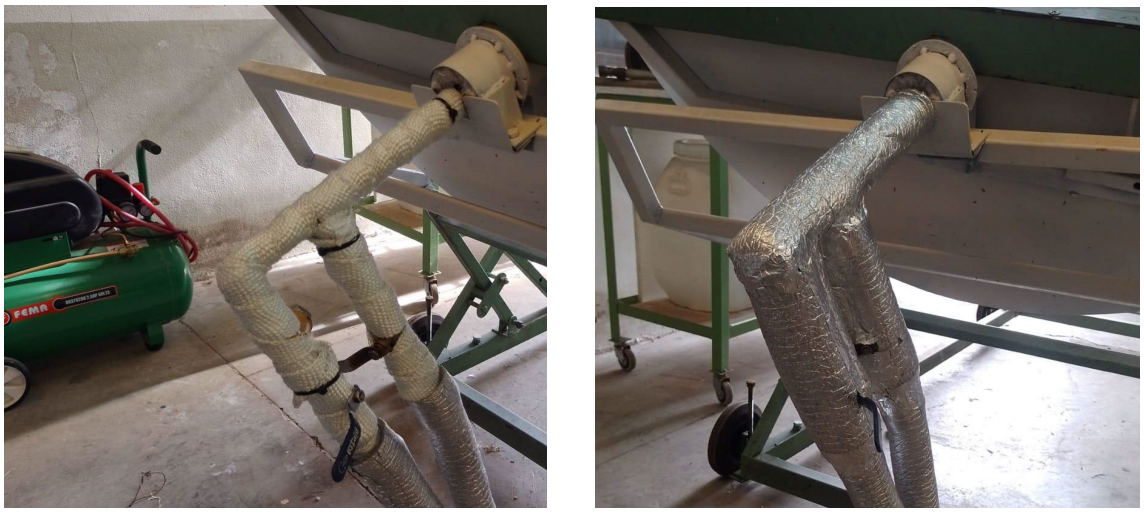
Para la medición de temperatura se utilizaron termocuplas calibradas tipo T, insertadas en vainas de acero inoxidable. Para mejorar la transferencia de calor entre las termocuplas y las vainas se utilizó grasa siliconada. Para registrar la temperatura ambiente (T_a), se utilizó una termocupla colocada a una distancia prudente de cualquier fuente térmica que pudiera alterar la medición. En el generador de vapor se midió la temperatura dentro del recinto aislado (T_Ai), la temperatura del fluido térmico a la salida del tanque pulmón (TP_o), a la salida de la bomba (T_Bo), a la salida generador vapor (T_GVo), y la temperatura del fluido que retorna al tanque pulmón (T_GVi). En el CCP se registraron la temperatura del fluido térmico a la entrada (T_Ri) y la salida T_Ro.

Las variables se almacenaron cada 30 segundos mediante un adquisidor de datos Agilent 34972A. Además, se colocaron dos vatímetros digitales monofásicos para medir el consumo de las resistencias calefactoras (P_RC). Los cuales fueron contrastados por un vatímetro digital YOKOGAWA modelo WT11. Para determinar el caudal de vapor generado, se utilizó un medidor de nivel acoplado al GV y se registraron las lecturas del nivel a intervalos regulares de tiempo.

Ensayo en el interior sin generación de vapor

Los ensayos consistieron en llevar al sistema hasta una temperatura de 125 ºC a la entrada del intercambiador de calor (IC) mostrando el comportamiento desde que la temperatura T_GVi supera los 80 ºC. Durante este tiempo se registraron las temperaturas en cada parte del circuito del fluido térmico cada 30 s y el consumo de energía eléctrica necesario para alcanzar esta temperatura. El flujo másico del fluido térmico se fijó en un caudal 0,0168 kg/s. Si bien en estas condiciones el flujo es laminar, de esta manera se maximiza el salto térmico en el tubo receptor; lo cual permite obtener una adecuada medición de ganancia de calor en el concentrador ya que se reducen los errores relativos en la medición de la temperatura (Garnica et al, 2018)

En la Figura 2 (a) y (b) se ven los detalles de la aislación efectuada a las mangueras flexibles que conectan el CCP con el GV. Se utilizó cinta de fibra de vidrio aislante ignífugo de 1,5 mm de espesor cómo primera capa en las tuberías metálicas y luego se recubrió a este conjunto con cobertor aislante aluminizado para caños con un diámetro de ¾" (19,05 mm). La configuración adoptada es para prevenir la degradación por el contacto que puede sufrir el polietileno que compone la aislación del cobertor.



(a) *(b)*

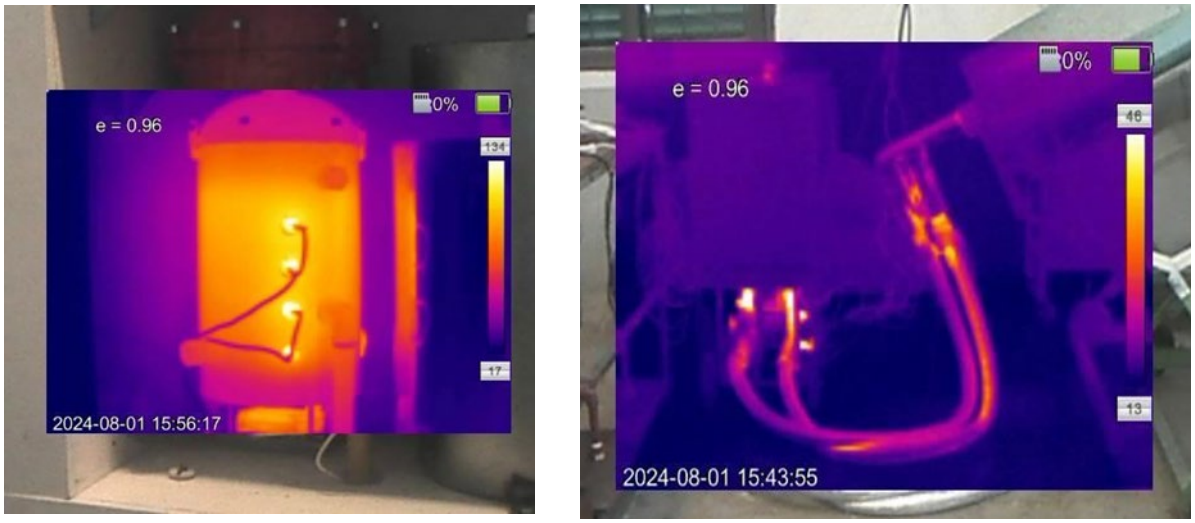
Figura 2: (a) Aislación interna con cinta de fibra de vidrio aislante. (b) aislación externa con cobertor aislante aluminizado.

El elemento que recibe energía es el tanque pulmón (TP) por medio de las resistencias halógenas adosadas. La bomba (B), el generador de vapor (GV) sin generación de vapor, las conexiones entre el CCP y el GV, y el CCP pierden energía al medio ambiente durante el funcionamiento. En la Tabla 1 se muestran los saltos de temperatura promedio de los distintos componentes del circuito del fluido térmico.

Tabla 1: Resumen de los saltos térmicos de cada elemento del circuito térmico.

Elemento del circuito térmico	Sin aislación [ºC]	Con Aislación [ºC]
Bomba Hidráulica (TP_o-T_Bo)	1,3	1,8
Generador de vapor (T_Bo-T_GVo)	2,3	2,1
Conexión GV - CCP (T_GVo-T_Ri)	15,7	4,8
Conexión CCP - GV (T_Ro-T_GVi)	15,1	4,3
CCP (T_Ro-T_Ri)	1,3	1,2

En la Figura 3 (a) se muestra una termografía del tanque pulmón en donde se distingue levemente la estratificación en la parte superior del cilindro que recubre la resistencia calefactora superior. Cuando la temperatura de salida del fluido térmico llega los 125 ºC se establece una franja de 3 cm de altura donde el fluido tiene más temperatura. En la Figura 3 (b) se observa la termografía de la conexión entre el CCP y el GV.



(a) *(b)*

Figura 3: (a) termografía del tanque pulmón. (b) Termografía de las conexiones entre el CCP y el GV

Con el objetivo de aprovechar la estratificación del fluido y mejorar así el desempeño del sistema de generación de vapor, se llevaron a cabo ensayos enfocados en ajustar el nivel del fluido térmico dentro del tanque pulmón. El nivel inicial del fluido térmico se estableció 5 mm por encima del cilindro que recubre la resistencia calefactora superior. La bomba hidráulica extrae el fluido a ese mismo nivel. Durante los ensayos, se midió la altura del fluido con una pipeta insertada en la parte superior del tanque pulmón, observando un aumento de 25 mm en el nivel del fluido térmico durante el proceso de calentamiento debido a su expansión térmica. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos, donde se observa un salto térmico inicial de 14,8 °C en el TP entre TP_o y T_GVi.

Por otro lado, se determinó que la eficiencia del sistema de calentamiento auxiliar construido, considerando el salto térmico del TP y el flujo másico, es cercano a la unidad. Las mediciones de

consumo de energía del sistema establecieron que se necesitan 1,385 kWh para elevar la temperatura a la entrada de IC de 18 ºC a 126 ºC en el lapso de una hora.

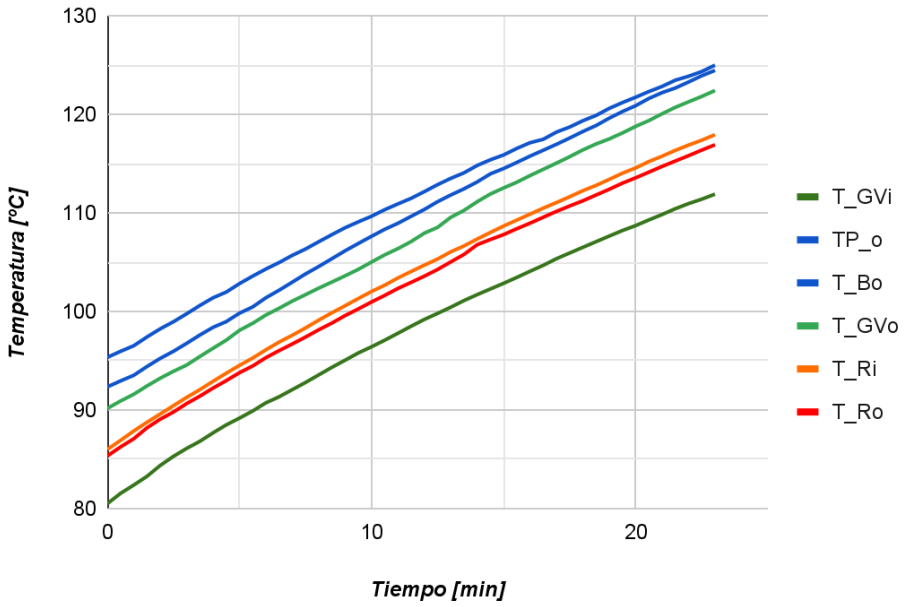


Figura 4: Evolución de temperaturas con aislación de las mangueras flexibles y con modificación de la altura del fluido térmico.

Ensayo en el interior con generación de vapor

En la Figura 5 se muestra la evolución de temperaturas del sistema de generación de vapor funcionando con el sistema de calentamiento auxiliar.

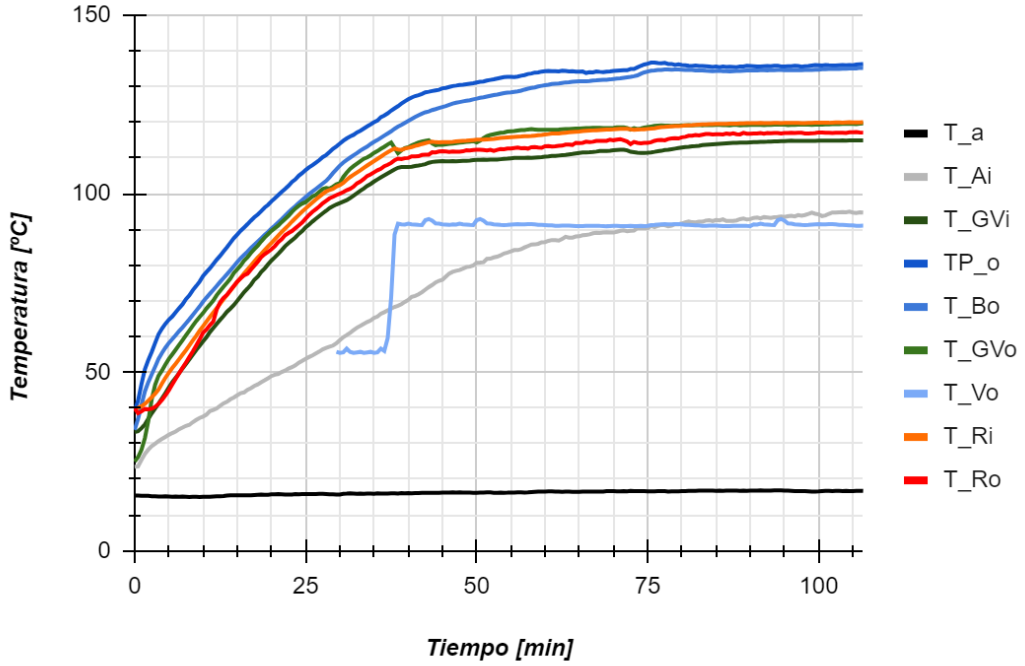


Figura 5: Evolución de temperaturas del sistema con generación de vapor.

Durante esta prueba se elevó la temperatura del sistema hasta que la temperatura T_Bo alcanzó los 100 ºC, luego se agregaron 4,5 dm^3 de agua destilada a una temperatura de 95 ºC, se mantuvo la válvula de salida de vapor abierta. El flujo de vapor se estabilizó cuando la temperatura de T_Bo alcanzó los

125 ºC. El llenado del generador de vapor con agua precalentada se realizó al minuto 26 y luego de 20 minutos se produjo el régimen estable de vapor, esta situación queda manifestado en la T_Vo, cabe aclarar que T_Vo es medida mediante un dedo frío colocado a la salida de GV, es por esto que su valor es menor que la temperatura de saturación del agua cuando se establece un flujo de vapor constante. Luego, cada un intervalo de 15 minutos se registró la variación de nivel de agua del generador de vapor para determinar el caudal de vapor. La temperatura del aire interior T_Ai muestra que el sistema tiende a estabilizarse.

En la Figura 6 se ilustra el fenómeno de ebullición de alberca. Según lo descrito por Bergman y Lavine (2011), este proceso es caracterizado por la formación de burbujas en puntos localizados de la superficie caliente. En la curva roja, se observa que cuando la temperatura del fluido T_Bo supera los 135 ºC, el salto térmico en el intercambiador de calor (IC) también aumenta significativamente, superando los 15 ºC. Este incremento en la diferencia de temperatura indica un cambio en el régimen de transferencia de calor, lo que sugiere una mayor eficiencia en el intercambio térmico. Durante esta prueba se observó que el sistema comienza a generar vapor de manera constante cuando la temperatura de T_GVo alcanza los 100 ºC.

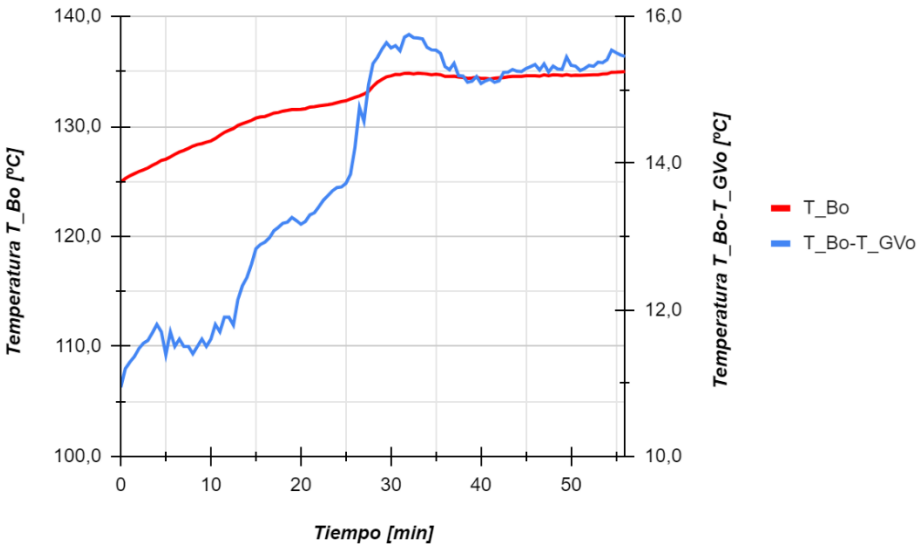


Figura 6: Saltos térmicos en el intercambiador de calor (IC).

En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos en esta prueba. El cálculo de la eficiencia térmica (Ƞ) del sistema considerando solo el sistema auxiliar de calentamiento se realizó mediante la Ec. 1. Esta ecuación representa la relación entre la energía del vapor generado por unidad de tiempo y la potencia eléctrica aportada al sistema (P_{RC}) en vatios, en condiciones de funcionamiento de régimen estable. Donde $\dot{m}_v$ en el flujo másico de vapor en kg/s y λ entalpia de vaporización del agua kJ/kg. Considerando las propiedades termofísicas del agua se obtuvo que el aprovechamiento de la energía es del 45 %.

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \lambda}{P_{RC}} . 100 \qquad (1)$$

Tabla 2: Resultados del ensayo en el interior.

Vapor generado	Energía suministrada	Eficiencia térmica
1 kg/h	1,379 kWh	45 %

CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron distintas experiencias que permitieron determinar el comportamiento de un circuito térmico conectado a un CCP. Si bien no se evaluó el desempeño del CCP en el exterior, el sistema auxiliar de calentamiento permitió determinar la influencia de sus componentes en el funcionamiento.

Los resultados muestran que si bien la aislación térmica permite reducir el salto de temperatura que se produce en las mangueras flexibles, este valor sigue siendo considerable comparado con los saltos térmicos que se producen en las otras partes del sistema.

El nivel del fluido térmico tiene influencia en el desempeño del sistema, los resultados muestran que existe una estratificación del fluido en el tanque pulmón. Es por esto, que es conveniente ajustar el nivel de manera que la bomba succione la parte del fluido que está a mayor temperatura.

Las pruebas mostraron que el sistema tiene un tiempo de calentamiento de una hora sin generación de vapor. También el sistema estará en régimen cuando la temperatura de T_GVo sea de 100 ºC.

El aprovechamiento de la energía provista a este sistema con aislación es del 45 %, esta performance está influenciada por el fenómeno de alberca, consiguiendo un mejor resultado cuando la temperatura en el ingreso del IC (T_Bo) es del orden de 135 ºC.

Se propone como trabajo a futuro evaluar el desempeño del sistema de generación de vapor considerando la utilización de energía solar en condiciones de cielo claro.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto por medio de los proyectos: PPI Período 2024 - 2026 y al PICT SSPR 2021.

REFERENCIAS

Aparicio H., Dellicompagni P., Cadena C. (2023). Software para el estudio del desempeño térmico de sistemas de concentración solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp. 146-157, 2023, ISSN 2796-8111.

Akbarzadeh S., Valipour M. (2018). Heat Transfer Enhancement in Parabolic Trough Collectors: A Comprehensive Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 92 198-218. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.093.

Azteq [en linea]: The largest concentrated solar thermal plant in Europe built in Turnhout. Dirección URL <The largest concentrated solar thermal plant in Europe built in Turnhout. - Azteq> [consulta: el 29 de Julio de 2024].

Behar O. (2018). Solar thermal power plants – A review of configurations and performance comparison. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 92, Pages 608-627. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.102.

Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer 7th ed., John Wiley & Sons.

Daghero J., Garnica J., Barros J., Rodriguez R. (2013). Concentrador Cilíndrico-Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor para la Extracción de Aceites Esenciales de Plantas Aromáticas y Medicinales. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 1. pp 02.37-02.44.

Daghero J., Garnica J., Buitrago A., Dubini D., Lorenzo C., Manero C., Marticorena M., Martinez M., Sayago U. (2015). Concentrador Cilíndrico Parabólico Aplicado a la Generación de Vapor de Uso Industrial. Evaluación Óptica y Térmica de un Prototipo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp.03.45-03.54. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433.

Dellicompagni P., Linares J. (2023). Simulación numérica de un concentrador solar cilindro parabólico de baja entalpía con Simusol. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp. 181-192, 2023, ISSN 2796-8111.

Dellicompagni P., Salvo A., Rojas Villena M. (2023). Diseño, construcción y ensayo de un concentrador solar cilindro parabólico para fines educativos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp. 550-509, 2023, ISSN 2796-8111.

Energynest [en línea]: Avery Dennison pone en marcha la mayor central termosolar y unidad de almacenamiento térmico de Europa en Turnhout (Bélgica). Dirección URL: <Inauguración del proyecto de almacenamiento térmico con Avery Dennison (energy-nest.com)> [consulta: 29 de Julio de 2024].

Garnica, J., Daghero, J., Longoni, D., Ortiz, M. (2018). Circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial utilizando un concentrador cilíndrico parabólico. Diseño, desarrollo y evaluación térmica. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 22, pp 02.13-02.23 Impreso en la Argentina. ISSN 2314-1433 - Trabajo seleccionado de Actas ASADES 2018.

Hansen k., Vad Mathiesen B. (2018). Comprehensive assessment of the role and potential for solar thermal in future energy systems. Solar Energy, Volume 169, Pages 144-152. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.039.

IEA [en línea]: Renewable Heat. Recent Trends and Policy Update. Dirección URL <Renewable heat – Renewables 2022 – Analysis - IEA> [consulta: el 2 de Julio de 2024]

Paratherm [en línea] Fluido de Transferencia Térmica.

Dirección URL <https://grupoararat.com/pdf/Paratherm/Paratherm-nf-spanish-72.pdf> [consulta: 08 de agosto de 2024].

Stoll R., Daghero J., Podversic E., Capozzuca C., Paisio G. (2023). Evaluación del desempeño de un circuito térmico para la generación de vapor de uso industrial con energía solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 27, pp. 158-168, 2023, ISSN 2796-8111.

Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2024). Solar Heat World Wide - Edition 2024. En Solar-Heat-Worldwide-2024.pdf (iea-shc.org). Recuperado de URL el 25 de Julio de 2024.

EVALUATION OF AN INDUSTRIAL STEAM GENERATION SYSTEM ASSISTED WITH CONCENTRATED SOLAR ENERGY.

ABSTRACT

In this work the performance of a low enthalpy steam generation system for industrial processes is evaluated. The system includes a thermal loop coupled to a parabolic trough solar collector. To compensate for fluctuations in incident solar radiation and ensure a constant temperature in the thermal fluid, an auxiliary energy system is included. In order to evaluate the thermal gap in each of its components and the steam generation capacity, experimental tests were carried out indoors using only the energy from the auxiliary system. With the system isolated, the thermal fluid reached a temperature of around 135 °C at the inlet to the steam generator. The thermal jump in the heat exchanger was 15 °C. The response time of the system was also studied. This will allow determining the behavior of the PTC in an outdoor test. The steam flow generated in steady state was 1.0 kg/h and the global thermal efficiency was 45 %.

Keywords: Thermal energy, parabolic trough collector, thermal circuit, steam production

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 113-124, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

INFLUENCIA DEL MATERIAL DEL ABSORBEDOR Y LA CUBIERTA TRANSPARENTE DE UN COLECTOR DE PLACA PLANA EN SU RENDIMIENTO TÉRMICO INSTANTÁNEO

Jorge R. Barral[1], Juan M. Lucchini[1], Javier H. Garnica[1], Sebastián Spasoff Mitcoff[1], María V. Milanesio[1]
[1]Grupo de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
Tel. 0358-4758842 – Fax 0358-4676246 - e-mail: jbarral@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN: Se analiza la consecuencia de utilizar colectores diseñados para sistemas compactos termosifónicos en instalaciones que funcionan con circulación forzada. Se realizó para ello un ensayo de rendimiento térmico instantáneo utilizando la norma IRAM 210002-1 a un colector separado de su almacenamiento. Dicho colector tiene un absorbedor con recubrimiento de pintura mate y una cubierta transparente de policarbonato alveolar. Del ensayo se tomaron los parámetros de rendimiento óptico y coeficiente de pérdidas por temperatura para ser utilizados en el procedimiento de cálculo de sistemas solares activos f-chart. Para realizar una comparación, se seleccionó un colector importado, disponible en el mercado local, cuyo absorbedor posee un recubrimiento de superficie selectiva y la cobertura transparente es de vidrio templado con bajo contenido de hierro. De la comparación para un caso particular, se observa que para dar la misma prestación es necesario un 37,5 % más de superficie activa de captación. Se muestran los resultados de los ensayos en gráficos y los cálculos de f-chart en tablas. Se realizan consideraciones respecto a mejoras a implementar en la fabricación de los colectores, como así también a la necesidad de acciones políticas y educativas para un mejor desarrollo de las aplicaciones solares térmicas en el país.

Palabras clave: colector solar de placa plana, superficie selectiva, policarbonato, eficiencia térmica.

INTRODUCCIÓN

El uso de la energía solar para calentamiento de agua es una de las aplicaciones más tradicionales de las energías renovables, implicando los beneficios de ser energía distribuida, no contaminante, de uso gratuito, inacabable y económicamente convenientes (Albizzati, 2013), por lo cual está creciendo su utilización en todo el planeta (Weiss y Spörk-Dür, 2023). En las aplicaciones de baja temperatura (menores a los 100 °C) se cuenta con distintas tecnologías y sistemas. En lo que respecta a tecnologías (Placco et al., 2010) se utilizan sistemas de captación basados en colectores de placa plana, y tubos evacuados, estos últimos con variantes como de tubos inundados, colectores “U pipe” (cañerías en U dentro del tubo), o “heat pipe” (tubo de calor). Estos captadores pueden conformar sistemas compactos, en los cuales cada superficie captadora está asociada a un determinado tanque de almacenamiento, o también se pueden conformar sistemas “Split” donde distintas combinaciones de colectores y unidades de almacenamiento pueden combinarse de acuerdo a la aplicación y nivel de demanda.

Los sistemas compactos generalmente funcionan con un proceso de calentamiento basado en la convección natural del calor (termosifónicamente) con aplicaciones mayormente residenciales, donde los tamaños máximos de almacenamiento no superan los 400 litros de agua. Estos equipos son muy simples y por la ausencia de bomba impulsora se les clasifica como “sistemas pasivos”. Cabe mencionar también un caso particular de equipo pasivo, que son los de colectores con acumulación integrada, en los cuales la misma superficie absorbedora de radiación hace de almacenamiento.

En lo que respecta a grandes consumos, para mejor aprovechamiento y eficiencia de las instalaciones se utilizan combinaciones con varios colectores para la función captadora (Ahmed et al., 2021). En estos casos el almacenamiento se encuentra concentrado y la circulación del fluido caloportador se realiza con una bomba, y de allí la designación de estos sistemas como "activos". La utilización de la bomba hace funcionar más eficientemente a los sistemas de captación y además permite ubicar al almacenamiento por debajo de los colectores, generalmente dentro de la edificación, lo cual es beneficioso en lo concerniente a pérdidas térmicas.

En la República Argentina el mercado de la energía solar térmica de baja temperatura viene creciendo paulatinamente, aunque muy lejos de los niveles que permitirían las condiciones climáticas, tecnológicas y económicas del país (Weiss y Spörk-Dür, 2023). Se disponen en el mercado local de diversas tecnologías, siendo mayormente importados los equipos de tubos evacuados, y habiendo un desarrollo bajo de fabricación local, basado fundamentalmente en sistemas compactos con colectores de placa plana, como se desprende del censo solar realizado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI (Sabre et al., 2020).

Los sistemas compactos de fabricación nacional basados en colectores de placa plana, suelen estar fabricados con absorbedores sin superficie selectiva y con cubierta transparente de policarbonato alveolar. Las superficies selectivas se obtienen mediante complejos procesos electroquímicos (Hernández Fereira, 2013), que es una tecnología no disponible en el país. Alternativamente se utilizan pinturas no reflectantes, que son buenas para la absorción de radiación solar, pero que también emiten mucho en la zona del infrarrojo. Por otro lado, las superficies transparentes de policarbonato, si bien funcionan bien como aislantes, son mecánicamente resistentes y de fácil manipulación, poseen menor transmitancia que el vidrio, y no son opacas al infrarrojo. La mejor superficie transparente es el vidrio templado, disponible en el país, pero de un costo elevado.

En este artículo se analiza el caso de una empresa que considera la posibilidad de utilización de los mismos colectores de sus sistemas compactos para aplicaciones de grandes consumos usando sistemas activos y consultó al respecto al Laboratorio de Energía Solar de la UNRC (LES). Ante la duda de cómo se podrían comportar los colectores que fabrican, se decidió realizar un ensayo de rendimiento térmico de acuerdo a la norma IRAM 210002-1 (IRAM, 2016), que es una adaptación de las normas internacionales más utilizadas en el mundo. Este ensayo tiene la particularidad de arrojar como resultado unos parámetros que permiten predecir el comportamiento de un sistema mediante el uso de un método ampliamente utilizado, llamado f-chart (Duffie et al., 2020). Los resultados fueron complementados con análisis numéricos basados en la teoría del funcionamiento de colectores de placa plana.

ENSAYO DE RENDIMIENTO TÉRMICO DEL COLECTOR DE PLACA PLANA

El ensayo previsto en la IRAM 210002-1 se basa en la determinación de la función eficiencia instantánea del colector, η_i , mediante la siguiente ecuación, que plantea un cociente entre la potencia calórica útil que entrega el colector y la irradiación que este recibe en su superficie absorbedora:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_c G_T} \tag{1}$$

Donde:

η_i= eficiencia instantánea del colector [adimensional]
$\dot{m}$= flujo másico del fluido caloportador a través del colector [kg/s]
c_p= calor específico del fluido caloportador a presión constante [kJ/(kg.ºC)]
T_o= temperatura de salida del líquido del colector [ºC]
T_i= temperatura de entrada del líquido al colector [ºC]
A_c= área efectiva del colector [m^2]
G_T= radiación global incidente sobre el área efectiva del colector [W/m^2] (medida con piranómetro)

Todos los términos del miembro derecho de la ecuación (1) se miden con los correspondientes instrumentos: caudalímetro, sensores de temperatura, cinta métrica y piranómetro. En la Figura 1 se muestra un esquema del montaje que debe realizarse para llevar adelante el mencionado ensayo, con los instrumentos de medición, y equipos accesorios como bomba, calentador, válvulas, etc.

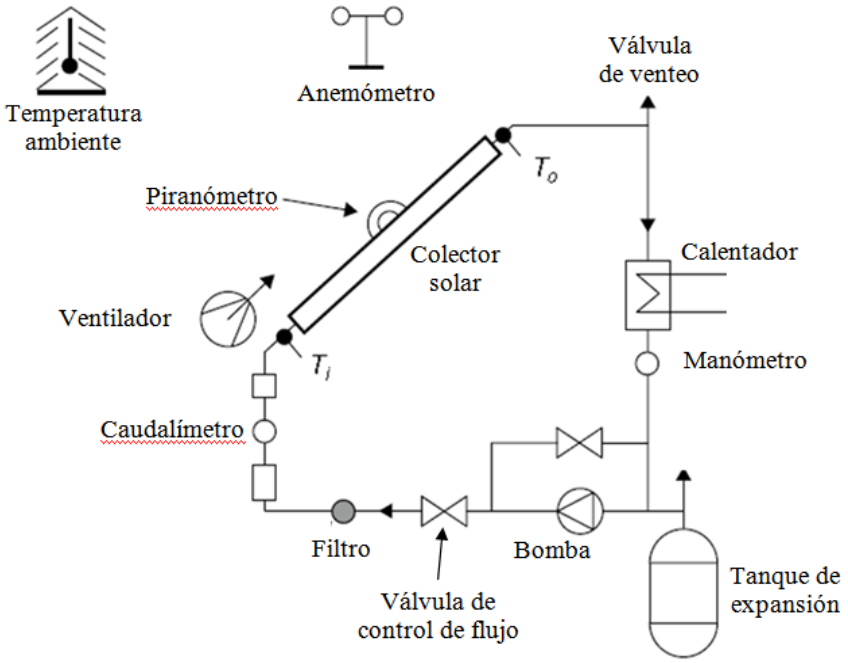


Figura 1: Equipamiento necesario para realizar el ensayo de rendimiento térmico instantáneo del colector.

Teniendo en cuenta la ecuación característica de un colector de placa plana para determinar el calor útil que este es capaza de proporcionar:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \tag{2}$$

Donde:

Q_u= Potencia calórica provista por el colector [W]
F_R= Factor de remoción de calor del colector [adimensional]
S= energía absorbida por la superficie activa del captador [W/m^2]
U_L= coeficiente global de pérdidas del colector [W/(ºC . m^2)]
T_a= temperatura ambiente [ºC]

Luego, considerando que el ensayo se realiza en el mediodía solar donde los efectos angulares son despreciables, y considerando despreciable la reflectancia del suelo, la energía absorbida se puede representar por:

$$S = G_T(\tau\alpha) \tag{3}$$

Donde

$(\tau\alpha)$ = producto transmitancia absortancia [adimensional]

Luego, combinando las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtiene

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_T} = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \tag{4}$$

Esta última ecuación se puede interpretar como la ecuación de una recta, donde $F_R(\tau\alpha)$ es la ordenada al origen, $-F_R U_L$ es la pendiente y el término $(T_i - T_a)/G_T$ es la variable independiente. La ecuación (4) es única para cada colector, ya que por más que el ensayo se realice en otras condiciones climáticas, el ajuste experimental de esta recta arrojará siempre los mismos valores de ordenada al origen y pendiente. Para ello, es muy importante mantener la constancia del flujo másico a través del colector, que habitualmente es establecido por el fabricante del equipo (caudal de diseño), dado que, si esto no ocurre, variará el Factor de remoción de calor del colector (Duffie et al., 2020) y también lo harán la ordenada al origen y la pendiente.

La misma ecuación (4) aclara también el hecho de que la eficiencia (rendimiento térmico) de un colector no es una constante, sino una función, que irá adoptando distintos valores a medida que cambie la variable independiente $(T_i - T_a)/G_T$. Al término $F_R(\tau\alpha)$ se le suele denominar "rendimiento óptico" ya que es el que se da cuando T_i es igual a T_a y el colector presenta muy poco calentamiento, mientras que el término $-F_R U_L$ está asociado a la baja de rendimiento por el calentamiento que sufre el colector; mientras más empinada la pendiente de la recta, más grandes están siendo las pérdidas de calor, y la eficiencia instantánea del colector irá disminuyendo.

El mencionado ensayo fue llevado a cabo en el LES en marzo de 2024. Como los fabricantes no propusieron ningún caudal preestablecido para su colector, siguiendo lo especificado por la norma, se adoptó un caudal de 0,02 kg/s por metro cuadrado de colector. En la Fig. 2 se muestra el montaje dispuesto, en donde se utilizó la máquina de ensayos construida en el propio laboratorio, que cuenta con tres tanques de almacenamiento de agua de 100 litros cada uno, dos bombas de circulación, 6 resistencias calefactoras de 1500 W cada una, dos caudalímetros, y varias redes de circulación de agua para acondicionarse a distintos tipos de ensayo de colectores y equipos compactos. Se ve en la Fig. 2 (a) las entrada y salida del colector mediante mangueras aisladas y los instrumentos de medición, mientras que en la Fig. 2 (b) se observa en un plano paralelo al del colector, el piranómetro de precisión para determinar la irradiancia instantánea que llega.



(a) (b)

Figura 2: Realización del ensayo de eficiencia térmica instantánea del colector solar de placa plana.

En este ensayo se utilizó uno de los caudalímetros, el rotámetro que tiene fondo de escala de 4 litros por minuto (4 lpm), que es el que da una buena apreciación de la lectura, considerando el caudal adoptado por norma para el ensayo y el área de colector, que con el correspondiente cambio de unidades implica que se debe mantener un caudal constante de 2,34 litros por minuto. El otro caudalímetro tiene un fondo de escala de 15 lpm y es utilizado para ensayo de equipos compactos según norma IRAM 210004.

Como lo establece la norma, el ensayo fue realizado en días claros, midiéndose 33 puntos, en cada un de los cuales al colector se le pone en estado estacionario a caudal constante. Siendo la ordenada al origen y la pendiente de la ecuación (4) sustancialmente constantes y variando poco la radiación solar y la temperatura en torno al mediodía solar, el recorrido amplio a lo largo del eje de absisas se logra con la variación de la temperatura de entrada del colector mediante los calentadores de la máquina de ensayo.

El resultado del ensaya se encuentra graficado en la Fig. 3, donde se ha graficado una línea recta por el método de los mínimos cuadrados. Comparado con datos típicos de la bibliografía (Kalogirou, 2024), se puede decir que este colector tiene un muy bajo rendimiento óptico, $F_R(\tau\alpha)$= 0,404, aunque pocas pérdidas térmicas, $-F_R U_L$ = -1,54

A fin de comparar este colector con otro que posee un absorbedor con superficie selectiva y una superficie transparente de vidrio templado, se selecciona un colector ofrecido por una empresa importadora que los provee en Argentina (Hissuma, 2024). En la página web de esta empresa se muestran datos constructivos y tipos de materiales que componen tres modelos similares de colectores de placa plana. De los tres modelos ofrecidos, se escoge uno intermedio, que tiene un $F_R(\tau\alpha)$= 0,76, mucho mejor al colector ensayado y un $-F_R U_L$= -4,05, que presenta mayores pérdidas por calentamiento.

Con los datos de ordenada al origen y pendiente del colector importado, se genera la función de eficiencia instantánea establecida por la IRAM 210002-1, que se muestra en la Fig. 4 (recta color azul). Con la ecuación obtenida mediante el método de mínimos cuadrados para el colector de fabricación nacional, se genera también la función de eficiencia instantánea, y se la grafica en la misma Fig. 4 (recta color anaranjado). Se observa allí que aunque aumente la temperatura de funcionamiento de ambos colectores, y por ende las pérdidas, el colector con vidrio templado y superficie selectiva siempre ofrece en todo el rango de absisas un rendimiento instantáneo superior al del colector de fabricación nacional extraído de un sistema compacto. No se justifica en la Fig. 4 una extensión de la graficación para valores de absisas mayores a los mostrados aquí, ya que implicarían valores de temperatura de entrada superiores a la temperatura de ebullición del agua, a la cual no funcionarán nunca este tipo de colectores.

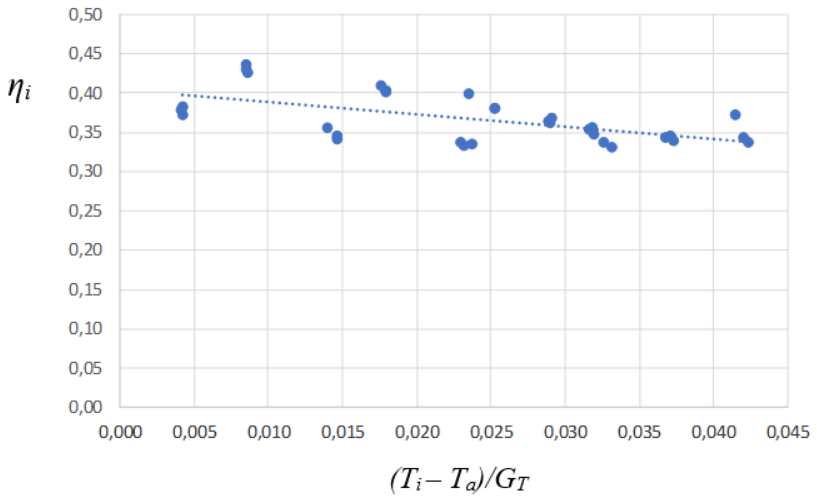


Figura 3: Rendimiento térmico instantáneo del colector de placa plana.

COMPARACIÓN DE INSTALACIONES CON DISTINTOS COLECTORES

A fin de analizar la influencia de las diferencias entre los distintos rendimientos térmicos instantáneos, se procede a realizar el cálculo de una instalación en la cual se deba proveer la misma demanda de agua caliente utilizando los diferentes tipos de colectores. Se supone se tratará de una instalación de una cierta envergadura, donde se justifique la adopción de un sistema activo. Para una demanda de una familia de hasta seis personas en la región templada y cálida del país, funcionan muy bien los equipos compactos que hoy se comercializan y son de muy sencilla instalación.

De esta manera, pensando en aplicaciones como podrían ser un pequeño hotel, un edificio de departamentos, precalentamiento de agua para agroindustria, etc., se puede utilizar el método f-chart mencionado anteriormente.

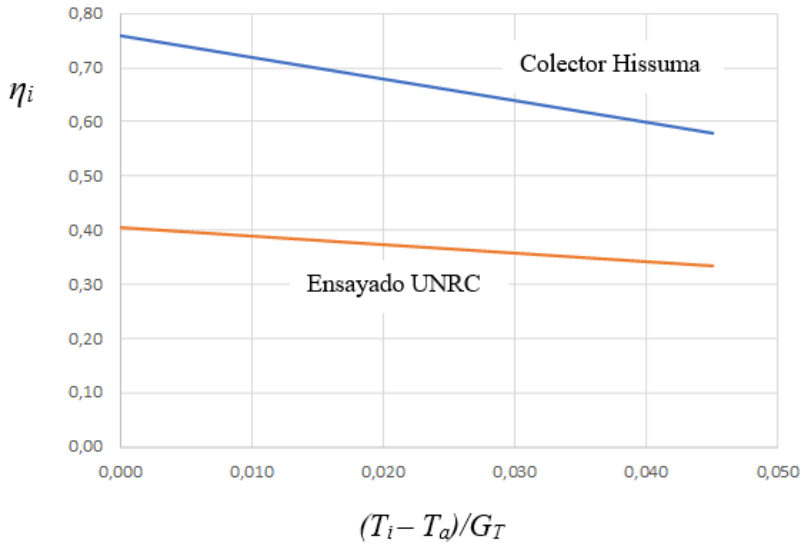


Figura 4: Comparación de los rendimientos térmicos instantáneos de colectores de placa plana.

Para la aplicación de este método, se requieren los valores de $F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$, la demanda de agua caliente y las condiciones climáticas del lugar, incluyendo por supuesto la radiación solar. Se trabaja con valores medios mensuales y el método no es determinístico, es decir, no se determinan los colectores para una dada demanda, sino que debe proponerse una cierta superficie de colectores y la aplicación del método va arrojando el dato de la fracción mensual de energía que se cubre con dicha propuesta. La fracción solar media mensual la identificamos como:

$$f_i = \frac{Energía\ aportada\ por\ equipo\ solar\ en\ el\ mes\ i}{demanda\ total\ de\ energía\ del\ usuario\ en\ el\ mes\ i\ (L_i)} \tag{5}$$

Y la fracción solar anual como

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \tag{6}$$

donde, obviamente, *i* va de uno a 12

Este método ha sido estandarizado para un almacenamiento de agua por metro cuadrado del colector de 75 litros por metro cuadrado. El método prevé correcciones si este valor exacto de almacenamiento por metro cuadrado no se cumple (puede que no haya en el mercado un almacenamiento múltiplo de 75 litros). De esta manera, una vez propuestos los metros cuadrados de colector, se deduce que almacenamiento lo acompañará, se estiman accesorios y mano de obra para ver el costo total de la instalación. De esta manera, se puede ir aumentando la superficie de colección de energía, con el consecuente aumento del almacenamiento y adopción de accesorios adecuados. Este aumento significará una mejor cobertura de demanda de agua caliente con energía solar, pero también un mayor costo del total de la instalación (equipos más mano de obra).

Así, se debe ir contrapesando con el costo de los equipamientos e instalación, asumiendo que jamás se va a poder cubrir la totalidad de la energía demandada, por la existencia de días nublados seguidos y temperaturas invernales bajas. Es normal en la región central de Argentina pensar que se puede dar una cobertura de energía mensual del orden de entre el 75 % al 85 % para aplicaciones residenciales. Más que eso implicaría instalaciones de gran tamaño, con un retorno de inversión muy largo. El retorno de la inversión se obtiene de los ahorros de energía convencional que tendrá el usuario, y el razonamiento a hacer es que el tiempo que demande el retorno de la inversión sea menor a la vida útil del equipo.

El método f-chart se basa en estudios estadísticos realizados para gran cantidad de casos de sistemas de calentamiento activos. La forma detallada de aplicarlo se puede ver en el texto de Duffie et al. (2020). Brevemente consta en la determinación de dos números adimensionales X (que tiene en cuenta las pérdidas de energía) e Y (que considera las ganancias), ambos en función del área de colectores y de la demanda de energía mensual. Para ello es necesario contar también con la radiación en el plano del colector. Este último dato no está habitualmente disponible, contándose en general con datos de radiación media mensual horizontal, por lo cual recurrimos a una herramienta desarrollada previamente (Barral et al., 2022) que convierte la radiación media mensual horizontal en radiación media mensual sobre el plano de inclinado de captación, utilizando datos de latitud y geometría solar.

Se han cargado las ecuaciones y expresiones lógicas en una planilla Excel para simplificar y visualizar bien los cálculos. Luego los datos a cargar en la tabla son los días que tiene cada mes, para el cálculo de la demanda que es una operación calorimétrica que tiene en cuenta los consumos diarios, la temperatura ambiente y los siguientes parámetros:

$H_T =$ Irradiación diaria media mensual sobre la superficie inclinada [MJ/m^2]
$L =$ demanda mensual de energía [MJ]
X e Y que son los términos adimensionales que prevé el método.
$T_s =$ Temperatura de seteo (la que se desea que entregue la instalación) [°C]
$m =$ Masa diaria de agua caliente necesaria para los usuarios de la instalación [kg]
$A_c =$ Área efectiva de colección de energía solar (suma de todos los colectores) [m^2]

Considerando una instalación en la ciudad de Río Cuarto, se tomó como ángulo de inclinación 45°, que es la latitud del lugar más 10° aproximadamente, lo que se recomienda para agua caliente sanitaria residencial. Se supuso la cantidad de agua demandada por 15 usuarios residenciales, a 50 litros por día por persona, que es lo que habitualmente se utiliza para Argentina. El área útil del colector ensayado en el laboratorio fue medida en 1,948 m^2, y la del colector de Hissuma fue tomada de los datos de catálogo publicados en la web Ac= 1,82 m^2 (indicada allí como superficie neta)

Los resultados de aplicar el método para los distintos colectores se muestran en las Tablas 1 y 2. Los datos a aportar a la planilla están resaltados en amarillo. La irradiación solar media mensual sobre el plano del colector proviene del procesamiento de la radiación diaria media mensual explicado previamente, la temperatura ambiente media mensual se obtiene de datos estadísticos del Servicio Meteorológico Nacional.

En la quinta columna, se lista la demanda mensual de agua caliente. La misma se calcula con la ecuación calorimétrica:

$$L = c_p\, m\, (T_s - T_a) \qquad (1)$$

c_p= calor específico del agua [kJ/(kg.ºC)]
$m =$ Masa diaria de agua caliente necesaria para los usuarios de la instalación [kg]
T_s= temperatura de seteo [ºC]
T_a= temperatura de entrada del agua de reposición al sistema [ºC]

Los valores de demanda se generan con la carga de datos, al asumirse la masa diaria de agua y la temperatura de seteo. Como temperatura del agua de reposición, se adopta la temperatura diaria media mensual, asumiendo que la misma proviene del tanque de almacenamiento general de la casa, y esta va tomando los valores de la temperatura media mensual por estar expuesta al ambiente exterior. De allí se observa la variación de la demanda en forma creciente hacia los meses invernales, por ser necesaria una elevación mayor de la temperatura en esos meses.

En dos últimos renglones al centro, están los datos de ordenada al origen y pendiente de pérdidas térmicas de los colectores. Allí se han ido introduciendo en los últimos renglones de la izquierda distintos valores fijos de temperatura de seteo (unos grados más que la de ducha, estimada en 42 °C) y

cantidad de agua diaria, en kilogramos. Finalmente, distintas áreas de colector, hasta aproximarse a un valor cercano al 80 % de cobertura anual de energía solar.

Tabla 1: Resultado de la aplicación de método f-chart usando colectores solares de Hissuma

Mes	días por mes	HT [MJ/m2]	Ta [ºC]	L [MJ]	X Adimens.	Y Adimens.	f Adimens.	¿f<1?	En. Solar [MJ]
Enero	31	20,46	23,23	2119	3,47	1,93	1,023	1,000	2119
Febrero	28	20,17	22,40	1987	3,38	1,83	0,996	0,996	1978
Marzo	31	18,70	19,80	2453	3,13	1,52	0,889	0,889	2180
Abril	30	17,73	16,40	2694	2,88	1,27	0,785	0,785	2114
Mayo	31	15,73	12,80	3134	2,66	1,00	0,646	0,646	2025
Junio	30	15,18	9,50	3344	2,51	0,88	0,577	0,577	1929
Julio	31	14,64	8,95	3509	2,48	0,83	0,549	0,549	1927
Agosto	31	16,95	11,18	3292	2,58	1,03	0,666	0,666	2193
Septiembre	30	17,82	13,30	2986	2,69	1,15	0,732	0,732	2185
Octubre	31	18,69	17,49	2677	2,95	1,39	0,840	0,840	2250
Noviembre	30	19,39	20,14	2341	3,16	1,60	0,920	0,920	2153
Diciembre	31	19,15	22,35	2204	3,37	1,73	0,961	0,961	2118
energía total anual demanda →				**32738**			**total solar anual →**		**25170**

Ts=	45	ºC	$F_R U_L$ =	4,05		F= Σ(f.L) / ΣL=	**0,769**
Ac=	9,1	m^2	$F_R(\tau\alpha)$ =	0,76			
m=	750	kg					

Tabla 2: Resultado de la aplicación de método f-chart usando colectores solares diseñados originalmente para sistemas compactos

Mes	días por mes	HT [MJ/m2]	Ta [ºC]	L [MJ]	X Adimens.	Y Adimens.	f Adimens.	¿f<1?	En. Solar [MJ]
Enero	31	20,46	23,23	2119	2,26	1,75	1,030	1,000	2119
Febrero	28	20,17	22,40	1987	2,20	1,67	1,000	1,000	1986
Marzo	31	18,70	19,80	2453	2,04	1,39	0,888	0,888	2177
Abril	30	17,73	16,40	2694	1,87	1,16	0,781	0,781	2103
Mayo	31	15,73	12,80	3134	1,73	0,91	0,644	0,644	2017
Junio	30	15,18	9,50	3344	1,63	0,80	0,575	0,575	1922
Julio	31	14,64	8,95	3509	1,62	0,76	0,548	0,548	1923
Agosto	31	16,95	11,18	3292	1,68	0,94	0,662	0,662	2177
Septiembre	30	17,82	13,30	2986	1,75	1,05	0,726	0,726	2169
Octubre	31	18,69	17,49	2677	1,92	1,27	0,837	0,837	2240
Noviembre	30	19,39	20,14	2341	2,06	1,46	0,919	0,919	2152
Diciembre	31	19,15	22,35	2204	2,20	1,58	0,964	0,964	2125
energía total anual demanda →				**32738**			**total solar anual →**		**25111**

Ts=	45	ºC	$F_R U_L$ =	1,54		F= Σ(f.L) / ΣL=	**0,767**
Ac=	15,58	m^2	$F_R(\tau\alpha)$ =	0,404			
m=	750	kg					

Se ven en estas tablas en la penúltima columna unos valores igualados a uno (1) resaltados en celeste. Es valor se coloca arbitrariamente (operación lógica) cuando la fracción solar mensual de la columna anterior da mayor que uno (1). Esto significa, que en dicho mes la energía solar ha superado a la demanda, y como esa energía no se puede guardar para los meses “fríos”, el excedente directamente se

desecha y se toma como energía cubierta la total de la demanda (5ta columna). En los meses invernales las fracciones solares llegan a valores del orden del 55 %. En la pretensión de querer aumentar esos valores, se requeriría mucha más área de colectores, lo cual implicaría un excesivo derroche de energía en los meses cercanos al verano (más fracciones de valor "1"), con una inversión inicial muy grande de equipos y mano de obra. Por esta razón, los valores de fracciones solares anuales se ajustan a las condiciones climáticas de las distintas regiones.

Para llegar a un número redondo de colectores que permita la comparación, se pusieron 5 colectores de la empresa Hissuma (que totalizaron 9,1 m^2), que dieron una fracción solar anual de 0,769. Para dar un valor bien parecido de fracción solar con el colector de sistema compacto, 0,767, fue necesario utilizar 8 colectores (totalizando 15,58 m^2). Se ve así que la penalidad por un menor rendimiento térmico instantáneo resulta en una necesidad de colocar una superficie mayor para satisfacer en un grado razonable la demanda de agua caliente.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Atentos a los antecedentes bibliográficos, era de esperar que el rendimiento térmico de un colector sin superficie selectiva y sin cubierta de vidrio arrojara fuera menor al de un colector que sí utiliza dichos materiales. No se esperaba que fuese en un nivel tan elevado, considerando que los sistemas compactos nacionales funcionan razonablemente bien en las regiones templadas y cálidas de Argentina. Como el colector ha sido tratado como caja negra, no se han analizado algunos aspectos constructivos, tomándose la información al respecto de los fabricantes como válida. No se pudo analizar, por ejemplo, si había problemas de puentes térmicos, aunque por lo visto la aislación es muy buena. La mayor pérdida de calor de los colectores solares de placa plana se da por su superficie transparente, y como el policarbonato es de doble capa, con una capa de aire en el medio, provee una buena aislación térmica, lo cual se vio reflejado en el ensayo mediante IRAM 210002-1, con la baja pendiente de la recta que se observa en la Fig. 3.

Los fabricantes informaron que la superficie absorbedora estaba hecha de chapa de aluminio conformada para unirse a presión con siete conductos de cobre de 9,52 mm de diámetro exterior. Esto no es conveniente, porque una unión solidaria mediante soldadura garantiza una buena conducción del calor. Debería analizarse en un futuro trabajo analítico la influencia de este defecto en los valores que podrían tomar la Eficiencia del colector y el Factor de remoción de calor. Está allí en juego un valor de resistencia térmica de contacto de difícil determinación, pero que no es para nada despreciable. Seguramente, este detalle constructivo también operó en contra para la determinación del rendimiento térmico, ya que el factor de remoción de calor forma parte del producto $F_R(\tau\alpha)$.

El problema aquí acontece por la necesidad del pasaje rápido del calor desde las aletas absorbedoras al fluido caloportador circulante, para aprovechar justamente el accionar de la bomba, que tendería a colectar rápidamente la energía. Este efecto no se nota cuando el equipo funciona termosifónicamente, ya que la velocidad de circulación es extremadamente baja (Lucchini et al., 2008) y el fluido tiene mucho tiempo para calentarse. Por eso en los sistemas compactos, pueden funcionar razonablemente hasta superficies absorbedoras realizadas con polímeros.

Los fabricantes, proveedores, revendedores e instaladores desconocen en gran medida los aspectos físicos conceptuales en que se basa el aprovechamiento de la energía solar térmica, a pesar de que hace varios años que se viene trabajando acciones de capacitación (Garnica et al., 2010). Un sistema compacto debe ensayarse con una norma completamente distinta a la de los colectores solos para sistemas activos, que es la IRAM 210004 (IRAM, 2016), no arroja valores de rendimientos térmicos, sino de producción anual de energía. El INTI ha creado y tiene en marcha un programa de Certificación Instaladores de Sistemas Solares Térmicos (INTI, 2024), pero es a un nivel de equipos hasta los 600 litros, quedando mayormente relegado a instaladores de sistemas compactos.

En general, la mayoría de los colectores de placa plana son copia de modelos extranjeros, con las adaptaciones locales y la tecnología disponible en el país. Seguramente, que un absorbedor aislado y con cubierta transparente va a proveer algún ahorro energético, pero la cuestión es poder dar el mejor

aprovechamiento al menor costo posible. Si bien centrarse en rendimiento térmico es importante, también son importantes los costos. Así, se debe contrapesar el disponer de colectores más baratos, pero con mayor costo de instalación por la necesidad de más superficie. Allí cuenta también el tema de la vida útil y el mantenimiento. Por ejemplo, el uso de policarbonato es beneficioso por su costo inicial frente al vidrio templando, y también por la facilidad de manipulación al momento de fabricar y transportar. Pero hay que tener en cuenta, que al cabo de pocos años, a pesar de tener una cara con tratamiento anti UV, los policarbonatos pierden mucha transparencia, afectando notablemente el rendimiento de los sistemas de calentamiento compactos, y es necesario cambiarlo.

El colector analizado en este trabajo es uno en particular, que lo fue a pedido de los fabricantes, ante la duda sobre si su funcionamiento sería adecuado para un sistema activo. Eventualmente, un sistema compacto puede contar con colectores de muy buena calidad y deberían igualmente analizarse dicho colector por separado para si se le desea utilizar para un sistema de flujo forzado.

Es valorable el hecho de que los fabricantes hayan recurrido por su propio interés a solicitar el asesoramiento y ensayo de los equipos en un Laboratorio independiente, como lo es el LES. No existe hoy en funcionamiento real un organismo que tenga a cargo la regulación efectiva de los equipos que se comercializan en el país en cuanto a su performance desde el punto de vista térmico, ya sean sistemas compactos o instalaciones con equipos forzados. La Secretaría de Comercio Interior emitió una serie de resoluciones, una de las últimas fue la Resolución 753/2020 (Ministerio de Desarrollo Productivo, 2020), donde se prevén una serie de ensayos (impacto, volumen, presión, marcado y rotulado, etc.) pero no tiene en cuenta los ensayos térmicos. Extrañamente, en el caso de los sistemas compactos habla de pérdidas de energía, pero no de ganancia de energía, siendo que para eso están hechos estos equipos.

CONCLUSIONES

Si bien este trabajo mostró básicamente un problema respecto al uso de un tipo de colectores para aplicaciones forzadas, se debe remarcar que, con los elementos adecuados, este tipo de instalaciones son altamente recomendables cuando se trata de necesidades de provisión de agua caliente en grandes volúmenes. Ya se están utilizando sistemas centralizados de agua caliente en edificios de departamentos, y se debería lograr, que dentro de lo posible, las instalaciones para proveer agua caliente, usen un alto porcentaje de energía solar.

Hay equipos y accesorios disponibles en el mercado Argentino, y muy confiables y a precios razonables, que permiten montar sistemas forzados sin ningún problema. Deben tenerse en cuenta ciertas ventajas de estos sistemas, como lo son que el tanque de almacenamiento puede estar dentro de la edificación, lo cual favorece su durabilidad y mantenimiento de la temperatura, que pueden montarse con ángulos variables sin necesidad de estructuras fijas predeterminadas y por ello pueden integrarse arquitectónicamente muy bien a la estructura externa de una edificación o industria.

Es necesaria la aprobación de una ley nacional de energía solar térmica que provea un marco general a todo el sistema nacional, incluyendo aspectos normativos y de homologación de equipos, con información disponible públicamente, que permita a vendedores, instaladores y público en general tomar decisiones en cuánto qué equipos instalar de acuerdo a sus necesidades. Tanto el mercado común de la Unión Europea como los Estados Unidos tienen organismos que proveen la información de todas las marcas y modelos de equipos (colectores y sistemas compactos) que han sido ensayados y están aprobados para su comercialización (ESTIF, 2024) (SRCC, 2024), y dicha información está disponible en Internet para todo el mundo.

Deben incrementarse las acciones de formación de profesionales en el área, no sólo a nivel técnico, sino también de proyectistas con formación ingenieril, que garanticen conocimientos tanto en la fabricación de los equipos como en la instalación de los mismos. Son hoy muy pocas las instituciones universitarias que ofrecen capacitaciones a nivel de grado de en esta área. Aunque hay varias ofertas de posgrado en cuestiones energéticas, la mayoría son orientadas a la gestión y muy pocas ponen énfasis en los aspectos técnicos de proyecto, dirección técnica, instalación y montaje de equipos. Los fabricantes deberían saber las consecuencias que ocasionan la utilización de uno u otro material o geometría para la construcción

de sus equipos. Por otro lado, los proyectistas deberían formarse en la utilización de herramientas de cálculo como el f-chart o similares, para poder diseñar y ejecutar instalaciones que logren los mejores resultados posibles para sus clientes.

Es importante que se conozcan las normas que están involucradas en los temas de energías renovables. A pesar de que nuestro país está atrasado en los desarrollos en energías renovables, debido a su larga tradición con combustibles fósiles, es necesario que los profesionales estén preparados, afrontar los desafíos de la transición energética con recursos humanos nacionales. Estamos incluso muy atrasados en diversos aspectos respecto a varios de nuestros países vecinos.

REFERENCIAS

Ahmed S.F.; Khalid M.; Vaka M.; Walvekar R.; Numan A.; Rasheed A.K.; Mubarak, N.M. (2021) Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. Thermal Science and Engineering Progress, 25, 1-23.

Albizzati E. (2013). Cálculos de la energía generada y la mitigación de emisiones de gases en instalaciones para calentamiento solar de agua. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 31, 9-16.

Barral J., Garnica J., Lucchini J.M. (2022) Herramientas para diseño y cálculo de instalaciones Pasivas y activas de agua caliente solar. Actas del 6° Congreso Argentino de Ingeniería y 12° Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería CADI-CAEDI, ISBN 978-987-4050-08-3, pág. 1936-1943.

Duffie J.A.; Beckman W.A.; Blair N. (2020) Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, fifth edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 683-700.

ESTIF [en línea] The Solar Keymark. ESTIF - the European Solar Thermal Industry Federation. Dirección URL: <http://www.estif.org/solarkeymarknew/> [consulta: 3 de agosto de 2024]

Garnica, J.H.; Lucchini, J.M.; Stoll, R.G.; Barral, J.R. (2010). Ensayos normalizados de colectores solares y sistemas de calentamiento de agua en argentina: análisis de la situación, avances y dificultades. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14(3), 147-154.

Hernández Fereira A.A. (2013) Superficies selectivas para instalaciones solares: fundamento y evaluación de su aplicación. Perfiles, Revista científica de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, 10, 55-62.

Hissuma [en línea] Colector solar placa plana HISSUMA SOLAR Mod. SCP FPGB 2.00x1.00BC. Dirección URL: < https://www.hissuma-materiales.com.ar/productos/colector-solar-placa-plana-hissuma-solar/> [consulta: 1 de agosto de 2024]

INTI [en línea] Instaladores de Sistemas Solares Térmicos, Nivel II, Dirección URL: <https://www.inti.gob.ar/areas/servicios-regulados/certificaciones/organismo-de-certificacion/tramites/instaladores-de-sistemas-solares-termicos-nivel-ii> [consulta: 2 de agosto de 2024]

IRAM (2016) IRAM 210002-1 Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico de los colectores solares con cubierta para el calentamiento de líquidos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 57 pp.

IRAM (2016) IRAM 210004 Métodos de ensayo exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires, 56 pp.

Kalogirou S. (2024) *Solar Energy Engineering. Processes and Systems, third edition*. Academic Press. London, UK, 227-231.

Lucchini J.M., Garnica J.H., Stoll R.G., Barral J.R. (2008) Estudio de un caudalímetro simple y de bajo costo para mediciones en sistemas solares termosifónicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente,*12, 8.117-8.124.

Ministerio de Desarrollo Productivo (2020) Aprobación del Reglamento Técnico colectores solares y sistemas solares compactos que se comercialicen en el territorio de la República Argentina.

Placco C., Saravia L., Cadena C. (2010) Informe Técnico sobre Colectores Solares para Agua Caliente. Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO), Salta, Argentina.

Sabre M., Pereira G., Medel N., Pescio F., Chiaravalloti A., Bornancin M., Cordi M., Lunardelli G. y Quiroga L. (2020) Censo Nacional Solar Térmico 2020 - Informe Período 2019. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Buenos Aires.

SRCC [en línea] Solar Rating & Certification Corporation. URL: < https://solar-rating.org/> [consulta: 3 de agosto de 2024]
Weiss W. y Spörk-Dür M. (2023) Solar Heat Worldwide, Global Market Development and Trends 2022, Detailed Market Figures 2021. Solar Heating & Cooling Programme. International Energy Agency.

INFLUENCE OF ABSORBER MATERIAL ON INSTANTANEOUS THERMAL EFFICENCY OF A FLAT PLATE COLLECTOR AND ITS CORRESPONDING APPLICATIONS

ABSTRACT: The consequence of using collectors designed for compact thermosyphon systems in installations operating with forced circulation is analysed. An instantaneous thermal performance test was carried out using IRAM 210002-1 on a collector separated from its storage. The collector has an absorber with a matt paint coating and a transparent cover of polycarbonate honeycomb. The parameters of optical performance and temperature loss coefficient were taken from the test to be used in the calculation procedure for f-chart active solar systems. For comparison, an imported collector was selected, available on the local market, with a selective surface coating on the absorber and a transparent cover of low iron-tempered glass. The comparison for a particular case shows that 37,5 % more active surface area of the tested collector is needed to provide the same benefit. Test results are shown in plots and f-chart calculations in tables. Considerations are made regarding improvements to be implemented in manufactures of collectors, as well as the need for political and educational actions for a better development of solar thermal applications in the country.

Keywords: flat plate sola collector, selective surface, polycarbonate, thermal efficiency.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 125-139, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

MODELADO, SIMULACIÓN Y ENSAYO DE PUNTOS CALIENTES EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Federico Piccardi[1], Damián Saragia[2], Hernán Socolovsky[2,3]
[1]Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires
[2]Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín
[3]Departamento Energía Solar, Comisión Nacional de Energía Atómica
e-mail: federicopiccardi@hotmail.com

RESUMEN: Se presenta en el siguiente trabajo la realización del modelado eléctrico de sistemas fotovoltaicos basados en celdas solares de silicio cristalino a fin de simular diferentes escenarios de sombreamiento que permitan magnificar al fenómeno de puntos calientes en celdas sometidas a estados de iluminación dispares. Cuando esto sucede, el dispositivo deja de entregar energía y se comporta como una carga resistiva, disipando potencia en forma de calor. El modelo permite cuantificar la potencia disipada y obtener el escenario de sombreamiento que maximiza este fenómeno y evidenciar incluso que en situación de punto caliente las celdas pueden trabajar en zona de ruptura (avalancha). Posteriormente, se realizan ensayos experimentales utilizando los datos de las simulaciones para recrear el peor caso de disipación para una celda dentro de un módulo. Para obtener el modelo eléctrico (basado en el modelo de un diodo de una celda solar) se trazan experimentalmente las curvas de corriente vs. tensión de módulos y diodos puente comerciales (llamados en inglés "bypass diodes"), y se realizan ajustes, con sus respectivos parámetros característicos y tensiones de ruptura.
Los resultados de las simulaciones mostraron que la polarización inversa de celdas sombreadas puede disipar potencias superiores a los 100 W, desarrollar temperaturas cercanas a 200 °C y pérdidas de potencia a nivel sistema de hasta el 10%.

Palabras clave: sombras, puntos calientes, sistema fotovoltaico, generación distribuida.

FUNDAMENTOS

En un contexto global de expansión de la generación de energía a partir de fuentes renovables como respuesta tecnológica a la problemática del calentamiento global, y con la tecnología solar fotovoltaica liderando la capacidad instalada a nivel global, resulta relevante el abordaje científico de los modos de falla inherentes a la misma.

Uno de los problemas que subyacen a las instalaciones fotovoltaicas es la aparición de puntos calientes, más conocidos por sus siglas en inglés como "hot spots". Los puntos calientes son el resultado del des apareamiento de las corrientes que generan las celdas solares dentro de un módulo o sistema fotovoltaico. Comúnmente estas diferencias en las fotocorrientes son causadas por estados de iluminación dispares entre celdas. La aparición de puntos calientes también puede deberse a problemas de discrepancias entre celdas de un módulo si no son adecuadamente seleccionadas. Como consecuencia de estos efectos, algunas celdas pueden quedar con valores negativos de tensión aplicada durante el funcionamiento del sistema fotovoltaico comportándose en consecuencia como cargas resistivas. Es decir, los dispositivos dejan de entregar energía para pasar a disiparla, conllevando al calentamiento localizado de una región del panel y pudiendo, junto con la acción del tiempo, causar degradación, tanto en las características eléctricas de las celdas como así también en los encapsulantes que brindan aislación y protección al módulo.

A fin de acotar los efectos de los puntos calientes en los sistemas fotovoltaicos, los fabricantes de módulos introducen diodos puente en éstos, los cuales ponen una cota a la máxima tensión inversa que

puede soportar una celda solar que limita la corriente de un módulo fotovoltaico. No obstante, con el paso del tiempo, si los diodos puente fallan y no se revisan, los puntos calientes pueden causar efectos irreversibles en un panel solar. Por estos motivos es importante comprender en detalle este fenómeno a fin de dirigir y enfocar técnicas de mitigación o simplemente de reducción de este efecto ya que, en muchas ocasiones, incluso una instalación recién montada y puesta en marcha puede presentar puntos calientes.

El presente trabajo pretende abordar la temática con un enfoque teórico experimental a fin de comprender mejor los procesos a los que conlleva la aparición de puntos calientes, mediante el modelado y la simulación eléctrica de sistemas fotovoltaicos que permitan cuantificar su magnitud. Dicha información permitirá tener una cota en la cantidad de fallas que podrían tolerarse (principalmente la falla de diodos puente, quedando como circuitos abiertos) antes que la instalación tenga una falla drástica. Se realizaron también ensayos experimentales de laboratorio y relevamientos en instalaciones fotovoltaicas en funcionamiento con el fin de validar los resultados obtenidos por las simulaciones. Parte de estas actividades incluye la caracterización eléctrica de módulos y sistemas fotovoltaicos, como así también la realización de termografías sobre los mismos, siendo esta última técnica fundamental para la detección de puntos calientes.

MODELOS PREVIOS Y ANTECEDENTES DE APLICACIÓN

Dado el escenario de expansión de la tecnología solar fotovoltaica descripto, resulta de interés para la comunidad científica y tecnológica detectar y cuantificar los modos de falla de los dispositivos fotovoltaicos. Un correcto diagnóstico permitirá establecer procedimientos de mantenimiento preventivo, detección temprana, y mitigación de los modos de falla, incrementando la vida útil y la confiabilidad de la tecnología solar fotovoltaica. Estudios experimentales muestran tasas de degradación promedio anual de potencia nominal para módulos fotovoltaicos de silicio cristalino del 0,593% (Obaid et al., 2024), 0,7% (Atia et al., 2023; Ferreira da Fonseca et al., 2019) y 0,9% (Piliougine et al., 2020), las cuales se ven afectadas por los diferentes modos de falla que sufren los mismos.

Si bien las plantas fotovoltaicas están equipadas con líneas de ensayos que permiten detectar fallas en celdas y módulos, originadas en su proceso de fabricación, la investigación científica actual no describe en forma cuantitativa el origen y la pérdida de potencia asociada con algunos fallos importantes en los módulos instalados en sistemas fotovoltaicos. Tampoco están debidamente definidos los métodos para ensayar y detectar dichas fallas, originadas luego de la instalación de los paneles. Se identifica una potencial área de vacancia de investigación científica en la detección de fallos en paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino de manera fácil y fiable, una vez instalados en un sistema fotovoltaico (Köntges et al., 2014).

Los modos de falla más frecuentes en módulos de silicio cristalino son puntos calientes (33%), seguido de decoloración de conexiones metálicas (20%), rotura de vidrio (12%), decoloración de encapsulante (10%), rotura de celdas (9%) y degradación inducida por potencial (8%) (Kim et al., 2021).

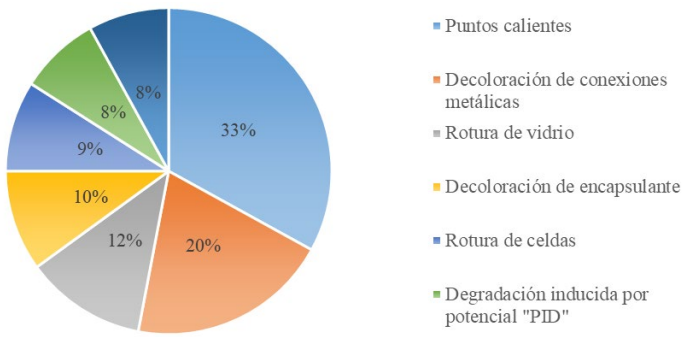


Figura 1: Modos de falla en módulos de silicio cristalino (Kim et al., 2021)

El presente trabajo abordará el modelado, simulación y ensayo de puntos calientes como modo de falla de paneles solares fotovoltaicos de silicio cristalino integrados a instalaciones, entendiéndose como modo de falla a aquella condición de operación que representa una pérdida de potencia con respecto a los valores nominales, o que representa un peligro para la integridad de equipos y personas. Las consecuencias de regiones sombreadas en paneles solares y por consiguiente generación de puntos calientes en los mismos se magnifican cuando el mismo se encuentra integrado a un string de paneles conectados en serie (Köntges y Bothe, 2008). Si bien los paneles poseen diodos puente que ponen una cota máxima al potencial inverso en las celdas que están total o parcialmente sombreadas (lo cual de por sí representa una pérdida de potencia), la falla de estos puede causar un sobrecalentamiento en las mismas al punto tal de causar daños irreversibles en los equipos e incluso originar incendios (Hermann et al., 1997).

Resulta relevante destacar que el presente trabajo podría servir de material de consulta y guía para la implementación de la industria fotovoltaica en Argentina, tanto en proyectos de plantas de generación solar como en proyectos de generación distribuida. Actualmente Argentina cuenta con una potencia instalada de plantas de generación solar de 1,43GW (CAMESSA, 2024) y una potencia instalada en plantas de generación distribuida conectadas a la red de 43.597 kW (Secretaría de Energía - Ministerio de Economía Argentina, 2024). Se observa un sostenido crecimiento de la potencia instalada en este tipo de proyectos en los últimos años, el cual podría incrementarse en la medida que se avance en la quita de subsidios a la tarifa de electricidad.

Se realizó una revisión sistemática de estudios previos que hayan abordado la aparición de puntos calientes en paneles solares, con el fin de detectar un área de vacancia que justifique la realización del presente trabajo. En el trabajo de (Kamran et al., 2019) realizaron un modelo teórico basado en machine learning, a partir de imágenes termográficas de paneles solares, permitiendo detectar, evaluar y categorizar los puntos calientes. Del mismo modo (Kim et al., 2015) desarrolló un método teórico experimental para detección de puntos calientes en strings de paneles solares, en base a mediciones de corriente alterna de los mismos. Los puntos calientes causan un incremento en la capacitancia y la impedancia de módulos en serie, detectable a partir de mediciones de baja y alta frecuencia de la corriente entregada por el inversor. En el trabajo de (Khodapanah et al., 2022) propusieron un método numérico de generación de una curva de potencia – voltaje para distintos escenarios de ensombramiento de celdas solares, basado en la ecuación del circuito equivalente de un diodo. Finalmente, no se encuentran muchos antecedentes en la realización de un modelado eléctrico de un sistema fotovoltaico que permita obtener información interna de su funcionamiento y así cuantificar la relación existente entre sombreados parciales, aparición de puntos calientes, potencia disipada en forma de calor y pérdida de potencia de la instalación fotovoltaica.

ELABORACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO

Medición experimental de curva I-V de paneles solares a modelar

En primera instancia se midieron las curvas I-V (corriente vs. tensión) de dos tipos de módulos FV con el fin de caracterizar las celdas solares de dos tecnologías diferentes (monocristalino de celda partida y policristalino). Posteriormente a partir de las mediciones se obtienen los parámetros característicos de la celda como el coeficiente de idealidad y la corriente de saturación de la celda según la ecuación del diodo en cada caso. Dado que la curva I-V de una celda solar responde a la ecuación del diodo de Shockley, si se obtiene experimentalmente una curva I-V de un panel (Taretto, 2018) se pueden dividir las tensiones de los resultados obtenidos en la cantidad de celdas en serie que tenga el panel y las corrientes en la cantidad de celdas paralelizadas, ajustar la curva obtenida a una ecuación exponencial y despejar el coeficiente de idealidad y la corriente de saturación, que definirán a la celda de ese panel como diodo. La ecuación de la curva I-V viene dada por:

$$I_{(V)} = I_0 * \left(e^{\left(\frac{V}{n_{id} * V_T}\right)} - 1 \right) - I_{SC} \quad (1)$$

Donde:

n_{id} = Coeficiente de emisión o idealidad del diodo
V_T = Tensión térmica de la juntura
I = Intensidad de corriente que atraviesa la celda
I_0 = Corriente de saturación
I_{SC} = Corriente de cortocircuito

Para el ensayo se utilizó un simulador solar pulsado de gran área, una celda solar calibrada, un panel solar monocristalino de celda partida, otro policristalino y un sistema de adquisición de datos, tal como se observa en la figura 2. A lo largo del ensayo se mantuvo la temperatura constante en 25°C. En ambas mediciones se utiliza el método de las cuatro puntas para medir la tensión y la corriente durante el ensayo. Se utiliza además una sonda para monitorear la temperatura. La curva se obtiene mediante la medición individual de pares tensión-corriente asociada a los disparos del flash del simulador que en este caso son veinte. Se monitorea además la irradiancia de cada disparo usando la celda de referencia, que comparte plano de captación con los paneles, a fin de asegurar que en cada disparo la irradiancia sea de 1000 W/m^2, aunque a fines de este trabajo la irradiancia podría incluso ser de valor arbitrario.

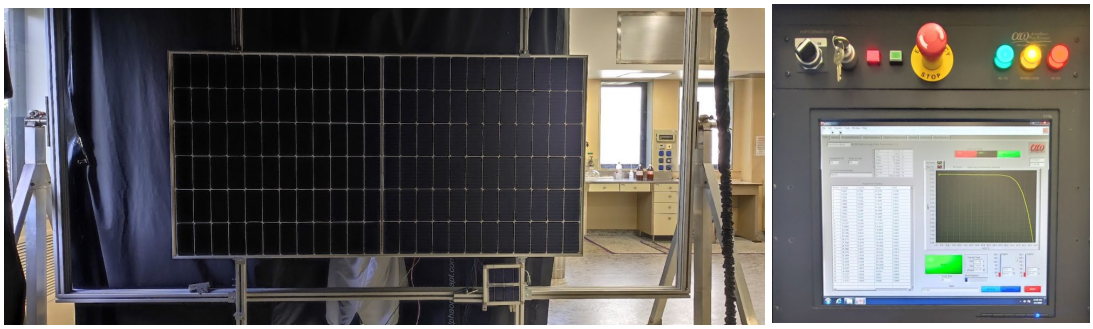


Figura 2: Equipamiento utilizado para ensayo de curva I-V de módulos FV.

Para la realización del ensayo se utilizaron los siguientes equipos pertenecientes al Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica – Centro Atómico Constituyentes.

- Celda de referencia calibrada “PV Evolution Labs”.
- Panel solar policristalino de 250Wp EXIOM EX250P-60.
- Panel solar monocristalino de celda partida de 455Wp Trina Solar TSM-455DE17M(II).
- Simulador solar pulsado de gran area “LAPSS” de Alpha-Omega Power Technologies

Procesamiento de curva I-V para obtención de parámetros de celda

Una vez obtenidas las curvas I-V experimentales de los paneles, se dividió el eje de tensiones de las mediciones por la cantidad de celdas en serie de cada panel (60 celdas para el panel policristalino y 72 celdas para el panel monocristalino) y las corrientes en la cantidad de celdas paralelizadas (2 ramas en paralelo para el panel de celda partida). La curva resultante se ajusta a una ecuación exponencial (Ec. 1) con el software Origin y se obtienen los parámetros mencionados. A fin de descontar los efectos de resistencia serie y paralelo se quitaron del ajuste los puntos de la curva cercanos a circuito abierto y corto circuito.

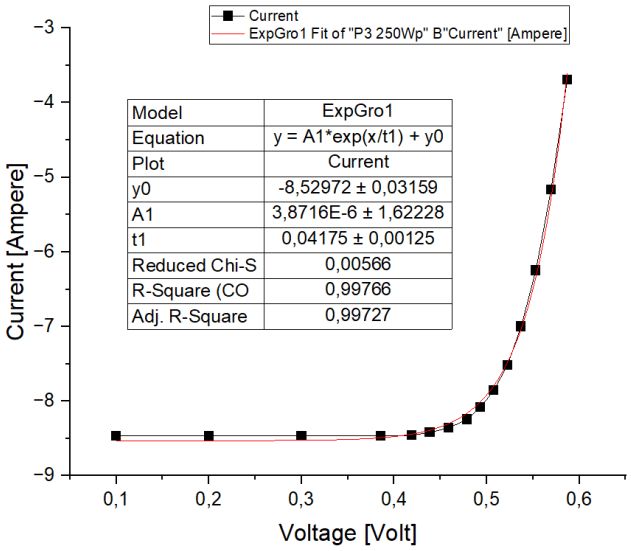


Figura 3: Ajuste de la curva I-V celda policristalina

Según el ajuste, la corriente de saturación de la celda policristalina es de 3,87 µA y el coeficiente de idealidad es 1,62.

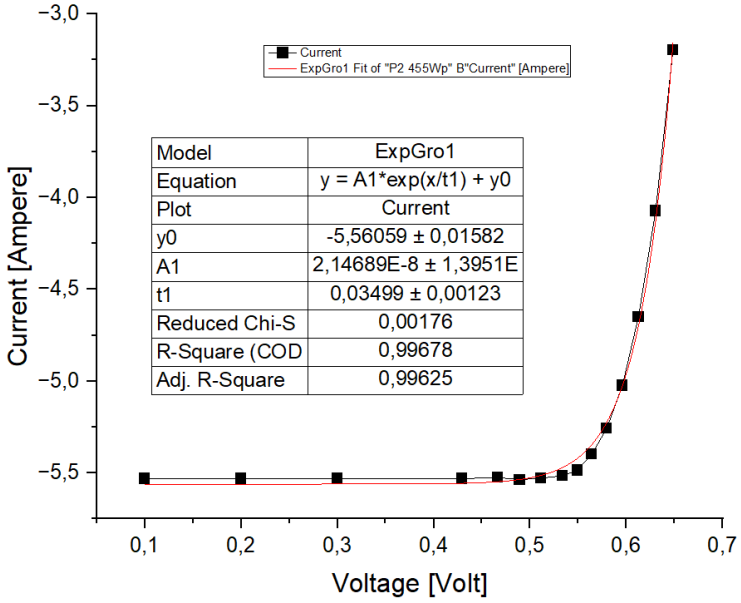


Figura 4: Ajuste de la curva I-V celda monocristalina

Para la celda de tecnología mono de celda partida la corriente de saturación es de 21,4 nA y el coeficiente de idealidad es 1,36.

Ensayo de tensión de ruptura de celdas

Otro de los parámetros importantes a obtener para la realización del trabajo es la tensión de ruptura V_R de la juntura en cada tipo de celda. Dado que, para obtener este parámetro es necesaria la polarización inversa de la celda, se utiliza una fuente de corriente controlada, con un sistema de adquisición de datos. En este caso se utilizó un instrumento electrómetro "Keithley 2602B" y dos paneles de descarte para poder acceder eléctricamente a una celda y así proveerle tensiones de polarización inversa.

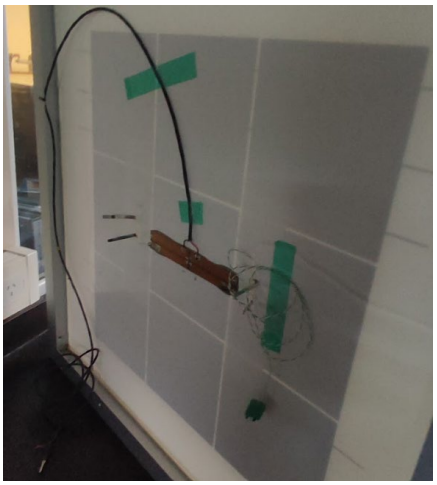


Figura 5: *Acceso eléctrico a celda poly de 156mm x 156mm*

Se obtuvieron experimentalmente tensiones de ruptura cercanas a 13 V para celdas policristalinas y de 17 V para celdas monocristalinas, valores típicos para celdas solares comerciales. Las tensiones fueron definidas al inicio del "codo" de la curva para una corriente de 100 mA, como se observa en las figuras 6 y 7.

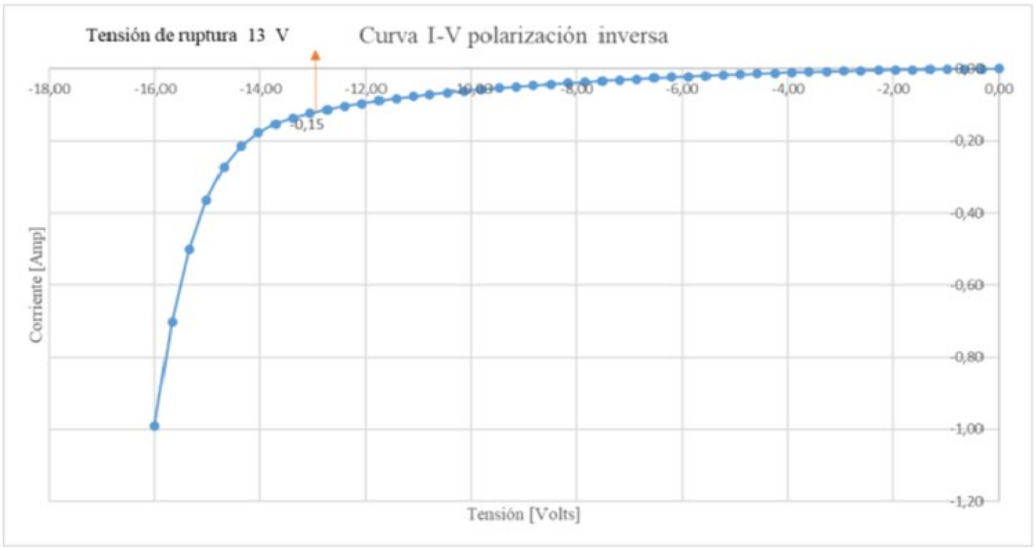


Figura 6: Medición de curva I-V polarización inversa celda policristalina

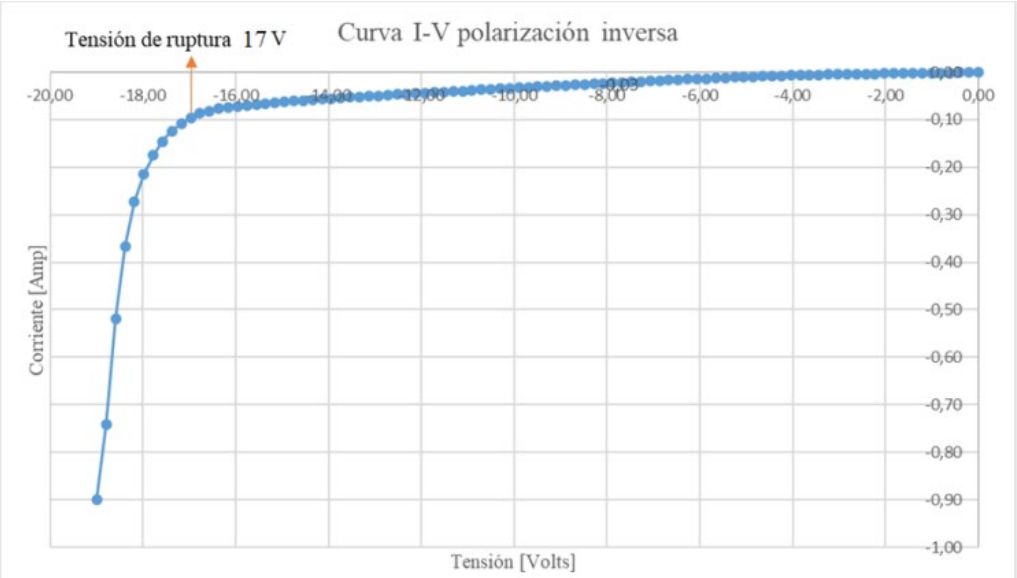


Figura 7: Medición de curva I-V polarización inversa celda monocristalina

Ensayo de obtención de parámetros de diodo puente

El modelo eléctrico debe incorporar los diodos puente de los módulos fotovoltaicos. Para ello se midió la curva I-V de un diodo puente comercial del tipo Schottky en polarización directa para obtención de la corriente de saturación y el coeficiente de idealidad. En este caso se trata de un diodo "SL1515" obtenido de un panel solar comercial.

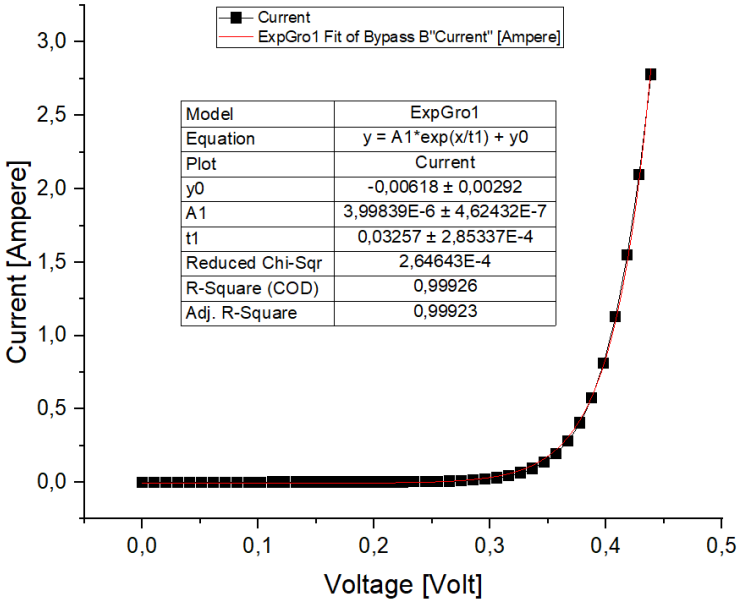


Figura 8: Ajuste de la curva I-V diodo puente

El ajuste arrojó una corriente de saturación de 4 µA y el coeficiente de idealidad es 1,27.

Para el modelo eléctrico se utilizará la tensión de ruptura declarada en la hoja de datos de un diodo comercial modelo SL1515, marca Tyco Electronics, la cual es de 40 V.

La tabla 1 resume los resultados obtenidos en los ensayos descriptos.

Tabla 1: Resumen de resultados de ensayos

	A_1 [A]	n_{id}	V_R [V]
Celda policristalina	3,87E-06	1,62498	13
Media celda monocristalina	2,15E-08	1,36187	17
Diodo puente	3,998E-06	1,26768	40

Modelo eléctrico de una celda solar

El modelo eléctrico de celda solar es representado mediante un diodo con los parámetros obtenidos previamente en paralelo con una fuente de corriente controlada que permite utilizar diferentes porcentajes de fotocorriente con respecto a la de cortocircuito, emulando sombreados sobre la celda. Para aquellos casos en que se quiera representar una celda con algún defecto (baja resistencia paralelo o resistencia serie) se agregan "manualmente" los valores según el modelo de la figura 9. Se utilizó el programa de simulación Tina-Ti (Software Tina-Ti) para realizar el modelado y las simulaciones.

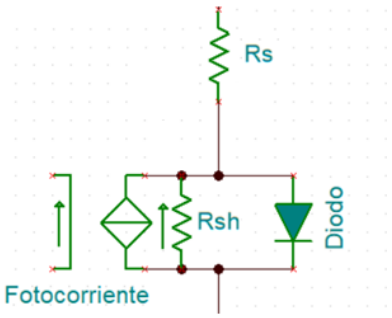


Figura 9: Modelo de celda solar utilizado

Modelo eléctrico de módulo solar con celdas solares mono y poly.

El modelo eléctrico de módulo solar de celda policristalina copia el arreglo de celdas y diodos puente del módulo comercial EXIOM EX250P-60 de 250 Watts pico, con 60 celdas conectadas en serie, y 3 diodos puente con los parámetros obtenidos según los ensayos descriptos anteriormente y tal como se observa en la figura 10. En el modelo se incorpora un wattímetro para la medición de la potencia en función del voltaje (curva P-V del módulo), una fuente de corriente controlada para controlar las corrientes de cortocircuito del módulo (y de la celda a sombrear), un voltímetro para medición de tensión de la celda a sombrear, un amperímetro para medición de la corriente circulante por la celda a sombrear y un amperímetro para medición de la corriente total que circula por el módulo.

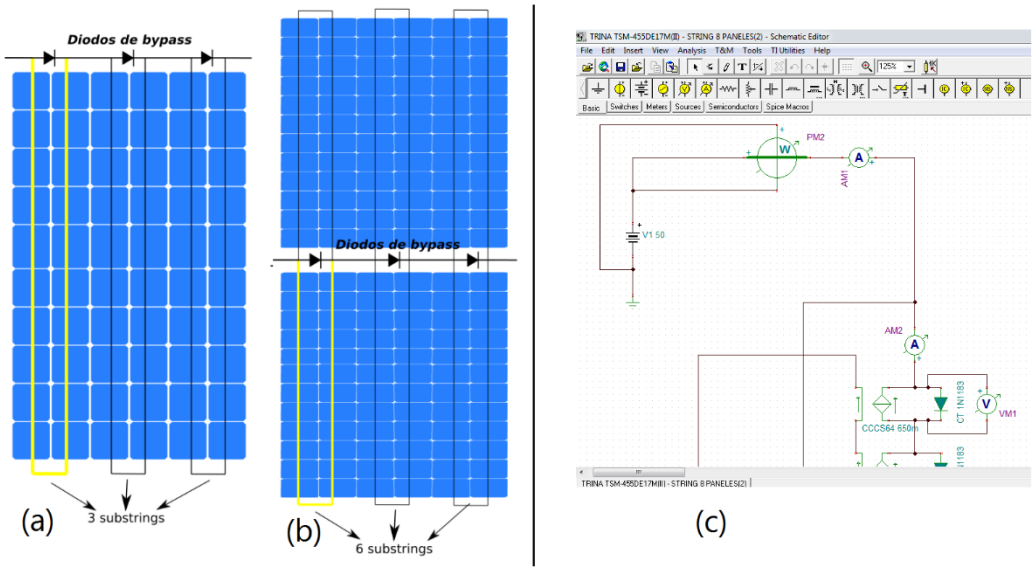


Figura 10: Conformado de módulos de celda policristalina (a) y celdas "half-cell" (b) e interface visual del software TINA-TI (c)

El modelo eléctrico de módulo solar de celda monocristalina copia el arreglo de celdas y diodos puente del módulo comercial TRINA SOLAR TSM-455DE17M(II) de 455 Watts pico, con dos series de 72 celdas conectadas en paralelo (144 celdas en total), y a su vez asociadas con tres diodos puente, tal como se observa en la figura 10. Del mismo modo que el caso anterior se conecta el instrumental para obtención de las simulaciones.

SIMULACIONES DE SISTEMAS CON DIFERENTES ESCENARIOS DE ENSOMBRAMIENTOS

Se utilizó el modelo del panel solar desarrollado para cada caso (poly y mono de celda partida) para armar una cadena de 8 módulos con la intención de simular un sistema domiciliario de baja potencia, representativo de un sistema FV de los que un usuario residencial podría instalar en un techo. En un caso queda establecido un sistema de potencia pico cercana a 2 kW (módulos poly de 250 Wp) mientras que en el segundo el sistema queda con una potencia pico de 3,6 kWp (módulos mono celda partida).

En todos los escenarios de simulación realizados se asignan sucesivamente valores de corrientes del 100, 80, 60, 50, 40, 20 y 0% de la corriente de cortocircuito del módulo a la fotocorriente de una única celda. Es decir que se simulan sombreamientos tales que provocan esas pérdidas de fotocorriente en una única celda del módulo. Con el software se realiza un barrido "DC sweep" que da como salida la curva I-V y P-V del sistema. Al obtener la curva I-V simulada, se identifica el voltaje de máxima potencia (Vmp), que es la tensión a la cual un inversor fotovoltaico con tecnología MPPT (maximum power point tracker) hará que funcione el sistema. Para ese valor de Vmp se mide la tensión a la que queda sometida la celda sombreada y la corriente que circula por ella. Si dicha polarización es inversa, el producto de estos valores dará como resultado la potencia disipada con valores negativos. Además, se registra en cada caso la potencia máxima generada por el sistema. El mismo procedimiento de simulación se realiza primero con los diodos puente conectados, y luego con uno de los tres (el perteneciente a la sección de la celda sombreada) en circuito abierto, replicando un escenario de una instalación en que un diodo haya resultado dañado.

Simulaciones de cadenas de módulos FV con celdas solares policristalinas y monocristalinas.
La tabla 2 muestra los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo eléctrico de un módulo de celdas monocristalinas, con y sin diodo puente. Los valores resaltados se corresponden con las potencias máximas disipadas en cada escenario.

Tabla 2: Simulaciones 8 módulos en serie - celda policristalina

	% Isc	V celda ensombrada [V]	I celda ensombrada [A]	P celda ensombrada [W]	% potencia pico
Con diodo	1,00	0,5	7,8	4	100%
	0,80	-6,2	7,5	-46,2	96%
	0,60	-9,7	6,1	-59,4	96%
	0,50	-10,1	5,3	-54,1	96%
	0,40	-10,6	4,5	-47,8	96%
	0,20	-11,3	2,9	-32,7	96%
	0,00	-12	1,3	-15,1	96%
Sin diodo	1,00	0,51	7,8	4	100%
	0,80	-6,2	7,5	-46,2	96%
	0,60	-14	7,8	-109	94%
	0,50	-14	7,8	-109	94%
	0,40	-14	7,8	-109	94%
	0,20	-14,1	7,8	-109	94%
	0,00	-14,1	7,8	-109	94%

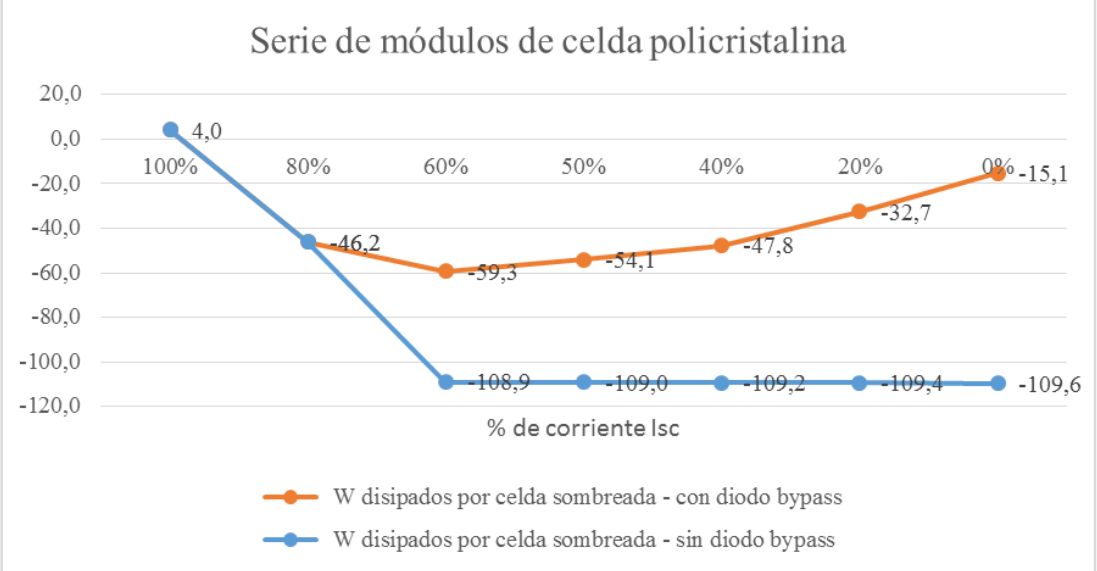


Figura 11: Curva %Isc vs. potencia disipada celda policristalina

La tabla 3 muestra los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo eléctrico de una conexión serie de 8 módulos de celdas mono, con y sin diodo puente. Los valores resaltados se corresponden con las potencias máximas disipadas en cada escenario.

Tabla 3: Simulaciones 8 módulos en serie celda monocristalina

	% Isc	V celda ensombrada [V]	I celda ensombrada [A]	P celda ensombrada [W]	% potencia pico
Con diodo	1,00	0,59	5,2	3,1	100%
	0,80	-2,5	4,9	-12,4	99%
	0,60	-12,6	4,9	-61,9	96%
	0,50	-13,8	4,5	-62	96%
	0,40	-14,3	3,9	-56,5	96%
	0,20	-15	2,9	-42,9	96%

	0,00	-15,6	1,8	-27,7	96%
Sin diodo	1,00	0,59	5,2	3,1	100%
	0,80	-2,5	4,9	-12,4	99%
	0,60	-12,6	4,9	-62	96%
	0,50	-16,2	4,8	-77,2	95%
	0,40	-18,2	5,1	-92,7	94%
	0,20	-18,3	5,1	-93	94%
	0,00	-18,3	5,1	-93,1	94%

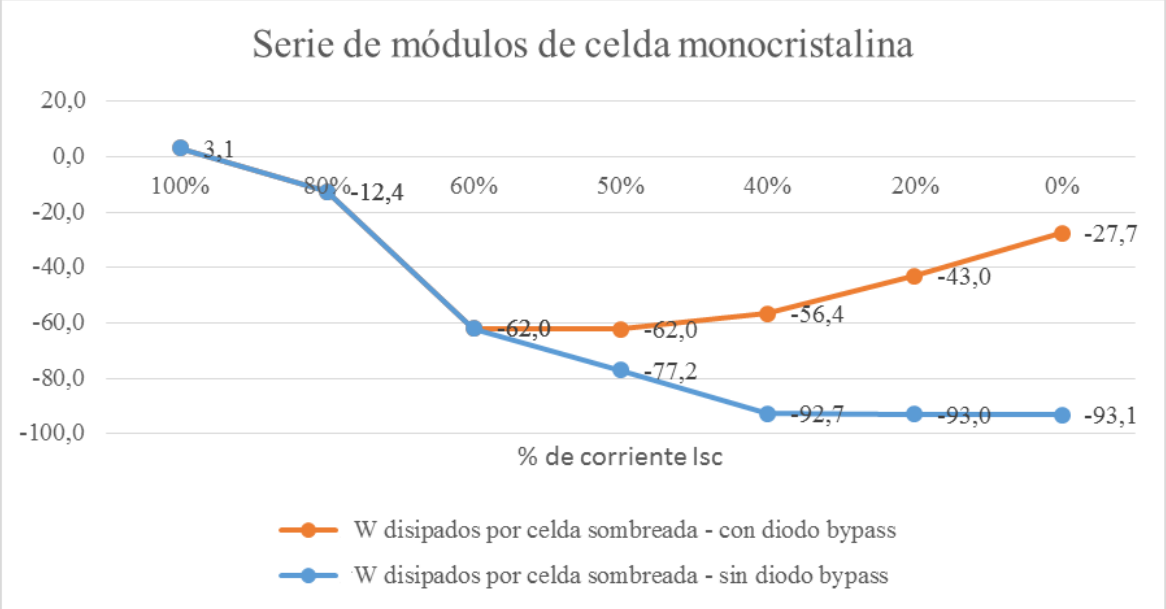


Figura 12: Curva %Isc vs. potencia disipada celda monocristalina

Para ambos sistemas, se destaca el hecho de que una celda sombreada dentro de una sección del panel que tenga un diodo puente en circuito abierto alcanza la tensión de ruptura, circulando por ende a través de ella la corriente del resto de las celdas y aumentando en consecuencia la disipación de potencia por parte de la celda sombreada. Al comportarse el sistema FV como una fuente de corriente limitada, finalmente la corriente en ruptura no genera la destrucción del dispositivo siendo este efecto totalmente reversible.

ENSAYO EXPERIMENTAL DE DISIPACIÓN TÉRMICA

Dado que el modelo eléctrico no es capaz de simular los efectos térmicos de las potencias disipadas en forma de calor, es necesario realizar un ensayo experimental destructivo, sometiendo a las celdas de las tecnologías utilizadas a progresivas potencias (polarizando en inversa), alcanzando los valores máximos obtenidos en las simulaciones. Los ensayos se realizan con módulos comerciales de uso académico y módulos de descarte. Se realizan cortes en la cubierta posterior para acceder eléctricamente a una celda del módulo. Se eligen celdas cercanas a los marcos de los módulos, puesto que estas son las más sensibles a la aparición de puntos calientes, tal como se detalla en la norma IEC 61215-2 (2021). Se utiliza una fuente de corriente controlada para forzar el calentamiento de la celda y, una vez lograda la termalización, se releva por termografía la temperatura de la misma.

Ensayo experimental de módulo solar con celdas solares policristalinas

En este caso una celda solar de tecnología poli se somete a polarización inversa aplicando sobre ella potencia gradualmente, hasta alcanzar los 100 W, que se corresponden con el peor escenario de simulación del modelo y la temperatura alcanzada de 156 °C. El ensayo se realiza a temperatura

ambiente (20 °C) en un ambiente cerrado sin ventilación forzada. Luego de algunos minutos bajo esta condición, una vez lograda la termalización, la celda y el tedlar posterior presentaron visibles daños.

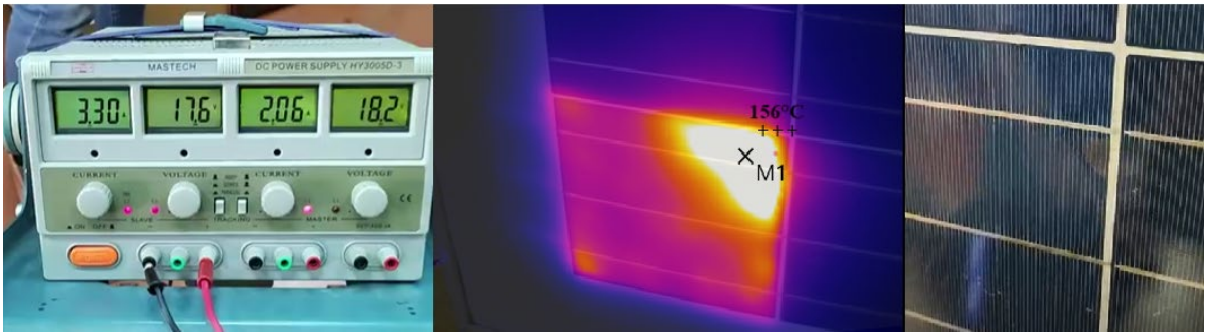


Figura 13: Ensayo térmico celda policristalina. Centro: termografía durante la aplicación de 100W, derecha: daño ocasionado sobre la celda solar.

Simulaciones de módulo solar con celdas solares monocristalinas

Para este caso, utilizando un panel comercial de descarte, una celda solar mono se somete a polarización inversa aplicando potencia gradualmente, hasta alcanzar valores cercanos los 100 W, que se corresponden con el peor escenario de simulación del modelo. El ensayo se realiza a temperatura ambiente (20 °C) en un ambiente cerrado sin ventilación forzada. En la figura 14 se observan las tensiones y corrientes aplicadas en polarización inversa, y la temperatura alcanzada de 162,4 °C en la parte posterior del módulo y de 150,7 °C en la parte frontal. En este caso durante la hora que duró la experiencia se logró apreciar un cambio en la tonalidad del Tedlar posterior (leve tonalidad amarillenta) mientras que en los contactos frontales de la celda se evidenció la soldadura de estaño en estado "plástico".

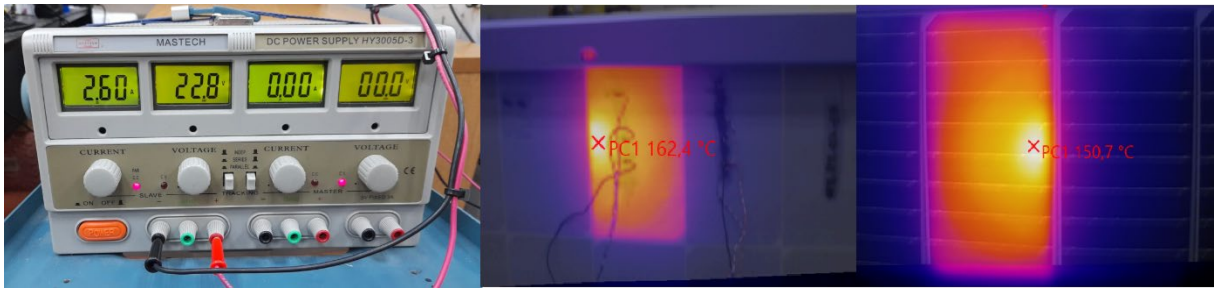


Figura 14: Ensayo térmico celda monocristalina Centro: termografía parte posterior, durante la aplicación gradual de potencia hasta 100W, derecha: termografía parte frontal, durante el ensayo.

ESTUDIO DE TERMOGRAFÍA EN PLANTA FOTOVOLTAICA EN FUNCIONAMIENTO

Habiendo realizado ensayos de laboratorio forzando la polarización inversa de celdas, se procede con el relevamiento de una planta solar fotovoltaica con escasos meses de funcionamiento. La planta posee una potencia de 100 kWp y se relevan 3 series de 22 paneles de 500 Wp, de tecnología monocristalina de celda partida. Se selecciona un módulo aleatorio que no esté afectado por sombras propias de la instalación y se aplican plantillas para provocar sombras en una media celda en una esquina del 30, 60 y 75%. En la figura 15 se observan las temperaturas relevadas de 75,9; 107,6 y 85 °C respectivamente. Tal como mostraron las simulaciones del modelo, la máxima potencia disipada se da cuando se sombrea entre el 50 y el 60% de la celda. Sombreamientos menores no fuerzan tensiones polarización inversa tan altas, mientras que sombreamientos mayores limitan mucho la corriente que circula por la celda. La temperatura de la celda sombreada al 60% es menor a la obtenida en el ensayo de laboratorio de celda monocristalina porque en este caso se trata de una celda de mayor superficie y porque el relevamiento fue realizado un mediodía de invierno, en el que no se logran las potencias pico del módulo.

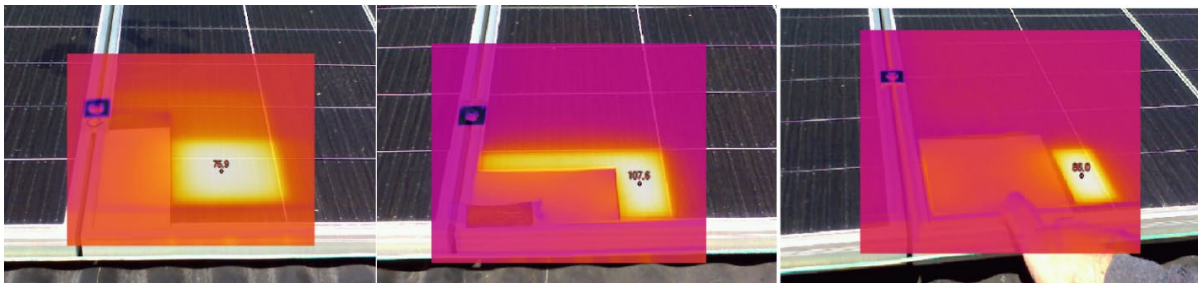


Figura 15: Relevamiento de planta fotovoltaica. Izquierda: termografía sobre celda sombreada al 30%, centro: termografía sobre celda sombreada al 60%, derecha: termografía sobre celda sombreada al 75%

CONCLUSIONES

Los módulos solares con tecnología de celdas completas de silicio policristalino han demostrado ser más sensibles al fenómeno de puntos calientes en términos de pérdida de potencia. Simulando sombras en una única celda de un módulo se han alcanzado potencias de disipación de calor de hasta 59,338 W, con diodos puente funcionando correctamente, y de 109,577 W con diodos puente sin continuidad. Se ha demostrado que estas potencias pueden causar temperaturas de hasta 156 °C y daños visibles en las celdas. Además, se ha mostrado que sombras en una única celda pueden reducir la potencia del panel a un 69% de la potencia pico con diodos puente funcionando correctamente, y a un 54% con diodos puente sin continuidad. Si bien esta tecnología ha perdido participación en el mercado de la industria fotovoltaica, existen muchas plantas en funcionamiento. El presente trabajo sugiere dar relevancia a la aparición de puntos calientes en módulos de silicio policristalino, especialmente si poseen celdas con baja resistencias paralelo en donde se concentrará la disipación de calor.

Los módulos solares con tecnología de celdas partidas de silicio monocristalino han demostrado ser sensibles al fenómeno de puntos calientes en términos de potencia disipada. Sin embargo, la tecnología de celda partida que permite dividir el módulo en dos mitades paralelizadas, es efectiva en disminuir las pérdidas de potencia del módulo causadas por sombreamientos. Simulando sombras en una única celda de un módulo se han alcanzado potencias de disipación de calor de hasta 62,048 W, con diodos puente funcionando correctamente, y de 93 W con diodos puente sin continuidad. Se ha demostrado que estas potencias pueden causar temperaturas de hasta 162,4 °C y leves decoloraciones en la cubierta posterior del módulo. Además, se ha demostrado que sombras en una única celda pueden reducir la potencia del panel a un 71% de la potencia pico con diodos puente funcionando correctamente, y a un 61% con diodos puente sin continuidad.

En el presente trabajo se elaboraron los modelos eléctricos de 2 modelos específicos de módulos solares fotovoltaicos. En el mercado actual, se comercializan módulos de mayor cantidad y tamaño de celdas y con tecnología bifacial. Además, se simularon patrones de sombras sobre una única celda. Para futuros trabajos, se sugiere realizar modelos eléctricos de nuevos modelos de módulos fotovoltaicos, simular patrones de sombra más complejos y diversos, y realizar ensayos tanto de campo como de laboratorio que permitan sacar conclusiones con respecto al comportamiento de los módulos bifaciales frente a escenarios de iluminaciones dispares.

AGRADECIMIENTOS

La parte experimental del presente trabajo fue realizada en las instalaciones del Departamento Energía Solar de la Comisión Nacional de Energía Atómica –Centro Atómico Constituyentes.

REFERENCIAS

Atia, D.M., Hassan, A.A., El-Madany, H.T. et al (2023). Degradation and energy performance evaluation of mono-crystalline photovoltaic modules in Egypt. Sci Rep 13, 13066. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40168-8.

CAMESSA. (2024). Obtenido de https://cammesaweb.cammesa.com/potencia-instalada/.

Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) (2021). Módulos fotovoltaicos (FV) terrestres - Calificación de diseño y homologación de tipo - Parte 2: Procedimientos de ensayo (Norma IEC 61215-2:2021). https://webstore.iec.ch/en/publication/61350

Ferreira da Fonseca, J.E., Schuck de Oliveira, F., Prieb, C.W.M., et al. (2020). Degradation analysis of a photovoltaic generator after operating for 15 years in southern Brazil, Solar Energy, Volume 196, 2020, Pages 196-206, ISSN 0038-092X, https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.086.

Hermann, W., Wiesner, W. y Vaaßen, W. (1997). Hot Spot Investigations on PV Modules - new Concepts for a Test Standard and Consequences for Module Design with Respect to Bypass Diodes, Proc. 26th PVSC. Pp. 1129-1132.

Jordan, C. D. y Kurtz, S. R. (2011). Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review, Prog. Photovolt: Res. Appl. 21 (12–29). Recuperado de 10.1002/pip.1182 el 11 de agosto de 2024.

Kamran, A., Wajahat, A., Hassan, A. y Yongheng, Y. (2019). Hotspot diagnosis for solar photovoltaic modules using a Naive Bayes classifier. Solar Energy. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X19307340 el 11 de agosto de 2024.

Khodapanah, M., Ghanbari, T., Moshksar, E. y Hosseini, Z. (2022). Partial shading detection and hotspot prediction in photovoltaic systems based on numerical differentiation and integration of the PV curves. IET Renewable Power Generation. Recuperado de https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/rpg2.12596 el 11 de agosto de 2024.

Kim, K., Seo, G.-S., Cho, B.-H. y Krein, P. (2015). Photovoltaic Hot Spot Detection for Solar Panel. IEEE. Recuperado de https://ieeexplore.ieee.org/ielaam/63/7283717/7072567-aam.pdf?tag=1 el 11 de agosto de 2024.

Kim, J.; Rabelo, M.; Padi, S.P. et al. (2021). A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy. Energies 2021, 14, 4278. https://doi.org/10.3390/en14144278

Koltai, M. (2020). TINA - Circuit Simulator for Analog, RF, Digital, MCU, HDL & Mixed Mode Simulation and PCB [Software]. DesignSoft, Inc.

Köntges, M. y Bothe, K. (2008). Elektrolumineszenzmessung an PV-Modulen, ep Photovoltaik aktuell, 7/8, pp. 36-40.

Köntges, M., Kurtz, S., Jahn, U., Berger, K., Kato, K., Friesen, T. y Iseghem, M. (Marzo de 2014). Review of Failures of Photovoltaic Modules. Photovoltaic Power Systems Programme - Report IEA-PVPS T13-01:2014. Recuperado de https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_T13-01_2014_Review_of_Failures_of_Photovoltaic_Modules_Final.pdf el 11 de agosto de 2024.

Obaid, A.H., Mahdi, E.J., Hassoon, I.A et al. (2024). Evaluation of degradation factor effect on solar panels performance after eight years of life operation. Archives of Thermodynamics, 45(3), 221–226.

Pilougine M., Oukaja A., Sánchez-Friera P., et al. (2021). Analysis of the degradation of single-crystaline silicon modules after 21 years of operation. Prog Photovolt Res Appl. 2021;29:907-919. https://doi.org/10.1002/pig.3409.

Secretaría de Energía - Ministerio de Economía Argentina. (2024). Recuperado https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ppt_reporte_de_avance_julio_2024.pdf de el 11 de agosto de 2024.

Software TINA-TI Simulation Tool, Texas instrument (SPICE-based analog simulation program), https://www.ti.com/tool/TINA-TI

Taretto, K. R. (2018). Celdas solares: teoría, ensayo y diseño, 2ª. edición, pp. 207-209 y 307, Nueva Librería, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

MODELING, SIMULATION AND TESTING OF HOT SPOTS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT: This work presents the electrical modeling of photovoltaic systems based on crystalline silicon solar cells to simulate different shading scenarios that magnify the "hot spot" phenomenon in cells subjected to non-uniform illumination. When this occurs, the device doesn´t generates energy and behaves like a resistive load, dissipating power in the form of heat. The model allows quantifying the dissipated power and identifying the shading scenario that maximizes this phenomenon, demonstrating that in hot spot situations, the cells can even operate in the breakdown (avalanche) region. Subsequently, experimental tests are conducted using the simulation data to recreate the worst-case dissipation scenario for a cell within a module. To obtain the electrical model (based on the one-diode model of a solar cell), current versus voltage curves for commercial modules, cells, and bypass diodes are experimentally plotted, and adjustments are made with their respective characteristic parameters and breakdown voltages. The simulation results showed that the reverse polarization of shaded cells can dissipate powers exceeding 100 W, develop temperatures close to 200 °C, and cause system-level power losses of up to 56%.

Keywords: shading, hot spots, photovoltaic system, distributed generation.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 140-149, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

MISIÓN SATELITAL SAOCOM 1A: ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES TRAS 5 AÑOS DE OPERACIÓN EN ÓRBITA

Elena M. Godfrin y Julio C. Durán
Departamento Energía Solar, Centro Atómico Constituyentes, CNEA
(B1650) San Martín, Provincia de Buenos Aires - Argentina
Tel. +54 11 67727132 - e-mail: godfrin.cnea@gmail.com

RESUMEN: El satélite SAOCOM 1A de la Misión SAOCOM 1 fue desarrollado y construido por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) junto con organismos y empresas del sistema científico y tecnológico nacional de la República Argentina. El instrumento principal de este satélite es una antena radar de apertura sintética cuyo consumo en operación es de alrededor de 4 kW. La alimentación eléctrica de la plataforma y los instrumentos del satélite se obtiene mediante paneles solares que fueron diseñados y fabricados en el Departamento Energía Solar (DES) de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). Desde la puesta en órbita del satélite, la CONAE recibe por telemetría datos referentes al funcionamiento de sus instrumentos y de los paneles solares. A fin de evaluar la degradación de las celdas solares luego de 5 años en órbita se realizó un análisis de los datos disponibles. Además, se calculó una cota inferior de la potencia media orbital generada por los paneles solares. Los resultados obtenidos muestran una degradación inferior a la esperada y que la potencia media orbital cumple con el requerimiento "*Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD*".

Palabras clave: energía solar, satélite, celdas solares, degradación, ambiente espacial

INTRODUCCIÓN

El satélite SAOCOM 1A, junto con el SAOCOM 1B forman parte de la Constelación SAOCOM 1 que se encuadra dentro del Plan Espacial Nacional. Dicho Plan desde su primera versión, que abarcó el período 1995-2000, viene siendo revisado y actualizado periódicamente (CONAE. Plan Espacial Nacional, 2024).

El objetivo central de los satélites SAOCOM de Observación de la Tierra es la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias, tales como detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones. Es un proyecto desarrollado en colaboración con la Agencia Espacial Italiana (ASI) e integra de manera operacional, junto con los satélites italianos COSMO-SkyMed, el Sistema Italo-Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (CONAE. Misiones satelitales – SIASGE, 2024).

Los satélites de la constelación SAOCOM 1 fueron construidos junto con organismos y empresas del sistema científico y tecnológico nacional, como INVAP (contratista principal), CNEA y VENG (empresa argentina de servicios y desarrollos tecnológicos de alto valor agregado especializada en la actividad espacial); comparten los mismos requerimientos de diseño, funcionalidad y operatividad, por lo que su desarrollo se llevó a cabo en simultáneo dando como resultado dos satélites idénticos (CONAE Misiones satelitales - SAOCOM, 2024).

El SAOCOM 1A fue puesto en órbita el 7 de octubre de 2018 y el SAOCOM 1B el 30 de agosto de 2020, con un tiempo de vida útil estimado de, por lo menos, 5 años para cada satélite. Ambos satélites

son de cobertura global y poseen un ciclo de repetición orbital de 16 días para cada satélite, lo que resulta en 8 días para la constelación.

Los satélites SAOCOM 1A y 1B se desplazan sobre una órbita polar heliosincrónica, situada a una altura nominal de 620 km, con una inclinación de 98°, siendo la hora orbital del nodo ascendente las 6 horas. El período orbital es de 98 minutos, con períodos de eclipse de duración variable durante aproximadamente 3 meses por año (principios de noviembre a principios de febrero), con una duración máxima de aproximadamente 20 minutos el 21 de diciembre. El ángulo comprendido entre la normal a la órbita y la eclíptica varía entre 31° (en diciembre) y 4° (en abril y septiembre).

El instrumento principal es una antena radar de apertura sintética, con una potencia de 4 kW, diseñada especialmente para detectar pequeñas variaciones de humedad del suelo en la dirección horizontal. También por tratarse de una banda L, puede penetrar por debajo de la superficie generando información del perfil de humedad del suelo hasta 2 m de profundidad. Adicionalmente, dado que es un instrumento que opera en las microondas, posee una gran capacidad para identificar estructuras geométricas sobre la superficie terrestre. Esto le permite generar información de suma utilidad para la geología y la geomorfología. Los mayores consumos de los satélites están asociados a la operación de la antena radar y también a las maniobras de posicionamiento del satélite que le permiten observar en la dirección requerida. El satélite realiza observaciones a derecha en forma de operación nominal y, eventualmente, hacia la izquierda, mediante una rotación del satélite.

La alimentación eléctrica de la plataforma y los instrumentos de los satélites se obtiene mediante paneles solares que fueron diseñados y fabricados en el DES de la CNEA. El sistema de alimentación consta de 3 paneles, cada uno cuenta con 8 módulos de 4 o 5 cadenas interconectadas en paralelo, cada cadena posee 32 celdas interconectadas en serie. En Godfrin (2021) se dan las características de los paneles solares y la estimación de los parámetros característicos (corrientes de cortocircuito y de máxima potencia, tensiones a circuito abierto y de máxima potencia) de cada uno de ellos para ambos satélites.

En el espacio, los componentes electrónicos (incluidas las celdas solares) están expuestos a un entorno extremadamente hostil. La presencia de un fuerte campo de radiación debido a los rayos cósmicos y las partículas atrapadas por el campo magnético de la Tierra tiene efectos significativos en los dispositivos electrónicos, reduciendo eventualmente su vida útil en órbita (Ibarra et al, 2019; Duzellier, 2005). Por tal motivo, es importante realizar un seguimiento del funcionamiento de los paneles solares a lo largo de la misión.

Desde su puesta en órbita, los satélites transmiten por telemetría datos de su plataforma e instrumentos, la mayoría de las mediciones se realiza cada 8 segundos y otras, cada 40 segundos. Los datos de interés para este trabajo corresponden principalmente a los módulos de los paneles solares, el banco de baterías y los parámetros de la antena radar SAR. Para verificar el correcto funcionamiento, posibles anomalías, fallas o degradación de las celdas solares se analizan las corrientes medidas por telemetría de cada módulo, día a día, siguiendo el mismo procedimiento que el presentado en Godfrin (2021).

ESTIMACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS SOLARES DEL SAOCOM 1A

Utilizando los datos del proveedor de las celdas (EMCORE, 2018), se realizaron simulaciones mediante la facilidad SPENVIS (Alurralde, 2008) para estimar la degradación de las celdas solares en el ambiente espacial. La disminución de la tensión a circuito abierto, luego de 5 años en órbita, da lugar a una reducción en la corriente entregada por los módulos a una tensión de trabajo constante y, por lo tanto, de la potencia que generan, con porcentajes de degradación que no superan el 5 % al cabo de 5 años.

A fin de evaluar el funcionamiento de los paneles solares en órbita y su evolución a lo largo de la misión, se seleccionó el 31 de octubre de 2018 (fecha cercana al lanzamiento y en la que el posicionamiento del satélite demostraba estabilidad) y de años sucesivos hasta 2023. El ángulo de incidencia de la radiación solar sobre los paneles (β) varía entre 3° y 27° a lo largo del día, con un promedio $\beta_{prom} = 22°$ y no es época de eclipses. Se consideraron los datos en que la tensión de trabajo del bus de los paneles solares es de $V_{trab} = 61.15$ V, valor típico de dicha tensión, menor que la del punto de máxima potencia (PMP).

Además, se debe tener en cuenta que:

- los módulos se activan según el requerimiento de potencia del satélite, 4 ó 5 en funcionamiento de base y los 24 durante las observaciones con la antena SAR o a la salida de los eclipses;
- el 31 de octubre de 2018 no se realizaron observaciones con la antena SAR, sólo se encontraban operativos 4 módulos en forma continua y 5 módulos con conmutaciones;
- hasta junio de 2019, la antena SAR sólo se activaba en contadas ocasiones;
- cuando un módulo se activa (comienza a entregar potencia) o desactiva, el proceso de conmutación produce transitorios en la corriente que no permiten analizar su evolución;
- no se tienen datos de las tensiones de cada módulo, sólo se dispone de la tensión de operación del bus.

Las Tablas 1 a 4 y sus correspondientes gráficos (Figuras 1 a 4) muestran la evolución de los promedios diarios de las corrientes de los módulos que entregan potencia en forma permanente y de las corrientes en el punto de máxima potencia (I_{pmp}) obtenidas por simulación. El decaimiento de la corriente de los módulos al cabo de 5 años de misión es menor a 2 %. Las Figuras 1 a 4 presentan también el ajuste de la corriente de los módulos mediante regresión lineal. En todos los casos se observa que los promedios de las corrientes medidas son superiores a I_{pmp}, indicando que la tensión de trabajo en órbita es menor a la tensión del punto de máxima potencia, según lo previsto.

Los módulos se denominan SAPAn-MODm donde m indica el módulo y n el panel al que pertenece el mismo. Los módulos se presentan según el orden en que se van conectando, dependiendo de los requerimientos de potencia del satélite: SAPA1-MOD1, SAPA2-MOD1, SAPA3-MOD1 y SAPA1-MOD2.

Tabla 1: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA1-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I_{pmp} simulada [A]
2018	2,166		2,123
2019	2,151	0,7	2,120
2020	2,146	0,9	2,118
2021	2,141	1,1	2,117
2022	2,141	1,2	2,123
2023	2,133	1,6	2,120

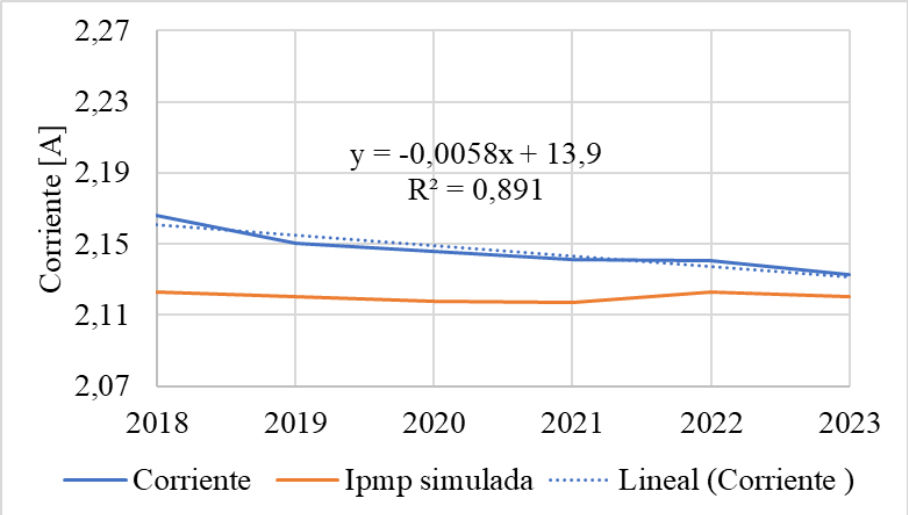


Figura 1: Evolución de la corriente del módulo SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 2: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA2-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I_{pmp} simulada [A]
2018	2,205		2,152
2019	2,193	0,5	2,150
2020	2,181	1,1	2,147
2021	2,175	1,4	2,146
2022	2,174	1,4	2,149
2023	2,166	1,8	2,150

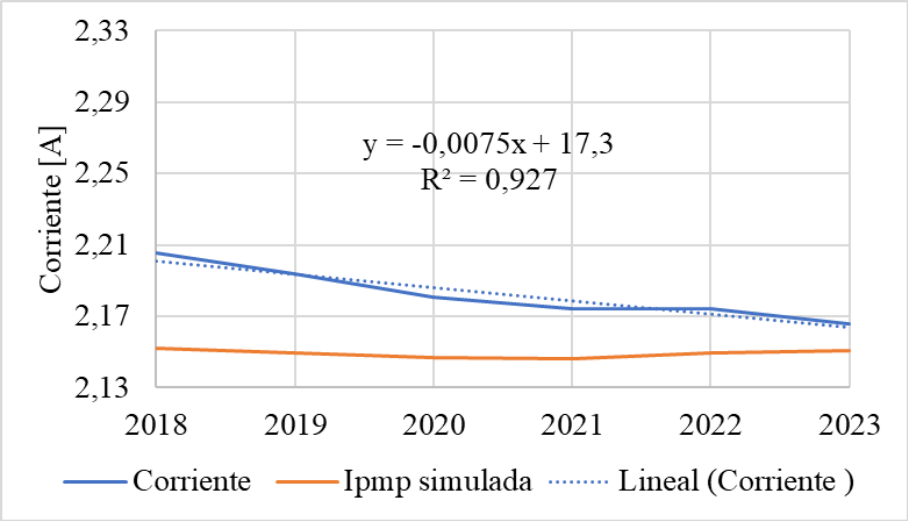


Figura 2: Evolución de la corriente del módulo SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 3: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre.

SAPA3-MOD1	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I_{pmp} simulada [A]
2018	2,194		2,151
2019	2,181	0,6	2,149
2020	2,180	0,6	2,146
2021	2,175	0,9	2,145
2022	2,176	0,8	2,148
2023	2,170	1,1	2,150

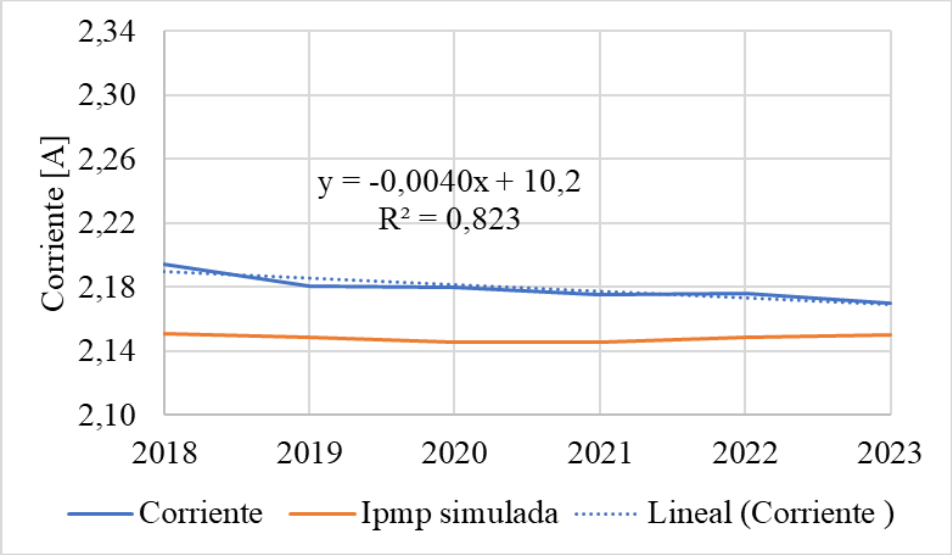


Figura 3: Evolución de la corriente del módulo SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Tabla 4: Decaimiento respecto de 2018 del promedio de la corriente en el punto de trabajo del SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre.

SAPA1-MOD2	Corriente [A]	Decaimiento respecto de 2018 [%]	I_{pmp} simulada [A]
2018	2,192		2,151
2019	2,174	0,8	2,149
2020	2,170	1,0	2,146
2021	2,164	1,3	2,145
2022	2,162	1,3	2,148
2023	2,154	1,7	2,150

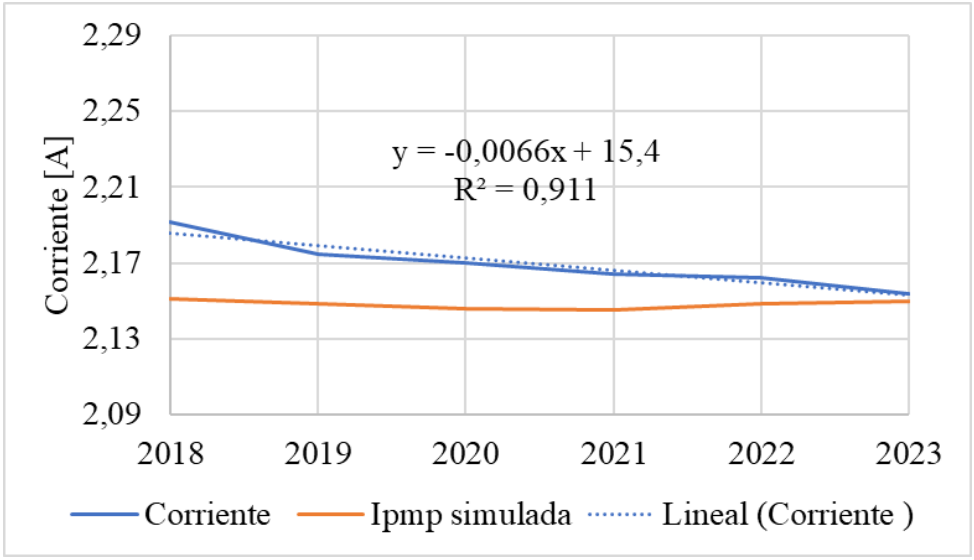


Figura 4: Evolución de la corriente del módulo SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre entre 2018 y 2023, y su ajuste mediante regresión lineal. Se incluye como referencia I_{pmp} obtenida por simulación.

Simulaciones

Finalmente, con las curvas generadas para los módulos en base a las curvas de las celdas medidas en Tierra en el DES, se simularon las curvas I-V en BOL (comienzo de la misión, "*Beginning of Life"*) y EOL (fin de la vida útil del satélite, *"End of Life"*) para el 31 de octubre de 2018 y de 2023 respectivamente, utilizando los valores promedio de β y de la temperatura de operación obtenidos por telemetría (Godfrin, 2015). En la Figuras 5 a 8 se presentan las curvas obtenidas para BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia simulados y los promedios de las corrientes obtenidas de la telemetría. La recta vertical corresponde a la tensión de trabajo (V_{trab} = 61.15 V), prácticamente constante, fijada por el banco de baterías del satélite.
Se observa un buen acuerdo entre los valores simulados y los promedios de los valores medidos en órbita para los cuatro módulos que no conmutan (MOD1 de los 3 paneles y MOD2 del SAPA1).

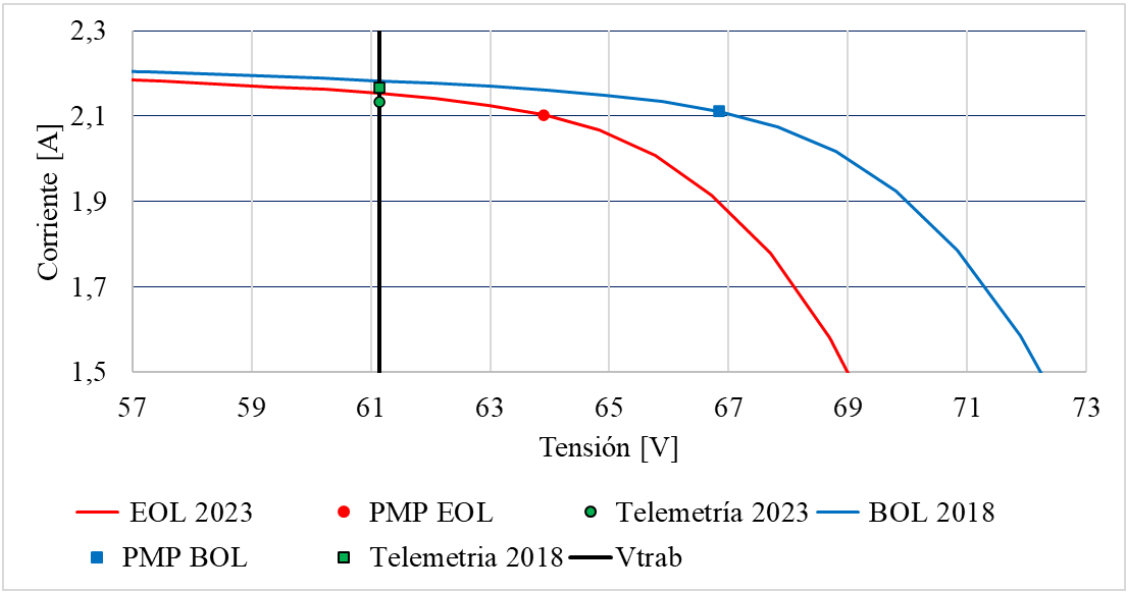


Figura 5: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA1-MOD1 para el 31 de octubre.

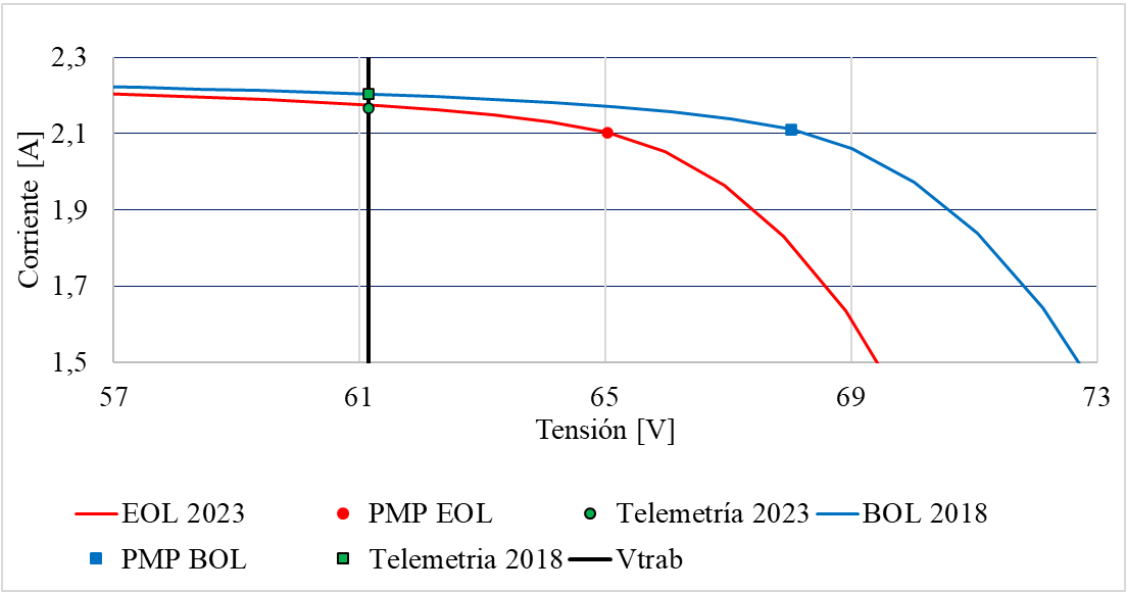


Figura 6: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA2-MOD1 para el 31 de octubre.

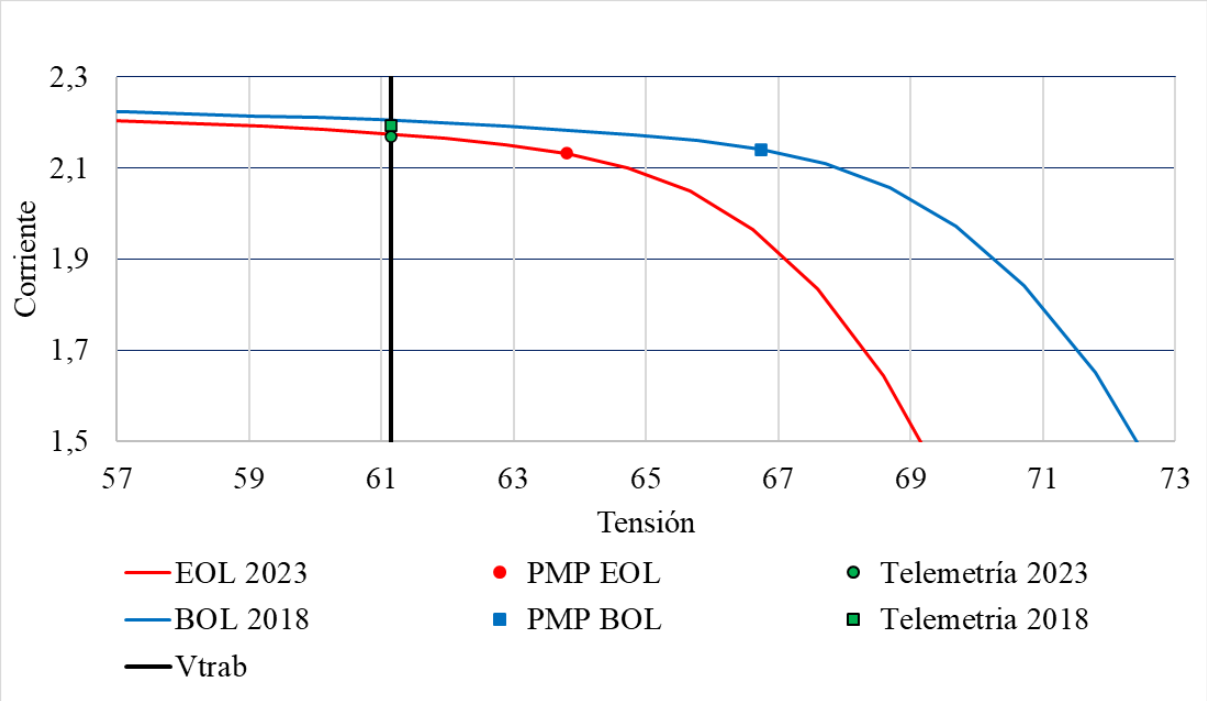


Figura 7: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA3-MOD1 para el 31 de octubre.

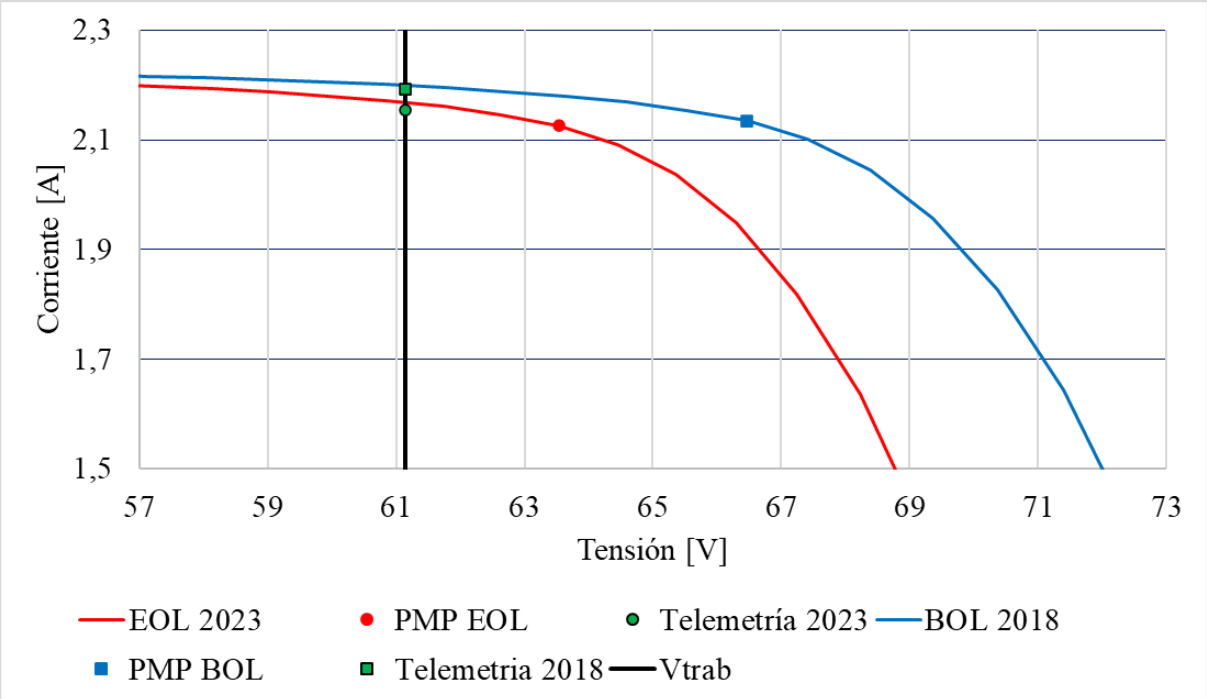


Figura 8: Curvas I-V simuladas en BOL y EOL, con sus respectivos puntos de máxima potencia y valores medidos (telemetría) de la corriente en el punto de trabajo de la tensión SAPA1-MOD2 para el 31 de octubre.

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA MEDIA ORBITAL

El documento "Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD" (Garategaray L., 2010) establece que la potencia media orbital debe ser de 1900 W en las peores condiciones de iluminación (hecho que ocurre el 21 de diciembre cuando el eclipse tiene mayor duración), con la pérdida de un módulo, al final de la vida útil del satélite (al menos 5 años).

La potencia media orbital que podrían entregar los paneles solares en época de eclipses de máxima duración puede estimarse mediante la siguiente fórmula (Ecuación 1):

$$P_{orb} = P_{ent} * T_{ilum} / T_{orb} \quad (1)$$

donde P_{orb} es la potencia media orbital;
P_{ent}, la potencia entregada;
T_{ilum}, la duración del período orbital en que los paneles solares reciben radiación solar;
T_{orb}, la duración de la órbita.

A fin de determinar una cota mínima de la generación de los paneles en estas condiciones, se seleccionó una observación cercana al comienzo del eclipse (período de mínima generación) el 21 de diciembre de 2023. En las Figuras 9 y 10 se muestra la corriente en función del tiempo de los módulos SAPA3-MOD1 y SAPA3-MOD8 respectivamente, para la órbita seleccionada, junto con el indicador de observación (el valor 0 indica que no se están realizando observaciones, mientras que el valor 1 indica que se realiza una observación).

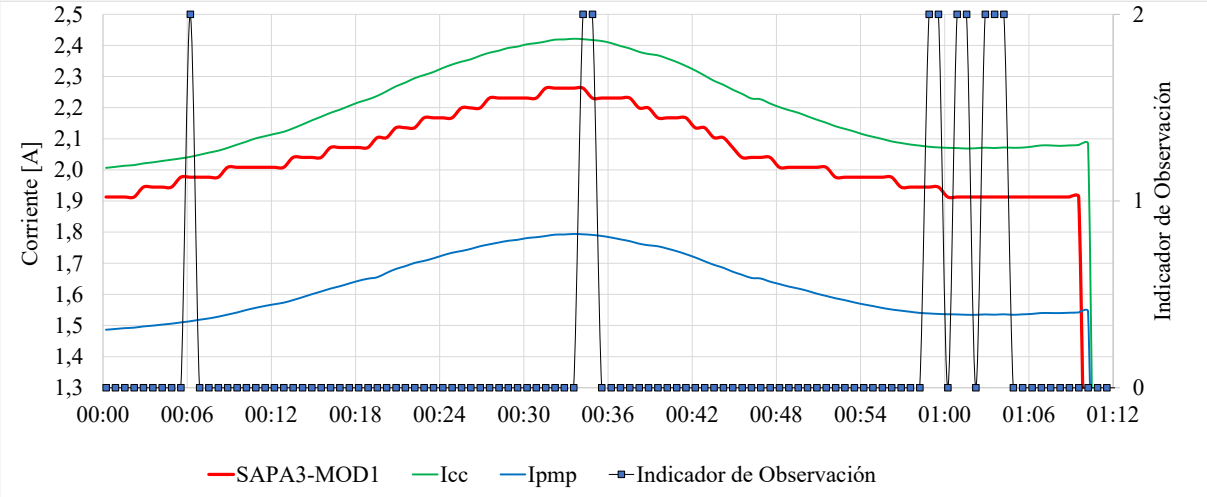


Figura 9. Corriente provista por telemetría, corriente de cortocircuito simulada, corriente del punto de máxima potencia simulada correspondientes a SAPA3-MOD1 e indicador de observación para el 21 de diciembre de 2023.

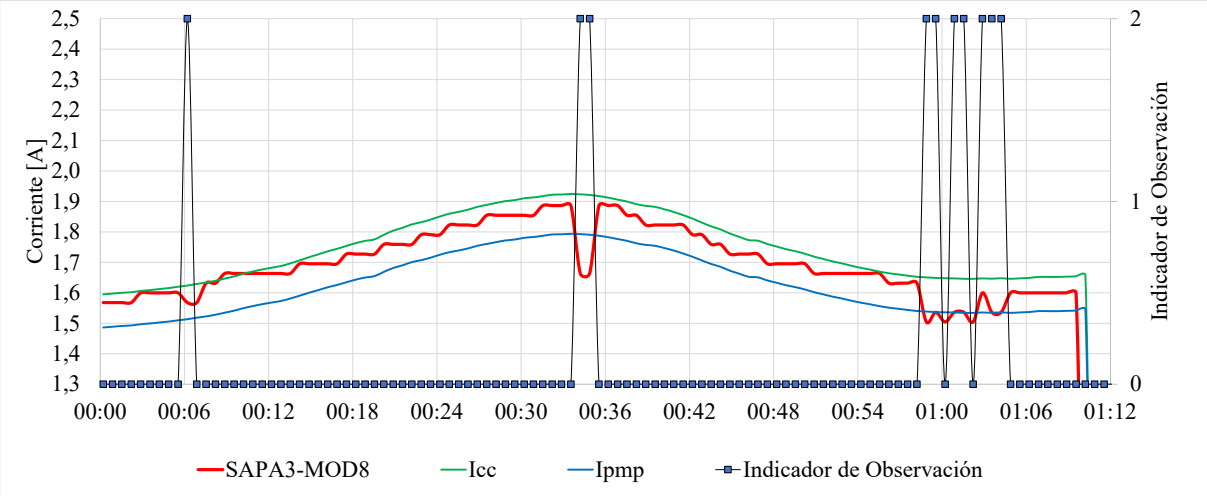


Figura 10. Corriente provista por telemetría, corriente de cortocircuito simulada, corriente del punto de máxima potencia simulada correspondientes a SAPA3-MOD8 e indicador de observación para el 21 de diciembre de 2023.

Los valores obtenidos de la potencia generada por los paneles solares para el 21 de diciembre de 2023 durante la observación y de la potencia media orbital con la pérdida de un módulo de 5 cadenas se consignan en la Tabla 5.

Tabla 5: Potencia generada por los paneles solares durante una observación y potencia media orbital estimada en las peores condiciones de iluminación, con la pérdida de un módulo de 5 cadenas para el SAOCOM 1A.

Fecha	Potencia generada por los 24 módulos [W]	Potencia media orbital (23 módulos) [W]
21/12/2023 00:58	2669	2029

La potencia orbital calculada en las peores condiciones de iluminación supera la cota de 1900 W impuesta en el requerimiento.

CONCLUSIONES

El satélite SAOCOM 1A forma parte de la Constelación SAOCOM 1 del Plan Espacial Nacional, cuyo objetivo principal es obtener productos específicos derivados de la información SAR, en particular mapas de humedad de suelo, con aplicaciones centrales dirigidas a la agricultura y la hidrología, también a la detección de derrames de hidrocarburos en el mar y seguimiento de la cobertura de agua durante inundaciones entre otras aplicaciones para la gestión de emergencias.

El instrumento principal es una antena radar de apertura sintética diseñada especialmente para detectar pequeñas variaciones de humedad del suelo en la dirección horizontal. También por tratarse de una banda L, puede penetrar por debajo de la superficie generando información del perfil de humedad del suelo hasta 2 m en profundidad. Adicionalmente, dado que es un instrumento que opera en las microondas, posee una gran capacidad para identificar estructuras geométricas sobre la superficie terrestre. Esto le permite generar información de suma utilidad para la geología y la geomorfología. Los mayores consumos de estos satélites están asociados a la operación de dicha antena, siendo de vital importancia que el suministro eléctrico provisto por los paneles solares sea el adecuado.

Desde su puesta en órbita, el satélite transmite por telemetría datos referentes a la plataforma, en particular de los paneles solares (tensión de trabajo y corrientes en dicha tensión), que permiten hacer un seguimiento del funcionamiento de los paneles solares.

Se analizó la evolución de los promedios diarios de las corrientes de los módulos que entregan potencia en forma permanente y se concluyó que el decaimiento de dichas corrientes al cabo de 5 años de misión es menor a 2 %. En todos los casos se observa que los promedios de las corrientes medidas son superiores a I_{pmp}, indicando que la tensión de trabajo en órbita es menor a la tensión del punto de máxima potencia, según lo previsto.

Se realizó una estimación de la potencia media orbital entregada por los paneles solares en las peores condiciones de iluminación y con un módulo menos, obteniéndose un valor que supera la cota de 1900 W impuesta en el requerimiento del Control de interfaz.

Por lo expuesto anteriormente, puede concluirse que los paneles solares del satélite SAOCOM 1A funcionan correctamente y de acuerdo con lo previsto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la importante colaboración del equipo de las misiones satelitales SAOCOM de la CONAE, en particular a David Macat, Mauricio Bazán y Lucas Bruno. Asimismo, agradecen a Laura Frulla y Laura Sarrate de la CONAE por la lectura y corrección constructiva del presente trabajo.

REFERENCIAS

Alurralde M. (2008). CAC-PSE-ENV-03000A-IN, EMCORE ATJ cells degradation prediction for five years missions using JPL method. Documento de circulación restringida.

CONAE. Misiones Satelitales – SAOCOM (2024). https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/ misiones-espaciales/saocom. (Último acceso: 11/08/2024).CONAE. Misiones satelitales – SIASGE (2024). https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/ misiones-espaciales/siasge. (Últ imo acceso:11/08/2024).

CONAE. Plan Espacial Nacional (2024). https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/plan-espacial. (Último acceso: 11/08/2024).

Duzellier S. (2005). Radiation effects on electronic devices in space. Aerospace Science and Tecnology. 9,1, 93-99.

EMCORE (2012). ATJ Photovoltaic cell. http/dshett.com/doc/1248074/atj-photovoltaic-cell (Último acceso:08/08/2024).

Garategaray L. (2010). Interface Control Document SOG-PAS-IC-00100-A SA ICD. Documento de CONAE de circulación restringida.

Godfrin E.M. (2015). Simulación y modelización de paneles solares y de sistemas de potencia para aplicaciones espaciales. Tesis doctoral, Instituto Sábato, UNSAM-CNEA. http://www.tandar.cnea.gov.ar/doctorado/tesis.html. (Último acceso: 02/08/2024)

Godfrin E.M. (2021). Misiones satelitales SAOCOM 1: Análisis del funcionamiento de los paneles solares en órbita, ERMA 47, 1-9. ISSN en línea: 2684-0073.

Ibarra M.L., Garcia J.A., Dato A., Yaccuzzi E., Prario I., Filevich A., Barrera M., Alurralde M. (2019). E.D.R.A., the Argentine facility to simulate radiation damage in space. Radiation Physics and Chemistry 154, 79-84. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.08.032.

SAOCOM 1A SATELLITE MISSION: ESTIMATION OF THE DEGRADATION OF SOLAR CELLS AFTER 5 YEARS OF OPERATION IN ORBIT

ABSTRACT: The SAOCOM 1A satellite was developed and built by the National Commission for Space Activities (CONAE) together with organizations and companies of the national scientific and technological system of the Argentine Republic. The main instrument of this satellite is a synthetic aperture radar antenna whose operating consumption is around 4 kW. The electrical power for the platform and satellite instruments is obtained through solar panels that were designed and manufactured in the Solar Energy Department (DES) of the National Atomic Energy Commission (CNEA). Since the satellite was launched, CONAE receives data via telemetry regarding the operation of its instruments and solar panels. After 5 years in orbit and having detected a decrease in the working current of the modules that deliver power continuously, an analysis of the available data was carried out to estimate the degradation of the solar cells. In addition, a lower bound on the orbital mean power generated by the solar panels was calculated. The results obtained show a degradation lower than expected and that the orbital mean power meets the requirement established in the Interface Control Document.

Keywords: solar energy, satellite, solar cells, degradation, space environment

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 150-161, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

PREDICCION DE CORTO PLAZO DE GENERACION DE ENERGIA DE UN SISTEMA MICROEOLICO EMPLEANDO REDES NEURONALES LONG SHORT-TERM MEMORY

Andrés Crespo[1], Claudio Reineri[1,2], Juan Amatti[1], Gabriel Campetelli[1], Leonardo Sanchez[1], Juan Amaya[2]

[1]Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencia – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Rio Cuarto
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto
Tel. 0358-4676171 e-mail: creineri@ing.unrc.edu.ar

[2]Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica Nacional, Regional Córdoba
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, S/N

RESUMEN: En primer lugar, se fundamenta la importancia de las Redes Inteligentes en el contexto de la Transición Energética. Las predicciones, de producción o demanda, juegan un rol clave para diferentes tipos de análisis y operación de este tipo de redes. Se describen las diferentes técnicas para la resolución de tal problema y se destacan las Redes Neuronales, particularmente las Long Short-Term Memory. A partir de esto se desarrolló una herramienta predictiva de corto plazo de producción de energía de una instalación MicroEólica basada en una Long Short-Term Memory. Para su entrenamiento se emplean datos de velocidad y dirección de viento, registrada por el Servicio Meteorológico Nacional y por el Observatorio Hidro-Meteorológico de Córdoba, en el primer caso registros de información histórica y en el segundo los pronósticos de tales parámetros para el día siguiente. Para complementar los datos de entrenamiento se dispone de la energía generada por una Microturbina. Se muestran resultados promisorios en las predicciones. También se relaciona la energía específica del recurso y la producción de energía según diferentes velocidades y direcciones de viento. Esto último se considera un aporte para la comprensión de la complejidad del modelado físico del viento y la producción de una Microturbina.

Palabras clave: Micro Turbina Eólica, Predicción, LSTM.

1.- INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas en la industria eléctrica se han producido una serie desarrollos tecnológicos que han provocado una verdadera revolución en el sector. Por un lado, diferentes procesos de producción/transformación de Energía Eléctrica (EE) a partir de recursos primarios renovables han alcanzado un gran desarrollo con un consecuente impacto en la reducción de costos asociados a su implantación (sistemas eólicos, fotovoltaicos, etc.). Por otro, se está produciendo una acelerada electrificación de diferentes usos finales en sectores que parecían destinados a ser satisfechos solo por recursos fósiles (en movilidad, el incipiente pero acelerado desarrollo de Vehículos Eléctricos; en acondicionamiento de ambientes, bombas de calor; etc.) donde además se alcanzan considerables mejoras en la eficiencia de los procesos de conversión respecto de los tradicionales (motores de combustión interna, calderas, etc.). Las anteriores son las razones fundamentales para inferir que el proceso de Transición Energética hacia un escenario de emisiones netas cero para el 2050 requerirá incrementar notablemente la participación de la energía eléctrica en los sectores de usos finales. En valores aproximados esto significará pasar de una participación actual de la energía eléctrica de un 20 % a un 50 % en la matriz energética global (IEA, 2021).

Si bien los requerimientos de transformación para el sector de la EE afectan tanto a los procesos de generación, transmisión y distribución, en este último es tal vez donde se estén produciendo, y seguramente se profundizarán, profundos cambios. Por un lado, la posibilidad de producir energía eléctrica a pequeña escala a partir de recursos primarios renovables, lo que permite que un usuario demandante de EE pueda generarla e inyectarla en la red. Por otro, la tendencia a electrificar ciertas demandas energéticas que resultan en un significativo incremento de la misma además de una variabilidad atípica para las redes de distribución tradicionales.

A partir de lo anterior es posible inferir la necesidad de mantener la oferta y demanda de energía en un grado de equilibrio que permita garantizar la operación en condiciones estables en aspectos técnicos básicos y otros relacionados con el concepto de operación optima de la red (Mehigan et al., 2018).

Mientras lo anterior sucede en el sector de la EE, se observa un desarrollo extraordinario en el área de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC's) facilitando el manejo de grandes volúmenes de información y la posibilidad de gestión de diferentes tipos de sistemas, en particular los energéticos. Esencialmente la aplicación de las TIC's sobre esta nueva concepción de una red eléctrica de distribución actuando de manera inteligente como parte de un sistema de gestión de equilibrio entre generación, consumo y distribución, es lo que se ha dado en llamar Redes Inteligentes (RI) o Smart Grid (SG) (Bani-Ahamed et al., 2018; Ayadi et al., 2020).

La planificación, operación y el análisis del comportamiento de una RI requieren de detallados modelos de los sistemas y predictores de los comportamientos de la demanda y generación y, en determinadas circunstancias, sus respectivas incertidumbres (Khaleh y Laaksonen, 2022; Ahmada et al., 2020).

Otro factor importante en las predicciones energéticas es el horizonte temporal, que está íntimamente ligado al problema abordado. Aunque no existe un acuerdo unánime sobre la categorización de las escalas temporales, es posible distinguir cuatro tipos: pronóstico a muy corto plazo (Very Short-Term Forecasting - VSTF), de minutos a pocas horas; previsión a corto plazo (Short-Term Forecasting - STF), de horas a un día o pocos días; previsión a medio plazo (Medium-Term Forecasting - MTF), de días a meses en un año; y previsión a largo plazo (Long-Term Forecasting - LTF), de varios meses a años (Kaur et al., 2015).

En la misma referencia se observa una pormenorizada clasificación y descripción a partir de cómo se entrenan los modelos y los métodos empleados en estas predicciones, distinguiendosé principalmente tres enfoques. En primer lugar, las técnicas determinísticas, que incluyen los métodos estadísticos tales como los Modelos de Media Móvil Autorregresiva (ARMA) y los de Media Móvil Integrada Autorregresiva (ARIMA), como los más conocidos. En segundo lugar, los métodos de aprendizaje automático (ML - Machine Learning) que abarcan tales como la máquina de vectores de soporte (SVM-Support Vector Machine) y Regresión de vector de soporte (SVR - Support Vector Regression). Y, por último, los métodos de aprendizaje profundo (DL – Deep Learning) que engloban a las Redes neuronales de retroalimentación (FFNN - Feed Forward Neural Networks), Redes neuronales de retropropagación (BPNN - Back-Propagation Neural Networks), Redes neuronales recurrentes (RNN - Recurrent Neural Networks) o Memoria larga a corto plazo (LSTM - Long Short-Term Memory) y Redes neuronales convolucionales (CNN - Convolutional Neural Networks).

Otra importante caracterización general en cuanto a estos métodos y aplicaciones particulares puede verse en (Ahmada et al. 2020).

La necesidad de disponer de herramientas predictivas en la producción de energía de parques eólicos es de gran interés. La posibilidad de participar mediante estas tecnologías compitiendo en un mercado eléctrico spot puede generar ingresos adicionales para los inversores incorporándose en el mercado de reservas. En tal contexto la confiablidad de los sistemas predictivos es crucial (Jorgensen y Reza,2020).

Los volúmenes de inversión, los tamaños de los mercados y los contextos geográficos (en general entornos urbanos) de los que pueden formar parte los sistemas MicroEólicos (ME) aún no están concentrando gran atención ya que desde lo económico resultan poco significativos. Sin embargo, el

potencial desarrollo de Micro Mercados Eléctricos (MME) o la gestión de cargas y producción de energía en SG aisladas, entre otras situaciones, permiten inferir un creciente interés en este tipo de aplicaciones orientados a sistemas ME (Zahraoui et al., 2023; Sousa et al., 2019; Maturana et al., 2023).

La predicción confiable de la generación de energía eólica es una tarea compleja, principalmente por su dependencia fundamentalmente de diferentes fenómenos climáticos. Hasta hace poco tiempo los sistemas predictivos estaban basados en modelados estadísticos y físicos del objeto de estudio. En la medida que los fenómenos que se modelan son de mayor complejidad los resultados obtenidos tienden a ser menos confiables. La posibilidad de predecir la producción de un sistema eólico implica la necesidad de modelar un fenómeno meteorológico, como la velocidad y dirección del viento, junto con un dispositivo de captación o conversión energética. En particular tal proceso incrementa su dificultad en el caso de sistemas ME ya que los mismos tienden a localizarse en entornos donde la presencia de diferentes objetos (edificios, arbolados, etc.) perturba notablemente los flujos de viento. Este problema ha sido tratado en (Reja et al., 2022). Las intensidades de las turbulencias ambientales en estos entornos pueden modificar sensiblemente la producción de la turbina según la velocidad o dirección del viento. Más aun, ha sido cuestionada la aptitud de la Norma IEC 61402 en ME ya que en general las condiciones de los vientos en sus entornos típicos de instalación no se corresponden con los asumidos por la referida normativa (Anup et al., 2019).

En la descripción anterior se encuentran en gran medida las razones por las cuales las técnicas basadas en modelados estadísticos y físicos resultan poco eficientes en procesos de predicción frente a los nuevos desarrollos en el campo del ML. Las limitaciones de los modelos físicos frente a métodos basados en Inteligencia Artificial, particularmente las LSTM, son puestas de manifestó en (Zhang et al., 2014; Xiong et al., 2022)

Son escasos los avances en el área de las predicciones de sistemas ME y en particular cuando se emplea sistemas de ML. La implementación de un modelo LSTM-RNN para la predicción de la velocidad del viento aplicado en una micro red aislada puede verse en (Kumar et al., 2020). Allí se actualiza el estado del modelo con valores observados en lugar de valores predichos para mejorar la precisión. Sin embargo, el trabajo no realiza la predicción directa de energía, lo que puede llevar a errores importantes debido al efecto de las turbulencias en la producción de energía anteriormente mencionado. La mayoría de los estudios en este campo están orientados a grandes sistemas eólicos. Por ejemplo, (Xiong et al., 2022) trabaja con una LSTM híbrida en conjunto con un mecanismo de atención y una CNN. En dicho trabajo se evalúa el desempeño para distintos horizontes de tiempo, comparando varios modelos, incluyendo una red basada puramente en una LSTM. Otros trabajos como (Du, 2019) además, emplean el pronóstico de variables meteorológicas, lo que mejora el rendimiento de los modelos.

El objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una herramienta predictiva de corto plazo de producción de energía de una instalación ME basada en una LSTM. El sistema que se propone emplea, por un lado, datos históricos y pronósticos meteorológicos de libre acceso, y por otro, los registros de energía inyectada a la red eléctrica de un sistema ME.

La estructura del trabajo contempla, en primer lugar, una descripción teórica de distintos tipos de redes neuronales y las ventajas del empleo de las LSTM en este tipo de aplicaciones, seguido de una descripción de las características principales del equipo ME y de su instalación: turbina, inversor y medición. Luego se presenta la información meteorológica, histórica y pronosticada, que se usará. Se incluye también una caracterización básica del recurso eólico en el lugar de instalación a partir de la serie histórica de información meteorológica. Posteriormente se describe el proceso para la implementación de un modelo basado en una LSTM y finalmente se muestran los resultados obtenidos.

2.- METODOLOGÍA

2.1.- Redes Neuronales

A continuación, se describe el funcionamiento de una Red Neuronal (NN - Neural Networks) básica y su evolución hasta la configuración y funcionamiento de una NN tipo LSTM que se empleará en el

presente trabajo. También se explicitarán los motivos por los cuales este tipo de herramientas resultan conceptualmente las más indicadas para el propósito en cuestión.

La Figura 1 muestra la topología de una NN básica. En tal representación, las neuronas/nodos son identificadas con círculos y representan la unidad fundamental de una red neuronal, estas reciben entradas, realizan una operación matemática y producen una salida. Las capas están compuestas por neuronas, existen distintos tipos, como la capa de entrada, la cual recibe las características del conjunto de datos, las ocultas, que realizan transformaciones intermedias de los datos (las redes con múltiples capas ocultas se conocen como redes neuronales profundas), y la capa de salida, la cual produce la predicción o resultado final.

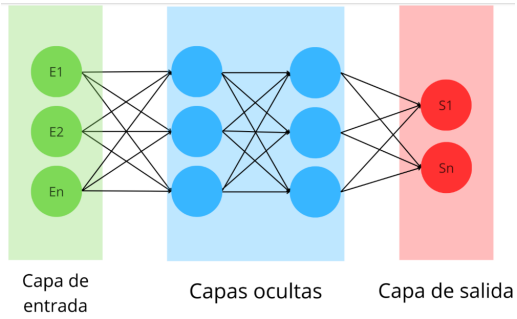


Figura 1: Estructura topológica de una NN.

Cada neurona en la red recibe una serie de entradas ponderadas, las suma y aplica una función de activación (por ejemplo, Sigmoidal) para producir una salida. Esta salida se propaga hacia adelante a través de la red, desde la capa de entrada, a través de las capas ocultas, hasta llegar a la capa de salida. Este proceso es conocido como propagación hacia adelante (Forward Propagation). Después de obtener una salida, se calcula la diferencia entre esta salida y el valor esperado (error) usando una función de pérdida. Luego, la red ajusta las ponderaciones mediante el algoritmo de retropropagación (Back Propagation), que usa el gradiente descendente para minimizar el error en las predicciones.

Esta configuración presenta un par de limitaciones. Por un lado, las NN básicas no tienen memoria, o sea, no pueden recordar la información previa de una secuencia de datos lo que constituye un problema para datos secuenciales, como series temporales. Por otro, durante la retropropagación el gradiente puede volverse muy pequeño dificultando el ajuste de los pesos de las primeras capas, lo que limita su capacidad para aprender dependencias a largo plazo.

Una primera mejora para la aplicación es la introducida por la RNN. Para manejar datos secuenciales la salida de una neurona se retroalimenta como entrada a la misma neurona en el siguiente paso temporal. Dicha topología se presenta en la Figura 2, donde “x” y “o” representan respectivamente la entrada y la salida de información, h representa el estado oculto, U, V Y W representan las matrices de pesos que describen las relaciones entre X-h, h-V y h-h. El estado oculto h es el componente clave para mantener la dependencia dentro de la serie temporal (Aslam et al., 2021).

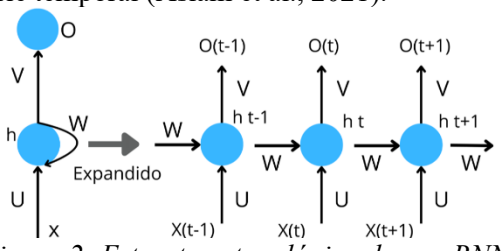


Figura 2: Estructura topológica de una RNN.

A pesar de esto, persiste el problema con dependencias a largo plazo debido al desvanecimiento del gradiente lo que limita su capacidad para recordar información pasada en secuencias largas. Si a una RNN se le introduce un mecanismo denominado celda de memoria, un nuevo estado oculto, junto con puertas de entrada, salida y olvido que controlan el flujo de información será lo que se denomina LSTM. Este esquema permite el manejo de dependencias a largo plazo gracias a estas puertas, pudiendo almacenar y recordar información durante largos periodos, superando el problema del desvanecimiento

del gradiente y mejorando significativamente la capacidad de modelar secuencias temporales complejas. Esta capacidad para manejar dependencias temporales a largo plazo es lo que le confiere un gran potencial en aplicaciones para predicción de series temporales como el caso predicción de producción de energía eólica (Aslam et al., 2021).

En la Figura 3 se describe la estructura topológica básica de una red LSTM: (a) hace referencia a una compuerta de olvido que determina cuanta información se conserva del último estado C(t-1); (b) a una de entrada que determina qué información debe considerarse como entrada para el estado actual; (c) a una compuerta de salida, la cual calcula que información se trata como salida. Mientras que f(t), i(t), y o(t) representan respectivamente los elementos de polarización de estas compuertas. El nuevo estado oculto C, está diseñado para mantener información a largo plazo, mientras que el "h" de la RNN se encarga de mantener información de corto plazo (Aslam et al., 2021).

Las celdas LSTM, como se muestra en la Figura 3, se interconectan para procesar secuencias temporales de una determinada longitud (cada celda corresponde a un instante temporal t). En cada instante de tiempo t, se introduce un conjunto de datos temporales de entrada x(t). Cada celda LSTM procesa esa entrada junto con los estados anteriores C(t−1) y h(t−1), actualizando los valores de C(t) y h(t) en cada paso. De este modo, la información fluye a través de las celdas, capturando dependencias tanto a corto plazo, mediante h(t), como a largo plazo, a través de C(t).

Las fortalezas de las LSTM frente a los modelos físicos se resumen en la Tabla 1. Cabe destacar que las ventajas descritas adquieren mayor relevancia en instalaciones ME donde las condiciones son más desfavorables que las habituales a los emplazamientos de grandes parques eólicos.

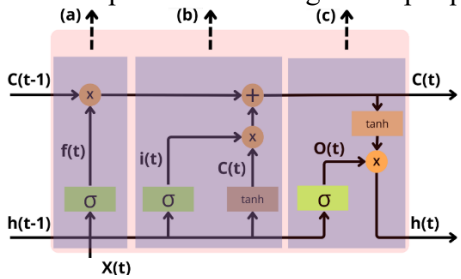


Figura 3: Estructura topológica básica de una red LSTM.

Tabla 1: Cuadro comparativo de fortalezas de las redes LSTM vs Modelos Físicos.

Modelos Físico	LSTM
Dependen de simplificaciones y suposiciones que no siempre reflejarán la naturaleza no lineal del viento y su interacción con las turbinas eólicas.	Capaces de modelar relaciones no lineales complejas, ofrecen una mejor representación de esta realidad.
	Capaces de aprender directamente de los datos históricos de producción de energía y condiciones meteorológicas, sin necesidad de modelar explícitamente todos los procesos físicos
Requieren ajustes específicos para diferentes ubicaciones o configuraciones de las turbinas.	Son más flexibles y pueden ser entrenadas en una variedad de conjuntos de datos facilitando su aplicación en diferentes contextos
Pueden ser muy detalladas, a menudo son computacionalmente intensivas y requieren mucho tiempo de cómputo.	Una vez entrenadas, pueden proporcionar predicciones en tiempo real de manera eficiente

2.2.- Instalación de la Turbina ME

En la Figura 4, se muestra una foto satelital del emplazamiento de la Turbina ME, identificándose la dirección Norte, y tres fotografías: una desde la dirección Norte, otra desde la Noreste y otra desde la Sur, el mismo se encuentra ubicado en el Instituto de Protecciones de Sistemas Eléctricos de Potencias (IPSEP-UNRC), en la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba (coordenadas 33°06'38,3"S 64°17'50,6"O). El objetivo de estas imágenes es percibir los obstáculos que enfrenta el normal flujo del

viento según la dirección que se trate. Se observan dos líneas de arbolados en la dirección Norte y Noreste, a aproximadamente 20 y 40 m de distancia; una de ellas menos perceptible por ser una especie de hoja caduca, con una altura de copa superior en por lo menos 5 m del eje horizontal de la turbina.



Figura 4: Emplazamiento de la Turbina ME.

La turbina ME es aerogenerador EOLUX 1200 48V con potencia nominal de 1200 W a 14 m/s, velocidad de arranque de 4,5 m/s, tiene un generador trifásico síncrono de imanes permanentes, un rotor de tres palas con un ángulo de 6 grados y un diámetro de 2,1 m. Se encuentra sobre un reticulado metálico (12 m) que a su vez se apoyada sobre una cubierta de techo (9 m) arriostrada por rienda metálicas. El acoplamiento a la red eléctrica se materializa mediante un inversor ABB UNO-2.0-I-W, cuya tensión de entrada máxima es de 520 V de CC, potencia de conexión a la red de CA 2000 W. Cabe destacar un dispositivo rectificador simple en la entrada. Las diferentes variables eléctricas (tensiones, corrientes, energías, etc.) son registradas por un medidor inteligente Dimet-G (Discar Metering) gestionado por el sistema on line Mr.Dims.

2.3.- Información meteorológica

Uno de las premisas claves de este trabajo ha sido utilizar información de acceso público, histórica como predictiva, para caracterizar las velocidades y direcciones del viento procurando que tales registros sean lo más cercanos posible al emplazamiento de la instalación en cuestión. En tal sentido, se han empleado series históricas de variables meteorológicas como así también sus pronósticos diarios considerando que esta información puede resultar una importante contribución en el proceso de entrenamiento del modelo.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN): Desde el Centro de Información Meteorológica dependientes del SMN se han obtenido diversos parámetros registrados en el Aeropuerto Río Cuarto en una estación situada a 2,6 km del emplazamiento de la ME (velocidad y dirección del viento para cada hora de los años 2021 a 2023, medidos a 10 m), SMN (2024).

Observatorio Hidro-Meteorológico de la Provincia de Córdoba (OHMC): Entre otras tareas, este organismo produce cada 12 h una serie de pronósticos hidro-meteorológicos empleando tanto la información del SMN como la brindada por los distintos modelos de pronóstico numérico disponibles. Para la Región Centro, utiliza el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) el cual brinda una mejor resolución espacial (menor a 4 km) y es configurable por el usuario. El OHMC emite dos pronósticos diarios: uno a las 6 h y otro a las 18 h. El primero de ellos es a partir de la hora 12 del presente día y por 24 h (este es el utilizado en el trabajo). El pronóstico de velocidad y dirección de viento (bajo el tipo de “Parametrización A” según la denominación del OHMC), para cada hora de los años 2021 a 2023, se emplea en este trabajo, OHMC (2024).

2.4.- Caracterización básica del recurso y su relación con la producción de energía

A partir de la información suministrada por el SMN para cada hora en los años 2021, 2022 y 2023, se ha determinado el valor medio y la desviación estándar de velocidad de viento. Además de los parámetros de forma (k) y escala (c) de la distribución de Weibull, comúnmente utilizada para ajustar la frecuencia de la velocidad del viento (Anup et al., 2019). Esto se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Magnitudes estadísticas de la velocidad del viento en km/h para 3 años de análisis

Año	Valor medio	Desviación Std.	c-Weibull	k-Weibull
2021	19,32	10,70	1,90	21,77
2022	20,41	11,79	1,81	22,96
2023	18,04	9,61	1,98	20,35

En la Figura 5 se muestra la gráfica de distribución acumulada de probabilidades empleando un escalamiento de bins cada 5 km/h y para los 3 años analizados. También resultan un buen indicador de la regularidad del recurso en el tiempo y que aproximadamente durante la mitad del tiempo no se alcanza la velocidad de arranque de la turbina.

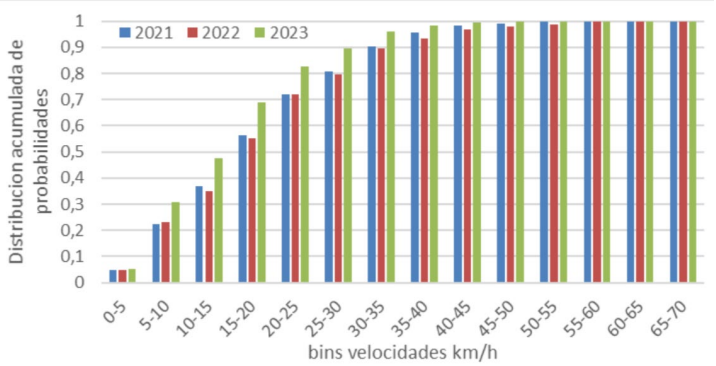


Figura 5: Frecuencia acumulada de velocidad de viento para los tres años.

Procurando identificar el eventual impacto de las condiciones que impone el contorno de la instalación (arbolado y otros aspectos que alteran el normal flujo del viento) se analizarán la energía específica y la EE medida en función de los ocho semivientos. El análisis se basa en la combinación de los datos proporcionados por el SMN con los registros de energía eléctrica del medidor Dimet-G. En una primera instancia la representación gráfica se divide según la velocidad del viento medida se encuentre por debajo o por encima de la velocidad de arranque de la turbina (16,2 km/h). La Figura 6 muestra la producción de energía eléctrica según las diferentes direcciones y según la anterior clasificación respecto a las velocidades. Se puede observar la predominancia de producción en la dirección Norte (aproximadamente 60%) acompañada, en muy menor medida, por las direcciones Sud y Sudoeste (prácticamente el 30% restante). Si bien resulta poco significativo, aproximadamente un 8% del volumen total de energía se corresponde con velocidades del viento medidas que no alcanzan la velocidad de arranque de la turbina.

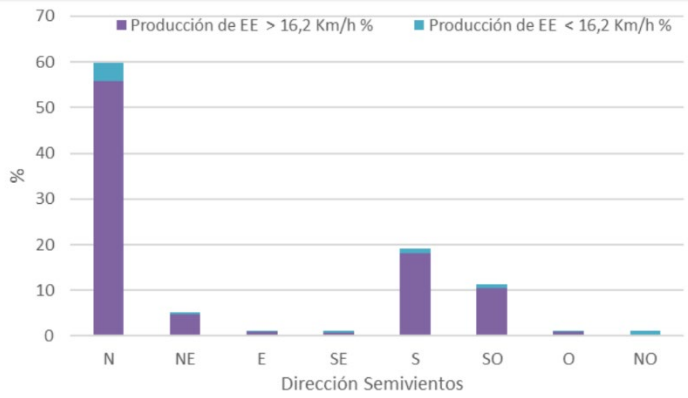


Figura 6: Producción de energía según la dirección y velocidad del viento.

En lo sigue se procura analizar la relación que existe entre la Energía Específica del viento por m^2 (la mitad del cubo de la velocidad del viento asumiendo una densidad del aire de 1kg/ m^3) y la producción de energía eléctrica. La Figura 7 muestra su representación gráfica para velocidades de viento superiores a 16,2 m/s. Puede deducirse que la conversión energética en las direcciones Norte y Noreste es menos eficiente que en las Sud y Sudoeste. Esto podría explicarse a partir de la descripción de las condiciones del entorno del emplazamiento de la turbina a las que se refirió la Figura 4.

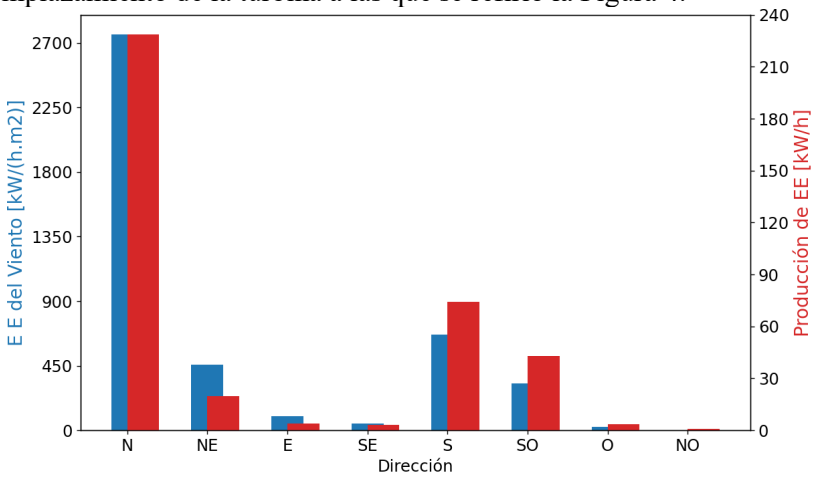


Figura 7: Energía eléctrica y específica del viento para diferentes direcciones.

2.5.- Implementación del modelo de predicción

A continuación, se presenta una breve descripción de la implementación de un modelo basado en una red LSTM para la predicción de energía eléctrica en una ventana de 8 h. Este desarrollo se implementó en Python con el uso de las librerías TensorFlow y Keras.

2.5.1.- Preparación de datos

Las series de tiempo que se emplean para todas las variables están escaladas en pasos por hora: las velocidades y direcciones del viento son valores medios para cada hora y los de energía se corresponden con la producción total para cada hora. Se asume un horizonte de predicción de 8 h lo que define la longitud temporal de ventanas de entrenamiento, validación y predicción. Las entradas del modelo son, ventanas de 8 h que cuentan, por un lado, las velocidades y direcciones de viento medidas (SMN) y las producciones de energía sincronizadas medidas, y por otro, las velocidades y direcciones de viento pronosticadas (OHMC).

Las velocidades del viento de las dos fuentes de datos fueron descompuestas en sus componentes x e y. También se empleó como entrada la hora del día codificada, cuya descripción se presentará en la próxima sección.

De la totalidad de los datos disponibles (agosto 2021-septiembre 2022), el 80% de los mismos se destinó al entrenamiento del modelo, un 10% para la validación y el último 10% para su evaluación. Los criterios generales para la asignación de estos porcentajes son, básicamente, que el modelo tenga suficiente información para aprender patrones y no se sobreajuste en relación al conjunto de validación y contar también con un volumen de datos para evaluar el modelo. La energía eléctrica para todo el periodo, según la separación presentada anteriormente, se visualiza en la Figura 8.

Para eliminar la dimensionalidad de las variables de entrada del modelo de predicción, que poseen diferentes rangos de valores, se realiza una normalización de cada una de ellas, como se expresa en la Ec. (1).

$$X_{nor} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

Para utilizar la variable temporal como entrada y evitar discontinuidades en el modelo, se codificó el tiempo utilizando dos funciones: una senoidal y otra cosenoidal, ambas con un período de 24 h. Esto le

permite al modelo capturar la ciclicidad diaria de los eventos temporales. En las Ecs. (2,3) se presentan dichas codificaciones.

$$dia_sin = \sin\left(\frac{2*\pi*tiempo_s}{dia}\right) \quad (2)$$

$$dia_cos = \cos\left(\frac{2*\pi*tiempo_s}{dia}\right) \quad (3)$$

donde:

tiempo_s = tiempo en segundos desde el inicio de la serie temporal.
dia = 24×60×60 es el número de segundos en un día.
dia_sin = variable temporal codificada.
dia_cos = variable temporal codificada.

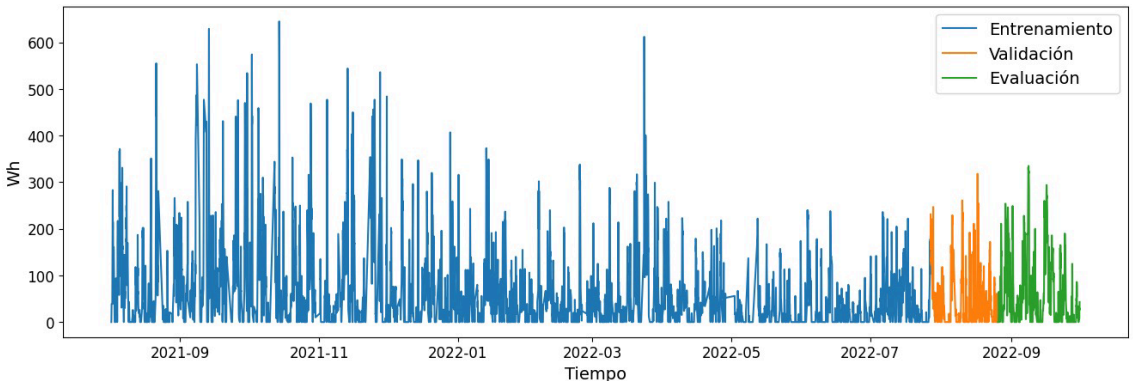


Figura 8: Representación gráfica de la serie temporal de energía eléctrica.

2.5.2.- Función de Pérdida y método de evaluación

Se ha definido como función de pérdida para el entrenamiento a el error cuadrático medio (RMSE). Esta métrica se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las diferencias entre las predicciones y los valores medidos. Este método, también es el utilizado luego para evaluar los resultados con los datos de evaluación y también por los datos de validación para operar durante el entrenamiento.

2.5.3.- Conformación del modelo

El modelo está conformado por una capa LSTM de una determinada cantidad de unidades y una capa densa con activación lineal del tamaño de la secuencia de salida (8 neuronas). Es importante tener en cuenta que la parametrización completa del modelo se presentará en la sección resultados, luego de un proceso de optimización.

Existen una serie de parámetros que se ajustan en la ejecución del modelo. El primero es el número de unidades, o neuronas de la propia LSTM, el segundo, las Epochs (épocas) que refiere a la cantidad de veces que el modelo pasa todo el conjunto de datos en el entrenamiento, el tercero, el BatchSize (o tamaño del lote) que refiere a la cantidad de secuencias que se ejecutarán conjuntamente antes de actualizar los parámetros del modelo. Las unidades son las propias de la capa LSTM, mientras que el optimizador del algoritmo utilizado para minimizar la función de pérdida durante el entrenamiento, fue el Root Mean Square Propagation (RMSprop), el cual requiere la asignación de una tasa de aprendizaje, que define cuanto se ajustan los pesos en cada iteración.

3.- RESULTADOS

Se realizó una optimización del modelo haciendo ajustes sobre los parámetros descriptos en la sección anterior con la premisa de reducir el RMSE del conjunto de datos de validación. En la Tabla 3 se presenta la parametrización del modelo seleccionado y los resultados obtenidos. Se destacan valores de RMSE concordantes para los tres conjuntos de datos. Los valores están en por unidad ya que se evaluaron sobre datos normalizados.

En la Tabla 4 se presentan variaciones de los parámetros del modelo y su impacto en los resultados. En relación con el modelo seleccionado (Tabla 3), para el caso 1, se observa que el número de iteraciones o Epochs en el entrenamiento no le permite al modelo converger adecuadamente, lo que conlleva a mayores errores. Una situación similar ocurre en el caso 2, en el que un elevado número de Epochs, logró reducir el RMSE de los datos de entrenamiento, pero generó un sobreajuste, visible en el mayor error sobre los datos de validación y evaluación. En cuanto al cambio en la cantidad de Units, en los casos 3 y 4, se observa que al aumentar o reducir el número de estas respecto al caso testigo aumenta el RMSE de los datos de validación como el de los datos de evaluación. Por último, en el caso 5, al aumentar el tamaño del BatchSize puede estar causando una reducción en la precisión a la hora de actualizar las ponderaciones durante el entrenamiento, lo que conlleva a un incremento del RMSE de los tres conjuntos.

Tabla 3: Parámetros de ajustes y resultados para el modelo seleccionado

Parámetros		Resultados	
Units	150	RMSE Train[pu]	0,193
Optimizer	Rmsprop (lr=4x10^-4)	RMSE Vali[pu]	0,173
Epochs	50	RMSE Eval[pu]	0,172
Batch Size	250		

Tabla 4: Variantes de los parámetros del modelo seleccionado

Caso	Units	Epochs	BatchSize	RMSE Train[pu]	RMSE Vali[pu]	RMSE Eval[pu]
1	150	10	250	0,210	0,220	0,184
2	150	600	250	0,168	0,205	0,210
3	130	50	250	0,191	0,174	0,173
4	170	50	250	0,192	0,175	0,173
5	150	50	900	0,209	0,209	0,183

Para una observación visual entre los valores medidos y las predicciones, en la Figura 9 se muestra gráficamente la evolución temporal de ambas magnitudes durante el tramo de evaluación (ultimo 10 % del total de la serie temporal empleada). Naturalmente las predicciones son efectuadas a 8 h.

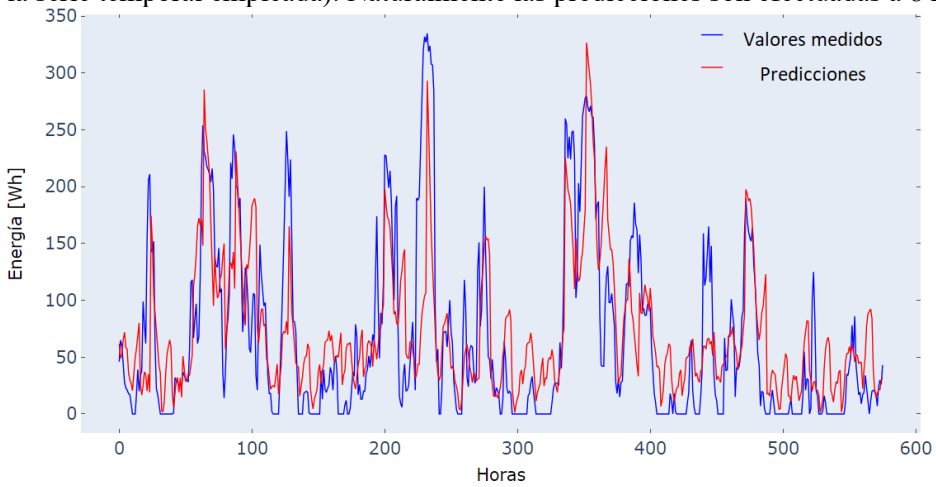


Figura 9: Comparación entre datos medidos y predicciones.

Lo presentado en la Figura 9 permite considerar a los resultados como satisfactorios observándose una clara tendencia de las predicciones a seguir a los datos reales aún en la importante variabilidad de la energía, propia de la del recurso eólico. Por otro lado, en relación al RMSE del conjunto de evaluación, la posibilidad de predecir con un error del 17% la producción de energía de un ME para las próximas 8 h se considera aceptable y presenta un amplio campo de aplicaciones. Por ejemplo, en la administración y gestión de una RI aislada o de un esquema de MME.

4.- CONCLUSIONES

Se ha planteado el rol de la energía eléctrica en el proceso de Transición Energética y el de las RI en la gestión y operación de estos sistemas. Se ha fundamentado la necesidad de disponer de herramientas confiables para la predicción de las distintas variables eléctricas involucradas: las que se refieren a la demanda y, muy especialmente, a las de generación. Se ha argumentado respecto a las limitaciones de los métodos clásicos de predicción y fundamentado la aptitud de las Redes Neuronales tipo LSTM cuando el objeto de estudio es el de las instalaciones ME.

Se ha presentado la implementación de un modelo basado en una red LSTM para la predicción de generación eléctrica de una turbina ME cuyo entrenamiento emplea una serie de datos medidos y pronosticados (ambos de libre acceso), de velocidad y dirección del viento, conjuntamente con datos medidos de generación de energía del sistema ME. Para el entrenamiento, validación y evaluación del modelo se ha empleado la información anterior para cada hora durante 13 meses consecutivos. La posibilidad de predecir con un error del 17% la producción de energía de un ME para las próximas 8 h es muy importante y presenta un amplio campo de aplicaciones, típicamente en la administración y/o gestión de una RI aislada o de un esquema de MME.

Cabe destacar que analizando el recurso con datos de velocidad y dirección del viento asociado a los de energía producida, se consolidan las suposiciones sobre la complejidad que significa un modelado físico de la interacción viento-maquina en los contextos ambientales y geográficos de este tipo de instalaciones. Esto también refuerza la potencial aptitud de los modelos que contengan redes LSTM en estas aplicaciones.

El avance alcanzado, y los resultados obtenidos, permiten considerar la posibilidad de profundizar la línea de trabajo procurando incrementar el horizonte de predicción (por lo menos a 24 h), así como evaluar otras herramientas, técnicas y configuraciones asociadas al ML.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Información Meteorológica dependientes del Servicio Meteorológico Nacional por facilitar el acceso a sus series históricas de información meteorológica.
Al Observatorio Hidro-Meteorológico de la Provincia de Córdoba (OHMC) por facilitar el acceso a sus series históricas de información meteorológica.
A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC por el financiamiento al proyecto en cuyo marco se realizó este trabajo.

REFERENCIAS

Ahmada T., Zhanga H. y Yana B. (2020). A review on renewable energy and electricity requirement forecasting models for smart grid and buildings. Sustainable Cities and Society, Esevier, Vol. 55.

Anup K.C., Whale J. y Urmee T. (2019). Urban Wind Conditions and Small Wind Turbines in the Built Environment: A Review. Renewable Energy, Elsevier. Vol. 131, pp. 268-283.

Aslam S, Herodotou H, Mohsin S., Javaid N., Ashraf N. y Aslam S. (2021). A Survey on Deep Learning Methods for Power Load and Renewable Energy Forecasting in Smart Microgrids. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Vol. 144.

Ayadi F., Colak I., Garip I. y Bulbul H. (2020). Impacts of Renewable Energy Resources in Smart Grid. 8th IEEE International Conference on Smart Grid, Paris, France.

Bani-Ahmed A., Nasiri A. y Stamenkovic I. (2020). Foundational Support Systems of the Smart Grid: State of the Art and Future Trends. International Journal of Smart Grid, Vol. 2, No. 1.

Du M. (2019). Improving LSTM Neural Networks for Better Short-Term Wind Power Predictions. 2nd International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), Toronto, Canada.

International Energy Agency (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Revised version, (4th revision).

Jørgensen K.L. y Reza C. H. (2020), Wind Power Forecasting Using Machine Learning: State of the Art, Trends and Challenges. IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering, pp. 44–59.
Kaur D., Islam S. N., Mahmud M. A., Haque M. E. y Dong Z. Y. (2015). "Energy Forecasting in Smart Grid Systems: Recent Advancements in Probabilistic Deep Learning", The Institution of Engineering and Technology. Research Journals, pp. 1–15.
Khajeh H. y Laaksonen H. (2022). Applications of Probabilistic Forecasting in Smart Grids: A Review. Appl. Sci. Vol. 12.
Kumar, D., Mathur, H. D., Bhanot, S. y Bansal, R. C. (2020). Forecasting of solar and wind power using LSTM RNN for load frequency control in isolated microgrid. International Journal of Modelling and Simulation, 41(4), 311–323. https://doi.org/10.1080/02286203.2020.1767840.
Maturana J.B., Aguilera F. y Oggier G. (2023), Dimensionamiento del Sistema de Almacenamiento de Energía de una Microred Híbrida para Reducir el Consumo de Energía de la Red Eléctrica, XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC.
Mehigan L., Deane J.P., Gallachóir B.P. y Bertesh V. (2018). A Review of the Role of Distributed Generation in Future Electricity Systems. Energy, Elsevier, Vol. 163, pp. 822-836.
OHMC [en línea] Pronósticos hidro-meteorológicos para la Región Centro (2021-2023). Observatorio Hidro-Meteorológico de la Provincia de Córdoba. Dirección URL: https://ohmc.ar/ [consulta: 4 de julio de 2024].
Parag Y. y Ainspan M. (2019). Sustainable microgrids: Economic, environmental and social costs and benefits of microgrid deployment. Energy for Sustainable Development, Elsevier. Vol 52, pp. 72-81.
Reja R., Amin R., Tasneem Z., Ali M. F., Islam M. R., Saha D., Badal F., Ahamed M. H. y Moyeen, S (2022). A Review of the Evaluation of Urban Wind Resources: Challenges and Perspectives. Energy y Building, Elsevier. Vol. 257. pp. 1-19.
SMN [en línea] Parámetros meteorológicos del Aeropuerto Río Cuarto (2021-2023). Servicio Meteorológico Nacional. Dirección URL: https://www.smn.gob.ar/ [consulta: 6 de agosto de 2024].
Sousa T., Soares T., Pinson P., Moret F., Baroche T. y Sorin E. (2019). Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 104, pp. 367-378.
Xiong B., Lou L., Meng X., Wang X., Ma H. y Wang Z. (2022). Short-term wind power forecasting based on Attention Mechanism and Deep Learning. Electric Power Systems Research, Vol. 206.
Zahraoui Y, Korõtko T., Rosin A. y Agabus H. (2023). Market Market Mechanisms and Trading in Microgrid Local Electricity Markets: A Comprehensive Review. Energies (MDPI), Vol. 16.
Zhang Y., Wang J., Wang X. (2014). Review on probabilistic forecasting of wind power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 32, pp. 255-270.

SHORT-TERM PREDICTION OF ENERGY GENERATION OF A MICROWIND TURBINE USING LONG SHORT-TERM MEMORY NEURAL NETWORKS

ABSTRACT The importance of Smart Grids in the context of the Energy Transition is justified. Forecasting, of production or demand, play a key role for different types of analysis or operation of this type of networks. The different techniques used to solve this problem are described and Neural Networks, particularly Long Short-Term Memory, are highlighted. From this, the objective is to develop a short-term predictive tool for energy production of a MicroWind installation based on a Long Short-Term Memory. For training, data on wind speed and direction are used, recorded by the National Meteorological Service and by the Hydro-Meteorological Observatory of Córdoba, in the first case records of historical information and in the second, forecasts of such parameters for the following day. In both cases, the information is freely available. The energy generated by a MicroWind is used to complement the training data. Promising results are shown in the predictions. The specific energy of the resource and the energy production according to different wind speeds and directions are also related. The latter is considered a contribution to the understanding of the complexity of physical modeling of the wind and the production of a MicroWind.

Keywords: MicroWind, Forecasting, LSTM.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 162-173, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

VALIDACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE BANCO DE EMULACIÓN DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA

Ruben D. Bufanio[1], Cristian N. Zúñiga[1], Norberto C. Scarone[1], Nestor D. Marasco[1], Gustavo E. Monte[1], Daniel G. López[1], Solange Salazar[1], Ricardo F. Thomas[1]
[1]Grupo UTN GESE FRN – Departamento de Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Neuquén (UTN FRN)
Pedro Rotter S/N, Plaza Huincul, Neuquén, Tel. 0299-4961162
e-mail: rbufanio@frn.utn.edu.ar

RESUMEN: Este Trabajo muestra los avances y mejoras obtenidos en el desarrollo de un emulador de turbina eólica de baja potencia de eje horizontal. Lo implementado permite emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico, en función del viento, se asemejen a los que un rotor real desarrolla. Reduciendo sensiblemente los tiempos de prueba de los sistemas eléctricos de conversión, al poder recrear diversos escenarios de campo, tanto para sistemas vinculados a la red eléctrica distribuida como aislados. Por lo tanto, se describe, el proceso de diseño e implementación de su control, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Para ello, según las especificaciones impuestas, se comienza por los conceptos asociados al modelado computacional, luego los aspectos principales del hardware y software de control, la interfaz de usuario y sus características. Posteriormente, los detalles de la construcción del prototipo experimental, la obtención y análisis de resultados, y la comparación con los del modelado computacional. Se destacan los beneficios potenciales que puede aportar el sistema tanto en el ámbito académico como en la industria. Por último, como trabajo futuro, se plantean opciones de mejora.

Palabras clave: Emulador, Energía Eólica, Baja Potencia, Control.

INTRODUCCIÓN

Como se indica en (Zúñiga et al. 2023), dadas las especificaciones de un sistema de conversión de la energía eólica del viento, de sus siglas en inglés (WECS – del inglés, Sistema de Conversión de la Energía Eólica), el análisis de su desempeño suele ser muy costoso y llevar considerable tiempo. Las experiencias transitadas en los últimos años, (Bufanio et al., 2022; Bufanio et al., 2019), ratifican la necesidad del desarrollo de un banco de ensayos que permita emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico, para el rango de velocidades de viento especificadas, sean lo más acordes a aquellos obtenidos a través de pruebas en túnel de viento o de campo. Esta posibilidad brinda en principio la ventaja de poder probar el prototipo del sistema de conversión eléctrico sin la necesidad de tener que desarrollar o adquirir un sistema de palas, mecánica completa, torre, montajes, acondicionamientos del lugar, y esperar el tiempo necesario para que se cumplan las condiciones de viento para su ensayo, o tener que recurrir a un túnel de viento, lo cual en una primera etapa de validar especificaciones de desempeño de simulaciones computacionales puede incurrir en elevados costos de implementación y evaluaciones. Por lo tanto, este trabajo busca estandarizar un banco de ensayos del sistema de conversión de la energía eólica de baja potencia, que permita evaluar al sistema completo de conversión de la energía cinética del viento en eléctrica (WECS), conformado por el generador eléctrico, prototipos electrónicos o del tipo comerciales de electrónica de potencia y su control (Bufanio et al., 2022). Por otro lado, tratando que su funcionalidad brinde flexibilidad en el cambio de las variables de salida

aerodinámicas de un rotor de palas, y propicie la mejor adopción según desempeños obtenidos entre sistema aerodinámico/mecánico y el eléctrico.

La energía eólica, en especial la de baja potencia, interrelaciona a un gran número de disciplinas de la ingeniería, lo cual lleva al correspondiente estudio bibliográfico que va de lo general a lo particular de este trabajo. Por lo tanto, se comienza analizando las recomendaciones de seguridad y diseño que se determinan para aerogeneradores de baja potencia, y por otro lado los fundamentos tecnológicos que la rigen, aquí se utilizan dos referencias, la (Wood, 2011) que trata dichos fundamentos, y la (IEC-61400-2 Ed.3. 2013) como la normativa que regula las condiciones de diseño y seguridad. Luego, con el objetivo de comprender los conceptos que establecen las pautas para las especificaciones de evaluación y ensayo, la (Enevoldsen, 2015) que brinda detalles de documentación y certificación para con un generador eólico de baja potencia. Así mismo para poder incursionar en el control de potencia, la (Refan y Hangan 2012; Liu y Janajreh, 2012) brindan conceptos aerodinámicos, opciones de mejora y validación de la teoría de (BEM – Teoría del Elemento de Pala). En los tratados (Burton et al., 2011; Schaffarczyk, 2014; Hansen, 2015), se encuentran los conceptos fundamentales sobre las características y comportamientos estacionarios y dinámicos de los rotores de palas que permiten un mejor entendimiento de las condiciones a emular.

Para lograr establecer opciones de mejora, se estudian algunos métodos de ensayo de aerogeneradores de baja potencia que utilizan banco de emulación (WTE – del inglés Emulador de Turbina Eólica) destinados a la generación distribuida. Por ejemplo la (Jiawei, 2012), detalla un análisis, y demuestra experimentalmente la necesidad de aplicar un algoritmo al sistema de emulación que tenga en cuenta la dinámica de la turbina eólica en lugar de solo la estática, demostrando que con el tratamiento estacionario no se logra visualizar adecuadamente los transitorios reales debido principalmente a la diferencia en los momentos de inercia que se obtienen con un controlador de frecuencia/velocidad y máquina de inducción o sincrónica, mucho menores, respecto al de una turbina eólica real. En (Phlearn y Yuttana, 3013; Bufanio et al. 2019) se simulan a través de Simulink/Matlab el comportamiento estático y dinámico de un WECS, en la primera sin desarrollar la parte de conversión y control eléctrico y en la segunda con detalle de dicho esquema y su control inyectando energía a la red trifásica de baja tensión. En (Devbratta y Jiang, 2017) se ha diseñado, construido y evaluado un emulador físico de aerogenerador WTE en un entorno de microrred, con el objetivo principal de investigar la integración y control de coordinación de los sistemas de energía eólica en dicho esquema. Luego (Weijie et al., 2017) investiga y da solución a la problemática de que la inercia de los WTE sea mucho menor que la de los sistemas físicos reales, aportando un esquema de compensación de inercia que replica el comportamiento mecánico "lento" de las turbinas eólicas. Por otro lado, en (Ohyama y Nakashima, 2010) se presenta un emulador de aerogenerador utilizando un algoritmo basado en BEM, la propuesta se basa en un control sobre máquina de inducción, que permite emular un diseño de aerogenerador sin tener que fabricarlo, permitiendo ensayarlo para condiciones arbitrarias de velocidad y perfil del viento. Por último, en (Tammaruckwattana y Ohyama, 2013), como aplicación del emulador, se propone y valida experimentalmente a través de un WTE, una solución a la problemática de sobretensión y velocidad de giro en que podría incurrir un aerogenerador (PMSG – del inglés Generador Sincrónico a Imanes Permanentes) de baja potencia y velocidad variable, cuando es conectado a la red eléctrica. Para lo cual, se desarrolla, implementa y valida, con un emulador el sistema de conversión en tres modos de operación, según diferentes regiones de trabajo y en función de la velocidad del viento.

Este trabajo, a diferencia de los planteados, intenta lograr una mejor prestación del WTE a través de un esquema “modular”, con vista de su aplicación a entornos académicos y a la ampliación de sus capacidades. Se proponen mejoras en el sistema de control, hardware y software, con modificaciones en el manejo de los niveles de consigna, aplicación de los rangos del torque y velocidades reales, y con una interfaz de usuario mejorada. En función de lo cual se organiza de la siguiente manera, en la sección 2 se brinda un breve repaso de los conceptos principales del comportamiento estático y dinámico que deben emularse de una turbina eólica, luego en la sección 3 el modelado y simulación computacional del WTE. La sección 4, con sus subsecciones, trata los avances aplicados al desarrollo experimental del emulador de turbina eólica de baja potencia, luego en la sección 5 la verificación y evaluación de resultados. Por último, en la sección 6 las conclusiones.

COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE LA TURBINA EÓLICA A EMULAR

Para poder garantizar el buen desempeño del emulador es esencial conocer el comportamiento estático y dinámico de la turbina eólica. El comportamiento estático o estacionario se refleja a través de las condiciones de equilibrio, definidas en las especificaciones de desempeño, entre las curvas de torque aerodinámico paramétricas según las velocidades de viento y la electromagnética, respecto ambas de la velocidad de giro de la máquina. En la Figura 1, se grafica una de ellas utilizadas durante el desarrollo de este trabajo.

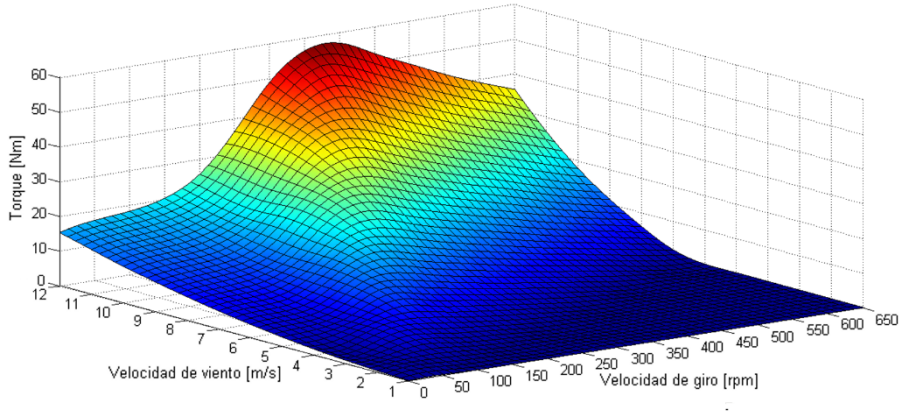
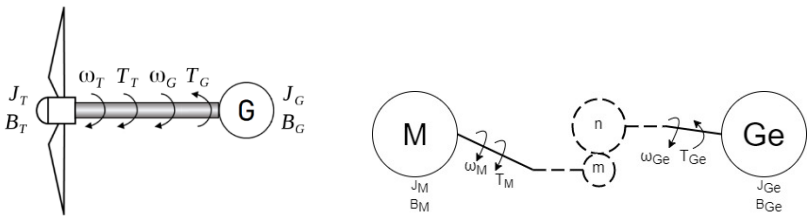


Figura 1: Características de torque para un rotor de perfil NACA 4412.

Las características aerodinámicas del rotor de una turbina pueden ser estudiadas empleando métodos físicos o numéricos, (Sirignano, 2013; Enevoldsen, 2015). Por otro lado, es posible conocida la geometría del o los perfiles alares a lo largo de la envergadura de la pala, aplicar la teoría de BEM, que se basa en una geometría 2D (dos dimensiones) de los diversos perfiles, (Burton et al., 2011). Este método, es el utilizado en este trabajo para obtener las características del rotor de la turbina eólica, dado que, en forma simplificada, pero eficaz, brinda las características aerodinámicas necesarias para un estudio de desempeño del rotor de palas sin la necesidad de poseerlas físicamente. Se observa además que es el ampliamente utilizado en aplicaciones industriales para predicción del comportamiento de un rotor, (Schaffarczyk, 2014). Por otro lado, si bien se trata de una aproximación al comportamiento de una turbina eólica real, se ha demostrado que los resultados de este método se encuentran dentro de un rango aceptable de exactitud, (Refan y Hangan, 2012).

Si bien la teoría de la variación de la cantidad de movimiento del elemento de pala permite establecer el comportamiento de una turbina en términos de torque y velocidad de giro, al implementar el banco de ensayo de emulación propuesto, Figura 2, es necesario considerar las diferencias entre el sistema mecánico de una turbina real y el sistema motor-generador implementado para su emulación, en especial por lo distinto de los momentos de inercia que se imponen entre ambos.



(a) *(b)*

Figura 2: Modelo Mecánico, (a) Turbina Eólica Real, (b) Emulador de Turbina Eólica.

Suponiendo que el eje es infinitamente rígido, de la Figura 2a y a través de la Ec. (1), es posible obtener en forma simplificada la relación entre la diferencia entre el torque ejercido por la turbina y el aplicado al generador.

$$T_T - T_G = J_T \,.\, \dot{\omega}_G \tag{1}$$

Donde:

T_T = Torque de la turbina
T_G = Torque del generador
J_T = Momento de inercia del rotor
$\dot{\omega_G}$ = Aceleración angular

Con mismo criterio, aplicando la misma condición al sistema del emulador, Figura 2b, se obtiene la diferencia entre el torque ejercido por el motor, y el torque efectivamente aplicado al generador.

$$T_M - T_{Ge}.a = J_M \,.\, \dot{\omega_G}/a \tag{2}$$

Donde:

a = m/n, representa la relación de vueltas de polea utilizada.
$T_G = T_{Ge}.a$, y expresando ambas Ecs. (3,4), y luego restándolas, se obtiene por último la Ec. (5).
J_M = Momento de inercia de la máquina asincrónica

$$T_T = J_T \,.\, \dot{\omega}_G + T_G \tag{3}$$

$$T_M = J_M \,.\, \dot{\omega_G}/a + T_{Ge}.a \tag{4}$$

$$T_T - T_M = (J_T - J_M/a) \,.\, \dot{\omega}_G \tag{5}$$

El término de la derecha de la Ec. (5) constituye un "torque de compensación" que puede aplicarse para lograr que el comportamiento dinámico de ambos sistemas sea similar. No obstante, es importante destacar, que el método impone el uso de un derivador dentro del lazo de realimentación, (Weijie et al., 2017), que puede traer aparejado dificultades en la estabilidad del sistema debido al ruido presente en el valor de adquisición de la velocidad de giro. Por otra parte, también aumenta la complejidad de la implementación al tratarse de un cálculo que debe realizarse en tiempo real. En la Figura 3 se muestra un modelo simplificado de lo anteriormente expuesto.

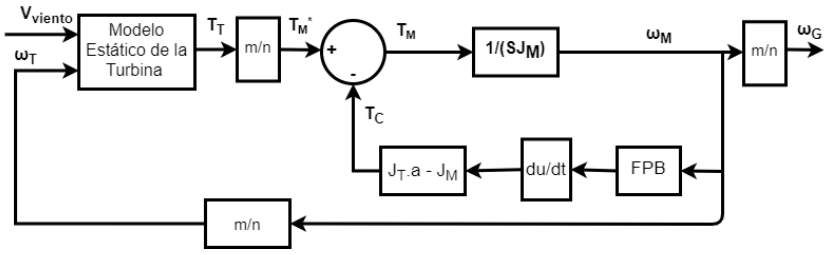


Figura 3: Diagrama de bloques simplificado de control del sistema de emulación de turbina eólica.

MODELADO Y SIMULACIÓN A TRAVÉS DE APLICATIVO INFORMÁTICO

Como se indicó en párrafos anteriores, se modela y simula la estrategia de control a llevar adelante por el prototipo experimental, de manera de tener una herramienta de prueba y comparación lo más cercana posible al banco de trabajo de emulación de turbina eólica. Para ello, se configura un diagrama de bloques de control teniendo en cuenta que se cuenta como dispositivos principales, y se informa más adelante detalle, de un Driver (controlador de torque-velocidad) de 5.5kW, máquina de inducción (asincrónica) de 4kW, y un generador PMSG, de 1kW. Además, con el fin de independizarse de la acción del motor eléctrico una relación de poleas 3:1, lo cual lo hace trabajar cercano a sus condiciones nominales con un bajo deslizamiento.

En la Figura 4, se muestra el esquema de control y potencia simplificado, donde se puede observar dos lazos de control uno interno de torque entre ambas máquinas, análogo al de torque a utilizar en el prototipo, y otro externo de velocidad de giro, a través del cual se implementa la estrategia de generación

PWM para el inversor trifásico, donde se emplea una consigna V/f cte. de manera de mantener flujo óptimo en la máquina de inducción. Por otro lado, se configura una tabla de la respuesta de un rotor de perfil "Clark Y", utilizado como ejemplo en este trabajo y empleado en el aerogenerador comercial EOLOCAL modelo AG1000 (1kW de potencia nominal), a través de la cual, y con ayuda de los lazos de control y potencia, se intenta emular el rotor de dicha turbina.

La máquina de inducción seleccionada es una trifásica típica con rotor a jaula de ardilla, y un PMSG de polos no salientes, 6 pares de polos, con cte. de velocidad 299.28 V_{pico}_Línea / krpm, y cte. de torque 2.475 Nm/A_{pico}, fricción viscosa 0.06 Nm.S, de características similares al empleado en el prototipo experimental, que puede entregar hasta 1.5kW de potencia. Por otro lado, se coloca como carga a la salida del PMSG una del tipo resistiva, configurada en triángulo, de valor 20Ω, potencia nominal de 3kW, mismos valores a utilizar experimentalmente.

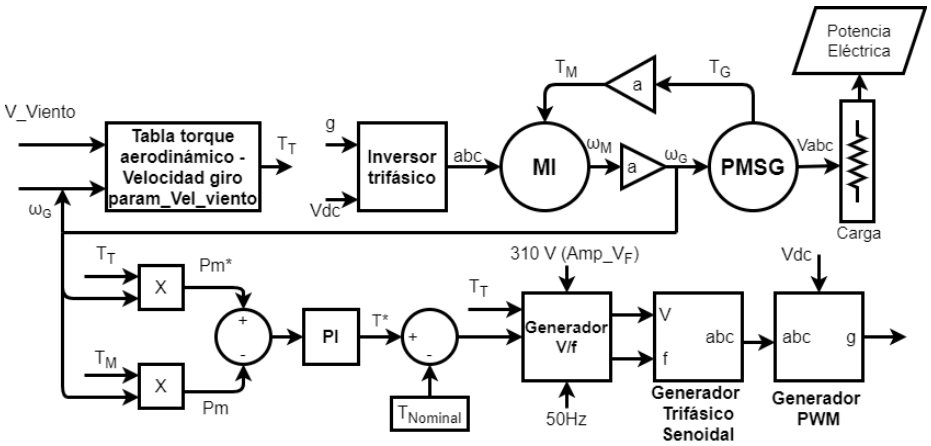


Figura 4: Diagrama de bloques de la implementación computacional del emulador de turbina eólica.

El diagrama de bloques de figura anterior es integrado a través de la herramienta Simulink®. En la Figura 5, se pueden observar sus bloques principales y lazos de control. Luego los resultados de simulación se utilizarán para comparar con los del prototipo propuesto y construido del banco de emulación, y teóricos del rotor de aerogenerador dado como ejemplo de estudio.

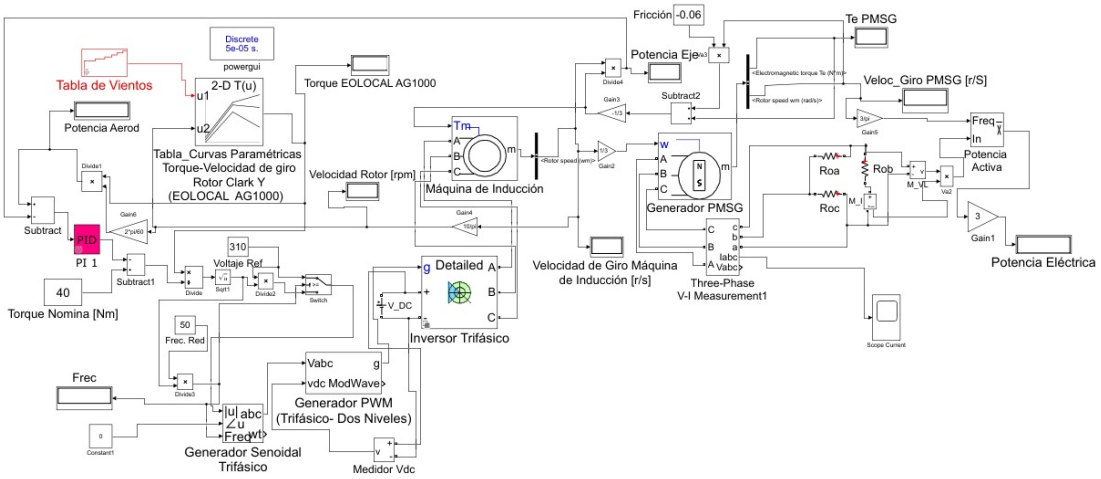


Figura 5: Modelado en herramienta informática de banco de emulación de turbina eólica.

DISEÑO DEL BANCO EMULADOR DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA

En la Figura 6 se representa el sistema implementado para esta propuesta, se utiliza un sensor del tipo incremental para detectar la velocidad de giro del motor, cuyas señales de salida son procesadas a través de un controlador de velocidad de máquina de inducción, o variador de velocidad. El uso de dicho sensor

(encoder) responde a la búsqueda de un control preciso del comportamiento del motor y por ende del generador. El variador, por su parte, tiene la posibilidad de intercambiar consignas con el circuito de control de manera que este último las interprete fácilmente. Además, provee la información de torque, lo cual permite minimizar las desviaciones que podrían ocurrir.

En tanto, el lazo de realimentación se cierra mediante la consigna de torque que el circuito de control aplica al variador. Dentro del circuito de control, también se incluye un conjunto de datos que permiten ejecutar distintos tipos de procesos de simulación con mayor independencia del (PC - computadora personal). Esta a su vez recibe toda la información necesaria mediante un bus USB y ejecuta una interfaz gráfica de usuario creada para seleccionar y ajustar el proceso de simulación, así como para asistir al usuario durante la ejecución.

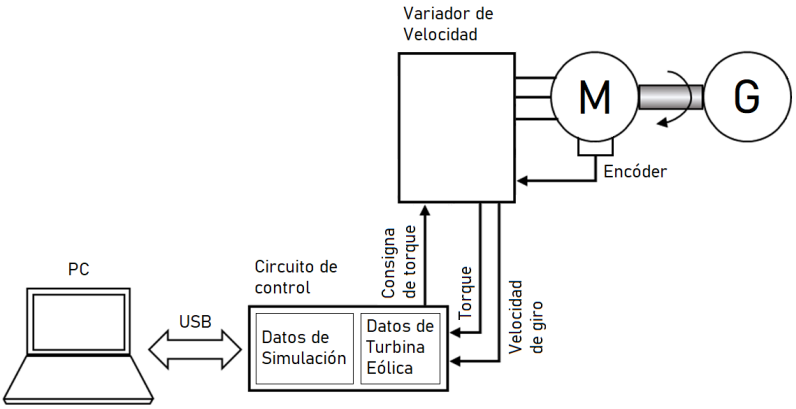


Figura 6: Sistema simplificado implementado para el emulador de turbina eólica.

Para cumplir con el objetivo de modularidad, y que el sistema tenga la suficiente flexibilidad a los cambios, se buscó dar una estructura genérica al protocolo de comunicación entre la PC y el circuito de control, así como al manejo de los niveles de consigna, torque y velocidades de giro reales.

Componentes de hardware principales utilizados

Generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 1 kW, 450 rpm y 6 pares de polos. Esto depende directamente de las características del sistema de conversión de energía eólica que se desee emular, dado el desarrollo actual del mercado en baja potencia, se optó por un PMSG, (Bufanio et al. 2022). Además, el generador utilizado definirá en que rango de potencias y velocidades de giro se va a trabajar.

La máquina de inducción trifásica cumple la función de aplicar el torque y la velocidad de giro apropiadas al generador. Se utilizó una de 4kW, potencia bastante mayor al del generador, para que sea capaz de producir el torque necesario, y no condicionar el desempeño de la emulación.

En cuanto al variador de velocidad encargado de aplicar la regulación de torque, y dada las prestaciones requeridas, se recurrió a la familia Sinamics, del fabricante Siemens, con un módulo de potencia PM240-2 y unidad de control CU250S-2 PN, con panel de operador IOP-2. La versatilidad del sistema para definir el rango de voltajes para la entrada de consigna permite minimizar el requerimiento de hardware intermedio. Por otro lado, se utilizó la funcionalidad del cálculo interno del torque aplicado, este parámetro y la velocidad de giro se disponen en las salidas analógicas de voltaje del controlador de frecuencia. Se seleccionó el control vectorial por torque, ya que posee características dinámicas superadoras, frente a cambios bruscos en la consigna de torque debidos a las variaciones “rápidas” de la velocidad del viento. Por último, como principal, se encuentra un sensor utilizado para detectar la velocidad de giro, modelo 1XP8001-1 del fabricante Siemens, del tipo HTL bipolar de 1024 PPR.

Interfaz de usuario

La interfaz de usuario permite seleccionar y configurar los datos de la turbina y del proceso de simulación, así como iniciar y finalizar las mismas. El objetivo del desarrollo es que la interfaz gráfica permita la configuración de los procesos de simulación de forma ágil y sencilla.

La implementación de la interfaz se desarrolló mediante el lenguaje de programación Python, y a modo de comparación también en C++. En ambos casos, dicho software consta internamente de módulos que agrupan las funciones correspondientes a segmentos del proceso, con la finalidad de agilizar su desarrollo, así como facilitar futuras modificaciones de este.

Los datos del rotor de la turbina a emular se obtuvieron mediante el software libre Q-Blade y luego se exportaron como archivos del tipo csv, siendo a posteriores procesados mediante el código desarrollado y ejecutado en el ordenador. La implementación actual del software automatiza la lectura y procesamiento del archivo csv que contiene los datos del rotor de la turbina a emular. Este procesamiento es el que permite disponer de la característica de la turbina en formato de una matriz de muestras, posibilitando, en los casos que sea necesario, realizar interpolaciones entre estas. En la interfaz de usuario se incluye la configuración de los siguientes parámetros.

- Torque máximo: el máximo valor de torque que debería permitir el sistema de control
- Velocidad máxima: la máxima velocidad angular que debería permitir el sistema de control
- Torque de referencia: valor de torque de referencia para la consigna aplicada
- Velocidad de referencia: valor de velocidad angular de referencia para la realimentación
- Relación de poleas: relación de velocidades entre el motor y el generador
- Momento de inercia: momento de inercia de la turbina que se desea emular

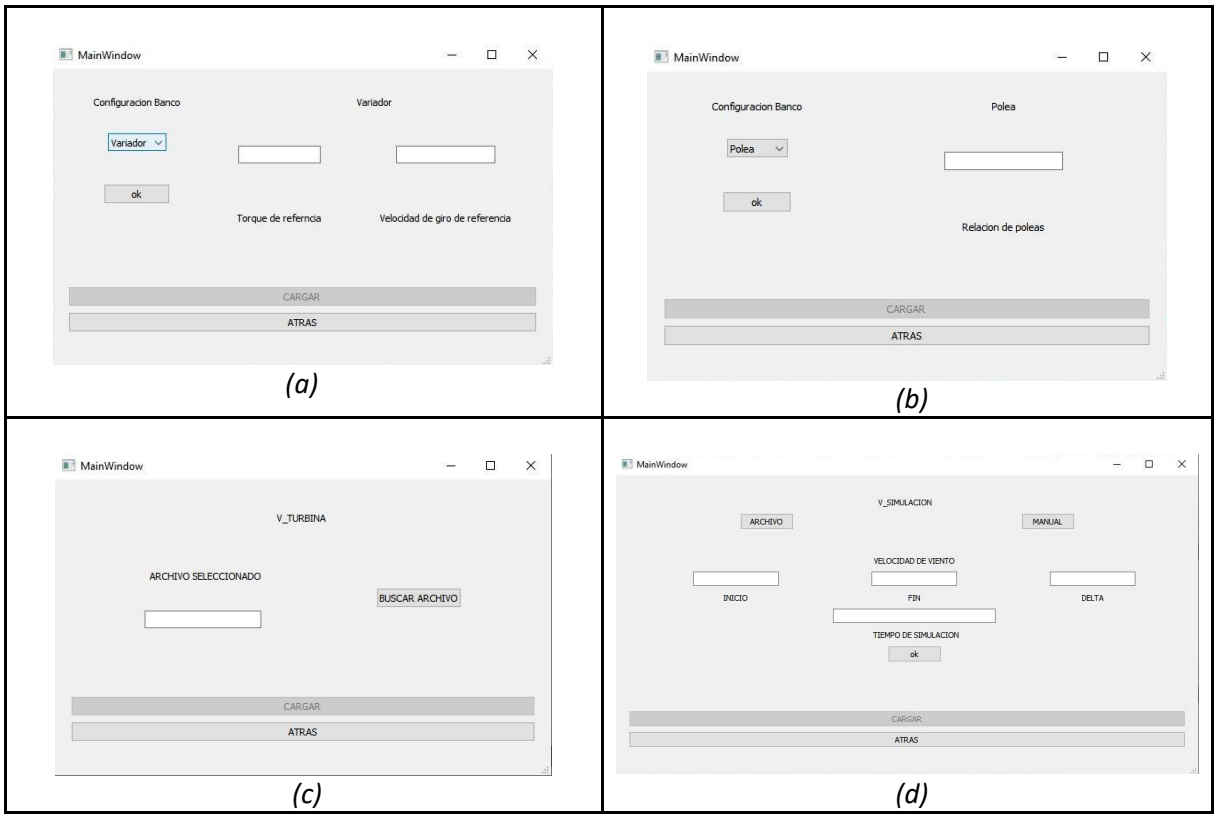


Figura 7: Esquema de interfaces de usuario del desarrollo electrónico propuesto para controlar al emulador, (a) configuración de velocidad y torque, (b) relación de poleas, (c) Carga de datos de turbina eólica, (d) carga de datos de velocidad del viento.

Mientras que los parámetros de referencia son necesarios para la correcta comunicación de las variables, los máximos definen las condiciones límites de operación. En tanto, el momento de inercia se utilizaría en caso de emular las características dinámicas de la turbina. Todos estos parámetros son utilizados para que el circuito de control pueda ejecutar el lazo de control de forma apropiada. En la Figura 7a y 7b, se

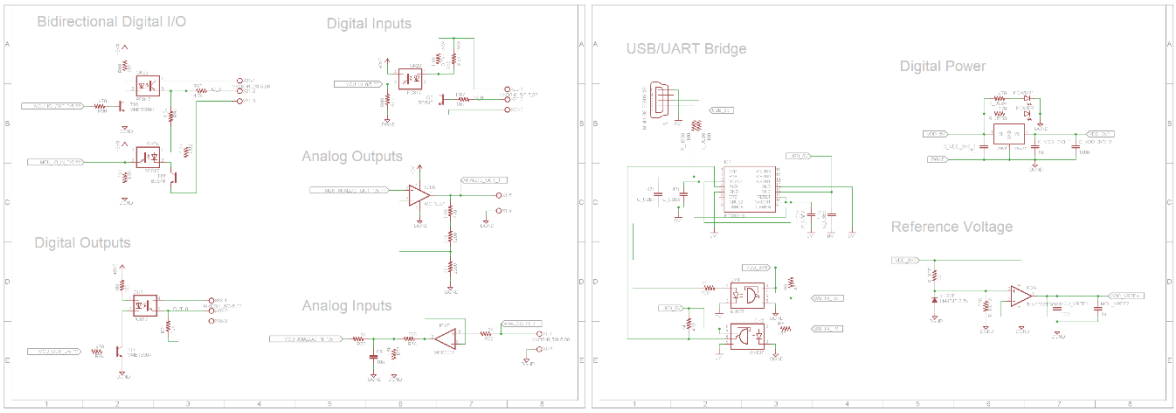
muestran algunas de las pantallas correspondientes al ajuste de los parámetros arriba mencionados. En tanto, en la Figura 7c, se observa la pantalla correspondiente a la carga de los datos de la turbina eólica que se desea emular, que se envían por medio de un bus USB al circuito de control, previo escalamiento acorde a los parámetros ingresados en las anteriores pantallas. Por otro lado, lo propio para los datos de viento que se ingresan de forma similar o manualmente, mediante la pantalla mostrada en la Figura 7d.

Esquema de control y desarrollo electrónico

Las funcionalidades básicas del circuito de control son controlar los procesos de carga de datos, permitir e implementar el algoritmo de trabajo, configurar la simulación y ejecutarla. De forma complementaria, también debe detectar las señales analógicas que indican los valores de torque y velocidad, generar el voltaje analógico de consigna, y comunicarse con el ordenador o PC.

Como elemento central del hardware de control, se utiliza dada su potencial, un microcontrolador del tipo ARM. Sus capacidades analógicas permiten procesar las señales que indican los valores de velocidad de giro y torque, y generar la señal utilizada como consigna.

En la Figura 8 se muestran las distintas partes del hardware de la placa de control que acompañan al microcontrolador. En la parte 8a se puede observar la circuitería de la interfaz entre el microcontrolador y el variador de velocidad, donde los circuitos correspondientes a las entradas y salidas analógicas implementan una adaptación de voltajes, y un filtrado de las señales para minimizar los efectos del ruido y las interferencias. Para el caso de las entradas y salidas digitales, se utiliza un acoplamiento óptico, que facilita adaptar los diferentes voltajes de operación de cada elemento y elimina el riesgo de que un fallo o error de conexión dañe el resto del hardware. Adicionalmente, cuenta con una serie de entradas/salidas digitales bidireccionales con el fin de facilitar futuras implementaciones que las requieran. En tanto, en la Figura 8b se representa el adaptador UART-USB basado en circuito integrado, el cual se incorporó en la misma placa que el microcontrolador. Este circuito permite la comunicación con la PC, el resto de los circuitos corresponden a la alimentación y los voltajes de referencia del microcontrolador.



(a) (b)

Figura 8: Esquema electrónico desarrollado de placa de control del emulador, (a) Interfaz entre microcontrolador y variador de velocidad, (b) adaptador UART-USB basado en circuito integrado.

Características del software desarrollado, comunicación, y algoritmo de control

En base a la estructura de software previamente utilizada y a las características modulares buscadas, se desarrolló una versión adaptada a un microcontrolador de mayor desempeño. Para ello el software contempla una consulta periódica a la PC para verificar la conectividad con la misma, que fue evaluada satisfactoriamente como medida de seguridad para evitar que el operador pierda el control sobre el circuito de control y con ello sobre todo el sistema. Un aspecto importante de este software es que recibe al comienzo del proceso toda la información necesaria para ejecutar la simulación. Por ello, luego de esta comunicación inicial, el control ejecuta la simulación de forma totalmente autónoma, sin requerir ningún tipo de intervención por parte del usuario.

La comunicación entre la PC y el circuito de control tiene dos funcionalidades básicas, llevar a cabo un intercambio confiable de datos, y permitir al ordenador accionar sobre el circuito de control durante el proceso de simulación. Considerando lo anterior, se establecieron tres objetivos principales en su diseño:

1. Resolver la comunicación de los datos en una forma suficientemente genérica, que permita reemplazar el circuito de control, el ordenador o PC, o el software que esta ejecuta.
2. Incluir en el proceso de comunicación, una redundancia suficiente para garantizar la integridad de los datos que se envían desde la PC.
3. Garantizar que la PC mantenga siempre el control sobre el funcionamiento del circuito de control.

Como primera medida, para lograr el principio de modularidad, se utiliza un bus USB para la comunicación. Complementariamente a esto, se estableció un conjunto de comandos y tramas de datos, que define exactamente como enviar y recibir información. En segunda instancia, dentro de las tramas de datos mencionadas, Figura 9, se incorporó el uso de Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC), permitiendo evaluar la fidelidad de los datos recibidos y reenviarlos en caso de ser erróneos, evitando por lo tanto un potencial comportamiento errático del emulador durante la simulación. Por último, se implementa la respuesta a la consulta de conectividad que envía el circuito de control, la misma se realiza durante todo el proceso de simulación y solo ocurre mientras el software de la PC se encuentre funcionando correctamente.

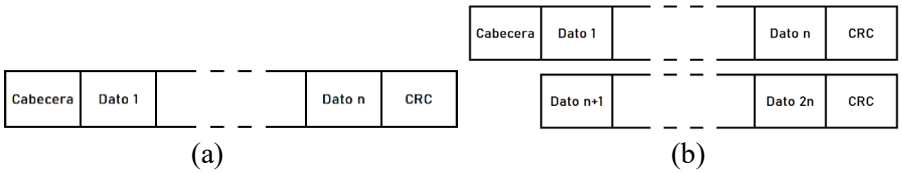


Figura 9: Trama de datos enviados desde la PC al Circuito de Control, (a) modelo de trama de datos, (b) Trama alternativa.

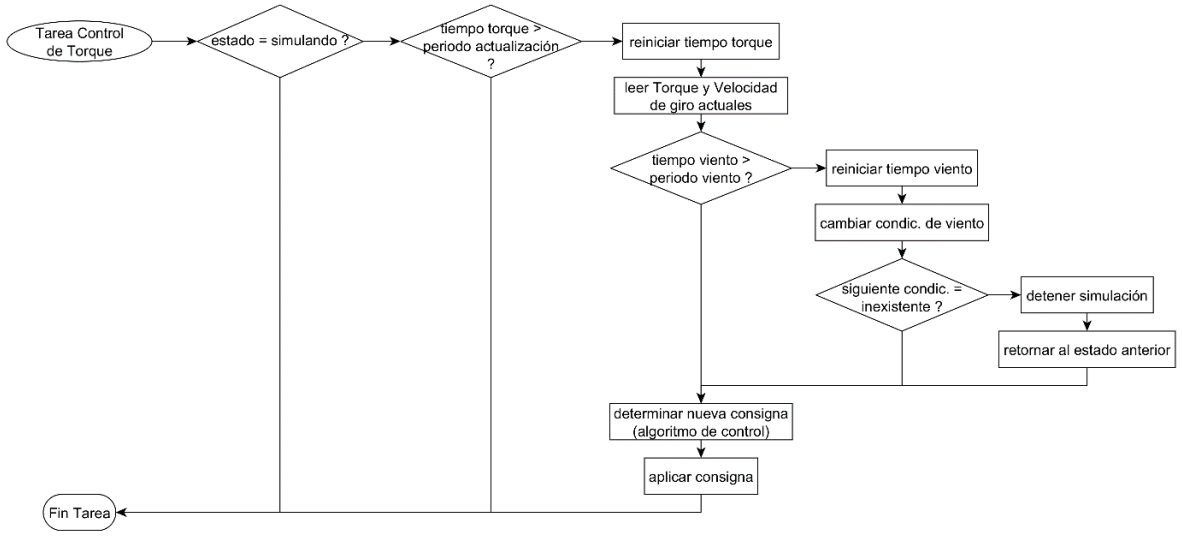


Figura 10: Diagrama de flujo de la tarea de Control por Torque implementado en el software.

El algoritmo de control se ejecuta como una de las tareas del software multitarea, de manera que sea fácilmente modificable. En este caso, se lo implementa para una aproximación gradual al punto de funcionamiento buscado (Torque-Velocidad de giro) de la característica de la turbina a emular, esto a fin de reducir estrés mecánico y acercarse al comportamiento dinámico real. En la Figura 10, se muestra el diagrama de flujo de la tarea de control de torque, encargada de ejecutar el algoritmo de control. En dicho diagrama, tiempo torque y tiempo viento son registros de tiempo que se activan al poner en marcha la simulación. Una importante ventaja de esta implementación es la posibilidad de modificar el método para determinar el nuevo valor de consigna según el algoritmo de control que se desee ejecutar.

DESARROLLO EXPERIMENTAL, ANÁLISIS DE PRIMEROS RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Las pruebas realizadas en el laboratorio de electrónica de la UTN FRN tuvieron como objetivo validar y optimizar el emulador de turbina eólica, para ello se compararon resultados de pruebas experimentales, respecto a simulación computacional y condiciones ideales de equilibrio. Como objetivo anexo, dado los cambios realizados respecto a etapas anteriores, se repitió la evaluación de la confiabilidad del equipo y la funcionalidad de la interfaz de usuario. Durante las pruebas, se utilizó una carga de tipo resistiva trifásica, de unos 20 ohm, conectada en triángulo a la salida del PMSG. Para el análisis del desempeño se midió potencia, voltaje y corriente, y se visualizaron los valores de torque y velocidad de giro mediante un osciloscopio conectado a las salidas analógicas del variador de velocidad, ver figura 11. La medición de los parámetros eléctricos se realizó mediante un hardware dedicado adicional, que se conecta a la salida del generador y entrega la información de potencia por medio de un bus serie.

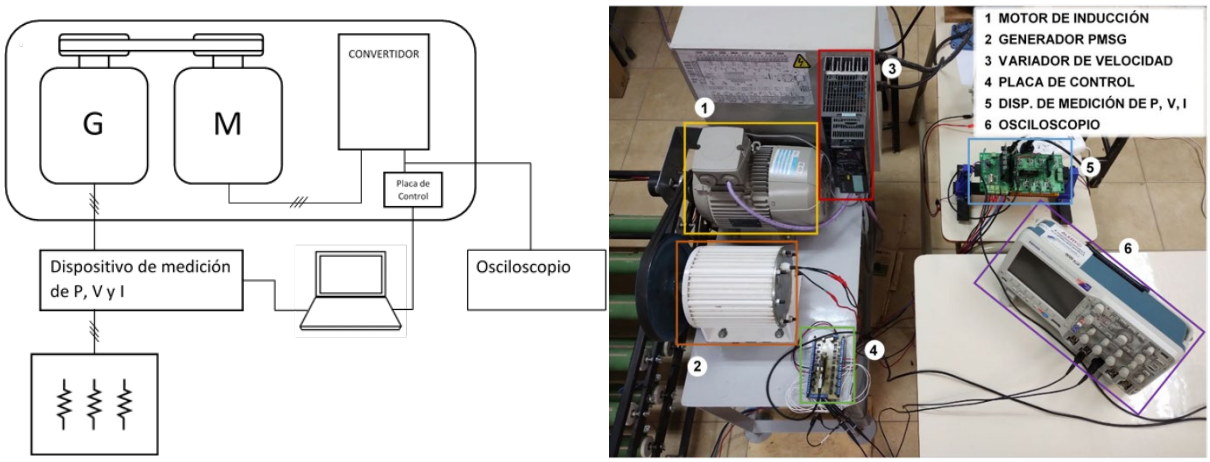


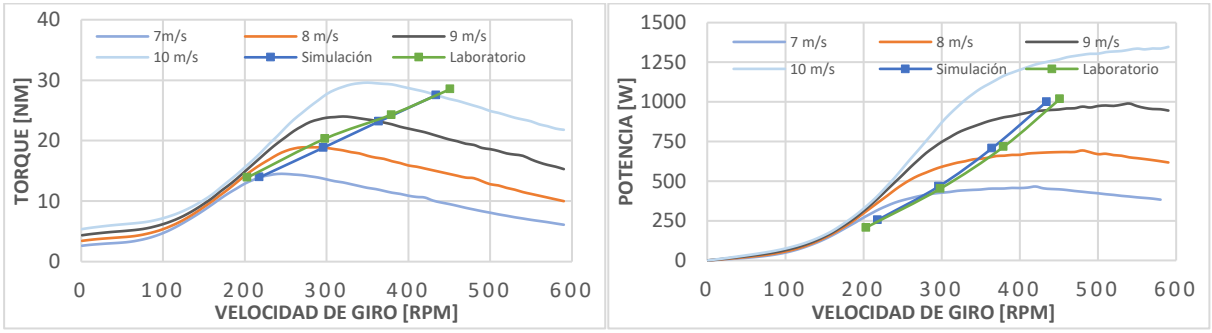
Figura 11: Prototipo experimental del emulador de turbina eólica de baja potencia con la disposición de los elementos utilizados durante las pruebas de laboratorio.

Tabla 1: Resultados estacionarios, simulación computacional, experimental, y referencia de rotor.

Viento [m/s]	*Pot. Salida PMSG Simul. Comp. [W]*	*Pot. Salida PMSG WTE [W]*	*Curva Aerod (Tm*ω) Simul. Comp. [W]*	*Curva Aerod (Tm*ω) Tabla Rotor [W]*	*V. Rotor Tabla [rpm]*	*V. Rotor PMSG Simul. Comp. [rpm]*	*V. Rotor PMSG WTE [rpm]*	*Torque tabla Rotor [Nm]*	*Torque Simul. Comp. [Nm]*	*Torq. WTE [Nm]*
10	*1000*	*1017*	*1252*	*1284*	*430*	*434*	*451*	*27.3*	*27.53*	*28.51*
9	*706*	*716*	*884*	*908*	*360*	*364*	*379*	*23.3*	*23.17*	*24.29*
8	*466*	*452*	*584*	*597*	*300*	*296*	*298*	*18.8*	*18.84*	*20.33*
7	*255*	*207*	*319*	*321*	*220*	*218*	*203*	*14.1*	*13.94*	*13.9*

Las pruebas consistieron en seleccionar, mediante la GUI, distintos valores de velocidad de viento a emular, manteniendo las condiciones de carga. El modelo de aerogenerador utilizado es el del fabricante EOLOCAL, modelo AG1000, de 1 kW. Como ejemplo se recorrieron velocidades de viento entre 7m/s a 10m/s, los resultados se muestran a través de figura 12, a y b, y tabla 1, donde se representaron las curvas características y puntos de equilibrio alcanzados para cada una de las condiciones de viento. Una primera comparación permite ver la correlación esperada entre los valores de torque, potencia y velocidad de giro de cada punto de equilibrio con lo establecido por las características de la turbina. Se pone de manifiesto, que salvo para la velocidad de 7m/s donde debido a que la carga proporciona un equilibrio inestable de referencia, las diferencias entre simulación, prototipo experimental y curvas de referencia son menores al 10%, lo cual valida en principio la propuesta desarrollada. Cabe aclarar que las diferencias entre las potencias de equilibro de curvas aerodinámicas del rotor a emular respecto a las del prototipo experimental y simulación computacional, obedecen a las pérdidas mecánicas (fricción en

transmisión) y eléctricas en PMSG, que va en línea con las que se observa de un aerogenerador de este tipo probado en campo.



(a) (b)

Figura 12: Curvas de desempeño y comparación, (a) Torque vs. RPM, (b) Potencia vs. RPM

CONCLUSIONES

Mediante la configuración desarrollada, se logró en laboratorio condiciones de emulación aceptables del comportamiento aerodinámico del rotor de una turbina eólica de baja potencia de eje horizontal, donde las interfaces entre el variador y el circuito de control sean lo suficientemente genéricas y confiables para alcanzar los objetivos de modularidad y fidelidad.

Se ha garantizado a través de los primeros resultados, y en línea con las referencias citadas, que el emulador posea un margen de exactitud considerado aceptable. Por otro lado, en las pruebas con un perfil de viento real, se demostró la viabilidad de la simulación en dichas condiciones, con la necesaria inserción para ello del cálculo de la compensación dinámica del sistema. Se comprobó que el funcionamiento del equipo y la interfaz de usuario fueron aceptables y la comunicación entre las unidades suficientemente confiables.

En cuanto a trabajos futuros, dado el alcance de los objetivos de modularidad, resulta viable la integración del equipo en un sistema orientado a la evaluación de estrategias de control de velocidad de giro de la turbina, como el utilizado en (Weijie et al., 2017), mismo a ensayos y evaluaciones con sistemas WECS más complejos y reales que los ofrecidos para este alcance con una carga resistiva, tanto en prototipos experimentales como los ya realizados en la UTN FRN para inyectar energía a la red, o comerciales. Esta ampliación en las capacidades del banco de ensayo permitiría, por ejemplo, emular una estrategia de control que implique cambios en el ángulo del paso de pala, que requeriría del desarrollo de un hardware adicional y una nueva interfaz de usuario. Por último, y con más desarrollo, resultaría posible y muy enriquecedor integrar el sistema en una microrred experimental, donde analizar la interacción de esta con una fuente distribuida de generación como la eólica de baja potencia, y estimar por ejemplo los efectos ocasionados por el comportamiento particular (turbulento) del recurso eólico a baja altura y en entornos complejos, como los urbanos, y su capacidad de complementariedad con otras fuentes de origen renovable como la solar fotovoltaica.

REFERENCIAS

Zuñiga C., Bufanio R., Marasco D., Monte G., Scarone N., Agnello A. (2023). Estudio y desarrollo de banco de emulación de turbina eólica de baja potencia. IV Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca.

Bufanio R., Arribas L., de la Cruz J., Karlsson T., Amadío M., Zappa A., Marasco D. (2022). An update on the electronic connection issues of low power SWTs in AC-coupled systems: a review and case study. Energies - MDPI.

Bufanio R. Marasco D., Monte G., Scarone N. (2019). Control de energía eólica PMSG, on-grid, para baja potencia. Programa CYTED – REGEDIS. Jornadas Científico-Técnicas, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín Colombia, 2019. https://cyted.org/REGEDIS.

Wood, D. (2011). Small Wind Turbines: Analysis, Design and Applicatio. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
IEC 61400-2 Ed.3. (2013). Wind Turbines–Part 2: SmallWind Turbines. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland.
Sven W. Enevoldsen. (2015). Small Wind Turbines Engineering. Randers Denmark.
Refan M. and Hangan H. (2012). Aerodynamic Performance of a Small horizontal axis wind turbine. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 134.
Liu Su and Janajreh Isam. (2012). Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines, Springer Open Journal.
Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2011). Wind Energy Handbook, John Wiley and Sons, Ltd.
Schaffarczyk A. (2014). Introduction to Wind Turbine Aerodynamics. 1st Ed, Springer Science & Business Media, pp. 85 – 91.
Hansen Martin. (2015). Aerodynamics of Wind Turbines. 3rd Ed, Earthscan, pp. 38 – 53.
Jiawei Chen, Jie Chen, Chunying Gong and Huizhen Wang. (2012). Design and Analysis of Dynamic Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion System. Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 971 – 977.
Phlearn Jansuya and Yuttana Kumsuwan. (2013). Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle WT Simulator. Energy Procedia 34, pp. 362 – 370.
Bufanio R., Marasco D., Monte G., De Villaflor A., González J., Scarone N., and Bracco R. (2019). Low Power Wind Energy Control "WECS PMSG" On-Grid. Modern Environmental Science and Engineering, Volume 5, Number 6, June 2019.
Devbratta Thakur and Jin Jiang. (2017). Simulator for Integration to a Microgrid with Renewable Energy Source. Electric Power Components and Systems, 45(9):949–963.
Weijie Li, Minghui Yin, Zaiyu Chen and Yun Zou. (2017). "Inertia Compensation Scheme for Wind Turbine Simulator Based on Deviation Mitigation. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, Vol. 5(2), pp. 228 – 238.
Ohyama K. and Nakashima T. (2010). Wind Turbine Emulator Using Wind Turbine Model Based on Blade Element Momentum Theory. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), pp. 762 – 765.
Tammaruckwattana S. and Ohyama K. (2013). Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generation System Using Boost Converter Circuit. Fukuoka Institute of Technology.

VALIDATION AND OPTIMIZATION OF SMALL WIND TURBINE EMULATOR

ABSTRACT: This Work shows the advances and improvements obtained in the development of a small wind horizontal axis wind turbine emulator. The implementation allows us to emulate the main performance variables of a bladed rotor, so that both the torque and rotation speed imposed on the electric generator, depending on the wind, are similar to those that a real rotor develops. Sensibly reducing test times for electrical conversion systems, by being able to recreate various field scenarios, both for systems coupled to the distributed electrical grid and isolated ones. Therefore, the design and implementation process of its control, the tests carried out and the results obtained are described. To do this, according to the imposed specifications, we begin with the concepts associated with computational modeling, then the main aspects of the control hardware and software, the user interface and its characteristics. Subsequently, the details of the construction of the experimental prototype, the obtaining and analysis of results, and the comparison with those of computational modeling. The potential benefits that the system can bring both in academia and in industry are highlighted. Finally, as future work, improvement options are proposed.

Keywords: Emulator, Wind Energy, Small Wind, Control

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 174-183, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

MEDIDORES INTELIGENTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA USUARIOS RESIDENCIALES: HACIA UN RÉGIMEN PERSONALIZADO DE USO, CONSUMO Y TARIFAS

Franco-David Hessling-Herrera[1], Carlos Alberto Cadena[1]
[1]INENCO – (UNSa – CONICET) – Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150, C.P. 4400. Salta, Argentina.
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387- 4255389 – Email: hesslingherrerafranco@hum.unsa.edu.ar

RESUMEN: El trabajo persigue el objetivo de analizar el uso de medidores inteligentes de energía eléctrica en usuarios residenciales de la provincia de Salta como elemento para prefigurar esquemas tarifarios. Dado que esos instrumentos se dispusieron dentro de un sistema de medición para un proceso de Revisión Tarifaria Integral, sus resultados fueron argumento postrimero de la elaboración de nuevos cuadros tarifarios. Comprendiendo ese proceso a través de una metodología que incorporó tanto análisis documental como entrevistas a interlocutores clave, se concluye que las mediciones realizadas ofrecen muchas incertidumbres que la alejan de la precisión ideal y que podrían planificarse buscando cuadros tarifarios más complejos, como aquellos que incorporan precios de la energía en horas pico y valle.

Palabras clave: tarifas de electricidad, medición de electricidad, consumo de electricidad.

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2020 que el Ente Regulador de los Servicios Públicos de Salta (ENRESP) asumió la compra de medidores inteligentes para la energía eléctrica. Esas primeras adquisiciones se constituyeron como el puntapié inicial para emprender una primera experiencia en Salta en la aplicación de ese tipo de tecnologías a sistemas de medición acerca del uso y consumo de energía por parte de usuarios finales residenciales.

Luego, a partir de la Res. 40/2021 (Secretaría de Energía del Gobierno de la Nación Argentina, 2021) el organismo público provincial se resolvió a guarirse definitivamente de una dotación significativa de medidores inteligentes que le permitiera planificar mediciones domiciliarias. Tal resolución de la Secretaría de Energía de la Nación, dada a conocer el 22 de enero de 2021 -probablemente el primer instrumento público en el que se habló de clasificar a los usuarios a partir de sus "características socioeconómicas"-, creaba un régimen para regularizar las deudas de las distribuidoras con CAMMESA y las otras compañías del MEM (Mercado Eléctrico Mayorista).

Dado el monto de aquellas deudas, se creó un régimen para que aquellos pasivos se convirtiesen en obligaciones de inversión para las empresas distribuidoras. Esas obligaciones debían motorizarse a través de créditos de las distribuidoras para las provincias y comunidades. En Salta en particular tales créditos recayeron en las arcas del ENRESP, tal cual apuntó en una entrevista semiestructurada un funcionario de alto rango del organismo regulador. La Res. 40/2021 de la Secretaría de Energía de la Nación planteaba tres líneas para esos créditos:

> i. Beneficios a usuarios del servicio público de electricidad;
> ii. Aplicación a la cancelación de deudas contraídas con CAMMESA;
> iii. Inversión en obras de infraestructura, eficiencia energética o incorporación de tecnología en el servicio que permitan la mejora de la calidad del mismo en determinados puntos de la red de distribución, o la ampliación de dicha red. (Res. Sec. de Energía de la Nación 40/2021, artículo 4).

En Salta, el ENRESP resolvió derivar esos créditos en la primera línea, admitiendo la licuación y financiamiento para deudas de usuarios finales de la energía eléctrica, y la tercera línea, en particular dentro de la "incorporación de tecnología". En esta segunda línea es que se invirtió en dos tipos de medidores inteligentes de energía eléctrica (transducen tensión -en voltios- y corriente -en amperes-) sobre los que luego se expondrá con mayor detalle. Para que quede claro: los medidores inteligentes consideran los fenómenos físicos del diferencial de potencia y la intensidad de la corriente, datos que se añaden al ya medido —para la tarificación— del consumo de energía en kWh.

Dichos medidores inteligentes se emplearon para encarar el proceso de Revisión Tarifaria Integral (RTI) de la energía eléctrica que se inició a principios de 2022 y que ameritó el tiempo mínimo de medición para una muestra temporalmente no sólo exacta sino también precisa: un año completo, abarcando todos los meses y todas las estaciones climáticas. El sistema de medición comprendió la instalación en distintos puntos de la provincia de 1905 medidores, monofásicos y trifásicos, de marca "Inhemeter", todos con manejo de datos de modo remoto y prestaciones que todavía no se han utilizado, como programaciones prepago y pospago para regular el flujo de energía.

En este trabajo se presenta una breve fundamentación sobre el contexto en el que se inscribió esta medición de energía eléctrica en Salta y algunas problematizaciones necesarias para abordar el asunto en su justa complejidad: de modo multidimensional y multidisciplinariamente. Se emprende esa labor descriptiva y analítica persiguiendo los objetivos de escudriñar el aprovechamiento que se ha hecho de los medidores inteligentes, evaluar las ventajas y desventajas del sistema de medición empleado, y determinar de qué modo los resultados de ese sistema sirven para determinar cuadros tarifarios del servicio de electricidad en Salta.

En el siguiente apartado, Fundamentación teórica, se presentan aspectos sobresalientes y debates actuales al respecto de los sistemas tecnológicos de energía eléctrica y su relación con la tecnología inteligente y el internet de las cosas. En el pasaje final de esa Fundamentación teórica se retoma el vínculo de ese trasfondo conceptual con el caso de medición inteligente emprendido en Salta. En la Metodología se explicita el enfoque epistemológico y también las técnicas de recolección y análisis de información, adoptando una metodología etnográfica. Los resultados se organizan describiendo el sistema de medición empleado en Salta en sus aspectos técnicos y en sus aspectos socio-políticos. Se reservan las Conclusiones para redondear el artículo de modo propositivo: proyectando usos factibles en el corto plazo para una ciudad como Salta.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

De un tiempo a esta parte, el problema de los sistemas tecnológicos de la energía eléctrica (Hughes, 1983) ha recobrado importancia. No únicamente porque se las haya asumido como servicios públicos o de interés público (Hessling Herrera et al., 2023), ni siquiera porque se hayan asumido como infraestructuras críticas (Graham, 2009; Pléta et al., 2018). Los sistemas tecnológicos de la energía eléctrica han recobrado importancia por el potencial tecnológico que se avizora a través de los desarrollos en varios rubros, desde comunicacionales y computacionales hasta químicos e ingenieriles. Los desarrollos tecnológicos en general, que van a velocidades cada vez más raudas, han empujado la discusión acerca de sistemas de energía eléctrica a horizontes como las "*smart-grids*/redes inteligentes" (Guicharrouse, 2021).

En rigor, el camino argumental sobre cambios al modelo unidireccional y centralizado de la mayoría de los sistemas tecnológicos de electricidad no se inauguró con el horizonte conceptual abierto por las *smart-grids*. De hecho, la noción de *smart-grids* no es la más reciente propuesta conceptual sobre los sistemas tecnológicos de energía que se avizoran para un futuro próximo. Entre los antecedentes conceptuales de la idea de "redes inteligentes" se encuentra la generación distribuida, la autogeneración, los usuarios-productores de energía, las microrredes y los subsistemas aislados en modo isla (Fang et al., 2012).

En el campo teórico, los conceptos más recientes en torno a los sistemas tecnológicos de energía, aquellos que vinieron luego de que se instalara la idea de redes inteligentes, tienden a converger en la

idea de “energy internet/internet de la energía”, que asume ya no sólo la implementación de tecnología inteligente, de manejo remoto y programado en lenguaje informático, sino además las posibilidades que ofrece “internet de las cosas” -IoT por sus siglas en inglés- (Joseph y Balachandra, 2020). El internet de la energía prefigura sistemas donde se integra tecnología comunicacional y computacional en todas las actividades (generación, transporte y distribución), convirtiendo a los sistemas flexibles y homólogos a la lógica de operatividad de la red internet. De allí que se tomen las nociones de *Energy router*, *Smart transformer* o *Power router*, entre varias otras (Ma et al., 2018). Los sistemas tecnológicos que se proyectan se definen como “flexibles, resilientes, estables y confiables”, destacando que los actuales sistemas son estables y confiables, pero carecen de resiliencia y flexibilidad técnicas.

Las redes inteligentes que involucran internet de la energía proponen sistemas dinámicos con flujos de potencia bidireccionales, comandos remotos y teledirigidos, y operatividad en tiempo real en todos los ramales de la interconexión. Para ello, la ardua tarea de reintegrar actividades desintegradas (generación, transporte y distribución), sólo es posible ampliado el empleo de convertidores de estado sólido, dispositivos con predominancia de carburo de silicio (SiC), fundamental para la protección contra sobretensiones.

Al fin de cuentas, aquello que se presenta como los sistemas tecnológicos del futuro para el campo eléctrico se configura como una madeja hiperconectada. Un sistema complejo de interconexiones simultáneas y de grandísima magnitud de flujos de datos.

> Las características preliminares que las redes eléctricas podrían requerir en el futuro son: un sector de Distribución flexible, resiliente, estable y confiable, que permita la interconexión de nuevos actores a distinto nivel y de forma distribuida, y con flujos de potencia bidireccionales; un sector de Transmisión también flexible, que permita la integración de nuevos medios de generación, en corriente continua o alterna, y almacenamiento energético a gran escala; finalmente, un sector de Generación que disminuya el uso de combustibles fósiles. Con lo anterior, es posible prever que la exclusividad en la operación de cada sector en el sistema eléctrico necesariamente tendrá que abrirse a incluir nuevos participantes, tanto desde un punto de vista económico como técnico. (Guicharrouse, 2021, p. 404).

Así, las redes inteligentes que se proyectan deben proponerse flexibles no sólo en términos técnicos, sino también sociales, económicos y políticos. Empezando por asumir la importancia de las experiencias situadas que puedan tomarse como referencia comparable para planificaciones energéticas a gran escala. En ese sentido, cobran relevancia las experiencias de redes inteligentes que ya se desplegaron en algunos lugares de Latinoamérica.

Por sólo citar algunos trabajos, en México, León-Trigo et al. (2019) realizan una estimación del potencial de las *micro-grids* de generación distribuida y de su integración a redes inteligentes alimentadas a través de energía solar fotovoltaica. Concluyen que, en principio, conviene la instalación de micro redes aisladas, con generación a través de fuentes renovables, en lugares de difícil acceso a la red convencional. En Argentina, la experiencia en la ciudad de Gral. San Martín, provincia de Mendoza, ha sido comentada por Mercado et al. (2015) en su fase embrionaria, demostrando la factibilidad teórica de proyectar en un país de la región una *smart-grid* que alcance a 5000 usuarios finales de electricidad, tanto comerciales, como industriales y residenciales. La factibilidad de las redes inteligentes está probada, la estabilidad y confiabilidad están en pleno desarrollo y el advenimiento de estos sistemas con internet de la energía será inevitable más temprano que tarde.

En ese marco, la medición inteligente se presenta como una fase exploratoria, parte de los estudios preliminares para planificar postrimeras redes inteligentes. Más aún cuando se trata de mediciones recortadas por una muestra reducida sobre el universo total de consumidores finales de la energía. En el caso del sistema de medición que se toma para este artículo, se trató de 1905 transductores instalados en usuarios finales de Salta, una jurisdicción donde sólo el mercado concentrado cuenta con 379.881 usuarios (Res. ENRESP 1219/23).

En principio, entonces, ante un sistema de medición a través del recorte de una muestra, será necesario una ajustada selección para que la muestra sea representativa, aunque en cifras relativas sea una muestra insignificante (0,5% del universo total para el caso de análisis de este artículo). Una muestra tan pequeña tiene que ser celosamente diagramada en términos cualitativos para abarcar la diversidad de usuarios tal cual se presentan en el universo censal completo de los usuarios finales de una red eléctrica. Asimismo, esa muestra debe contemplar la estacionalidad y las temperaturas promedio de cada lugar, las que, al variar, hacen elásticos también los niveles de demanda de energía.

Los sistemas de medición, sin embargo, deben ir ampliándose al salir de fases exploratorias y entrar en etapas de planificación de redes inteligentes. Las mediciones del universo total de usuarios finales de la electricidad será la única manera de proyectar en el futuro redes inteligentes con internet de la energía y modelos dinámicos, con flexibilidad, resiliencia, estabilidad y funcionamiento fiable.

METODOLOGÍA

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo. No debe confundirse el hecho de que se analizan mediciones y errores posibles en esos sistemas de medición -por lo tanto, datos cuantitativos y planteos de lógica deductiva- con el enfoque epistemológico de este artículo. Se toman datos cuantitativos, pero el enfoque epistemológico es cualitativo. Esta monografía tiene una mirada inductiva y hermenéutica sobre los procesos de conocimiento, aunque no niega en absoluto el valor de incorporar en el análisis elementos cuantitativos y deductivos.

De igual manera conviene aclarar que el enfoque cualitativo de la metodología no implica resignarse a que el valor de esta monografía sólo se reduzca a objetivos de comprensión. Además de comprender y analizar la política de medición y su empleo en la RTI, este trabajo persigue el propósito de servir como insumo para ajustar futuras regulaciones y evaluaciones de la calidad del servicio eléctrico.

Así, la metodología se inscribe dentro de lo que la investigadora argentina Rosana Guber (2012; 2013) ha definido como “articulación etnográfica”. Esa metodología ensambla tres dimensiones de investigación: el trabajo de campo -donde son relevantes las técnicas de recolección y sistematización de información-, la reflexividad -donde son relevantes las técnicas de análisis de información- y la textualización -en este caso, la presentación de esta versión final del texto monográfico-.

En referencia a las técnicas de recolección y sistematización de información hay que señalar principalmente los repositorios digitales de normativa oficial, los sitios web de la compañía fabricante de los medidores inteligentes y las publicaciones periodísticas sobre el tema. Cruzando esas tres fuentes de información documental se pudo reconstruir una cronología de cómo se fue planificando, adquiriendo, instalando y poniendo en marcha los medidores inteligentes para usuarios residenciales. Se complementó esa información documental con entrevistas semiestructuradas a interlocutores clave, como el director del ENRESP, otros funcionarios del organismo de control y algunos puestos gerenciales de la compañía distribuidora de la electricidad, EDESA.

Con relación a las técnicas de análisis de la información hay que subrayar que se organizó la labor en dos grandes aspectos. Por una parte, se describieron exhaustivamente los aspectos técnicos de los aparatos inteligentes tanto como del sistema de instalación y medición en general que el ENRESP determinó en coordinación con la Fundación de la Universidad Nacional de San Juan y expertos del Instituto de Energía Eléctrica (IEE). Por otra parte, se consideraron los datos difundidos de la RTI, tanto a través de la documentación oficial de las regulaciones como por los testimonios recogidos en entrevistas semiestructuradas.

RESULTADOS

Tal como se ha anticipado, a partir de la información recogida y analizada, los resultados del trabajo de análisis y evaluación pueden sintetizarse en dos grandes áreas. Por una parte, aquellas cuestiones que hacen a la dimensión técnica, dentro de la cual se consideran aspectos de los instrumentos de medición específicos y del sistema que se planificó para realizar la medición.

La segunda área cubre los aspectos socio-políticos de la política de medición y RTI de la energía eléctrica, donde intervienen actores estatales como el ENRESP, asesores externos especializados, como los expertos del IEE, actores privados como la empresa EDESA-ESED y los desarrolladores de medidores inteligentes, y actores gubernamentales, como la Secretaría de Energía de la Nación.

Sin embargo, antes de adentrarse específicamente en cada una de esas áreas de análisis, conviene una breve contextualización al respecto de la implementación del sistema de medición inteligente de energía eléctrica que se empleó en usuarios residenciales de Salta durante 2022-2023.

Contextualización

El servicio de electricidad en la provincia de Salta se inscribe dentro del régimen establecido en 1992 mediante la Ley Nacional 24.065: la distribución de energía es provincial y el poder de control y fiscalización está en manos del ente provincial, conocido como Ente Regulador de los Servicios Públicos (ENRESP). Por determinación del gobierno provincial en 1996, el esquema de distribución de electricidad está concesionado a dos empresas privadas: EDESA (para el mercado concentrado) y ESED (para los mercados dispersos). EDESA y ESED pertenecen a un mismo holding de capitales, la firma DASA.

Por razones técnicas, puesto que en el país hay un único sistema interconectado de transporte y distribución de energía conocido como SADI (Sistema Argentino de Interconexión), la distribución de electricidad resulta, en términos económicos, un "monopolio natural" con demanda cautiva e inelástica. El control y la fiscalización, con poder de policía y facultades hasta para multar y también administrar subsidios, recae en el ENRESP que se creó igualmente en 1996 mediante la misma ley que concesionaba el monopolio de la distribución de electricidad a EDESA-ESED. Dicha concesión se estableció por un plazo de 50 años, escalonado en tres etapas (20 años-15-15), a través de las cuales se somete a evaluación la calidad del servicio y las condiciones del contrato sólo 2 veces en medio siglo.

Para evaluar la calidad del servicio ofrecido por EDESA-ESED se toman en cuenta, fundamentalmente, dos indicadores configurados a nivel nacional, por lo que en otros países incluso dentro de la propia Sudamérica, no hay estándares establecidos que se acepten de modo unánime sobre cómo implementarlos. Pese a ello, los dos indicadores que se emplean en Argentina son también utilizados en otros países de la región, como Colombia y Chile, y están considerados como los más relevantes a nivel internacional. Se trata de los indicadores SAIDI y el SAIFI.

El SAIDI mide la duración total de las "incidencias" durante un determinado período (suma total del tiempo de cortes o suspensiones del servicio), mientras que le SAIFI calcula la frecuencia con las que se presentaron "incidencias" (cada cuanto hubo cortes o suspensiones del servicio).

Como parte de los estudios ampliatorios para esa evaluación de calidad y comportamiento, el ENRESP asumió desde 2020 la adquisición de medidores inteligentes marca "Inhemeter", mono y trifásicos, con prestaciones orientadas a la medición directa e indirecta de tensión y corriente eléctricas.

Ya en 2022, con la instalación de 1905 medidores inteligentes en domicilios de usuarios residenciales de la energía eléctrica de toda la provincia, el ENRESP propuso que esas estimaciones se considerasen dentro de la Revisión Tarifaria Integral (RTI). La RTI se hace obligatoriamente cada 5 años y está pautada por el mismo marco legislativo que se referenció párrafos arriba.

Para operar los medidores y tabular, sistematizar y depurar los datos, el ENRESP contrató a la Fundación de la Universidad de San Juan, específicamente a expertos del IEE del CONICET. Los resultados del proceso íntegro de RTI, donde se incluyen como un elemento más las mediciones de los medidores inteligentes Inhemeter, se conocieron en una audiencia pública no vinculante que se realizó en agosto del año pasado. A través de la Res. 1219/23 del ENRESP se informa y da detalles sobre lo expuesto en esa audiencia pública, aunque el informe crudo de la RTI no se encuentra disponible en el sitio web del ente.

El relevamiento tuvo la precaución de cubrir un año entero de mediciones, abarcando así todos los meses y estaciones del año. Se buscó evitar los números sesgados que podrían arrojarse con mediciones situadas exclusivamente en alguna época del año y en algún lugar específico. Los criterios de la muestra censal no fueron suficientemente argumentados en la información transcripta en la Resolución 1219/23, sólo se dejó en claro que la totalidad de los medidores no se instaló en Salta capital, sin especificar con detalle en qué clase de viviendas se colocaron (además de la variación posible por el relieve y clima de una localidad a otra, también hay enormes diferencias entre viviendas de barrios residenciales, privados-cerrados, con soluciones habitacionales de urgencia o barrios de viviendas sociales).

De acuerdo con información suministrada por el director del ENRESP (comunicación personal, julio de 2024), los medidores se distribuyeron en viviendas de "toda la provincia" y sirvieron como primer ensayo en Salta de estas características. Según sus dichos, no hay registros de que se hayan instalado equipos de medición sobre el consumo de electricidad en usuarios residenciales de la provincia de Salta, al menos no a una escala relevante. El funcionario aseguró, entonces, que los resultados plasmados en la última RTI (Res. ENRESP 1219/23) deben ser insumos para corregir aspectos de la política pública sobre el servicio energético, tanto en las condiciones y exigencias de la concesión a EDESA-ESED como así también en las disposiciones regulatorias que impone el ente.

Sobre los aspectos técnicos de la medición

Los medidores que se emplearon son monofásicos y trifásicos. Específicamente, el modelo monofásico integrado es el i210-a0(DDZ1513), que se referencia en la Figura 1. Sus prestaciones son específicas para la medición de energía eléctrica domiciliaria y comercial (usuarios con baja potencia contratada).



Figura 1. Medidor "Inhemeter" i210-a0(DDZ1513).

Este modelo monofásico, como se decía, está diseñado específicamente para mediciones domiciliarias y comerciales de energía eléctrica por lo que, además, añaden la posibilidad de incorporar variables económicas como el comercio de energía (puede incorporar funciones de "pago anticipado" y otras tantas de "pospago"). Permite la gestión y lectura remota de los datos y tiene un diseño modular.

Por otra parte, se utilizaron además medidores trifásicos con sistema prepago integrado. El modelo específico es el i300-b0(DTZ1513), tal como se grafica en la Figura 2. Por sus prestaciones técnicas, este medidor también puede ser empleado para usuarios que demandan mayor potencia, algunos incluso de escala industrial.



Figura 2. Medidor inteligente Inhemeter i300-b0(DTZ1513).

Se trata de transductor multifunción de conexión directa, que cuenta con un módulo de comunicación integrado. También se usa para el cálculo de energía eléctrica. Al igual que el medidor monofásico, éste también puede incorporar aplicaciones de prepago y pospago, aunque se distingue porque amplía su rango de prestaciones en cuanto a puertos o vías para la transmisión de datos.

En lo que respecta al sistema con que se planificó la medición, conforme a lo expresado en la Res. ENRESP 1219/23 y algunas manifestaciones de interlocutores clave, puede asegurarse que se instalaron 1905 medidores, aunque no hay especificidad sobre cuántos fueron de los monofásicos y cuántos de los trifásicos. No se aplicaron a pequeñas industrias ni a usuarios comerciales de baja potencia contratada. Se distribuyeron en la capital provincial y en el interior, aunque no se dejaron claros los criterios técnicos (ambientales, climáticos y de cualquier índole) que orientaron la selección de viviendas que constituyeron la muestra. Además, el sistema se diseñó tomando como espectro de medición un año entero, de tal manera de que se contemplen todas las estaciones climáticas.

Sobre los aspectos socio-políticos de la medición

La RTI se completó, precisamente, cuando se cumplió un año de mediciones con los instrumentos inteligentes, dirigidos exclusivamente a medir la energía eléctrica (tensión y corriente). Esos datos se comenzaron a sistematizar durante el primer semestre de 2023, ya que el mes de corte fue junio, y durante julio de ese mismo año se redondeó la información arrojada por las mediciones.

Durante las primeras semanas de agosto del mismo año se convocó una audiencia pública no vinculante para tratar los resultados de la RTI y prefigurar los cuadros tarifarios, en principio, para los próximos cinco años (tal cual lo que propone la normativa vigente).

El proceso de audiencia pública empieza con la convocatoria, a partir de lo cual se abre un plazo para consultar los documentos técnicos que sedimentan esa instancia, en este caso puntual, la RTI de la que participaron como asesores externos los expertos del IEE de la Universidad Nacional de San Juan. Transcurrido ese plazo para consultar los documentos e inscribirse como partícipes oradores de la audiencia, se fija la fecha exacta. El hecho de que la audiencia tenga carácter “no vinculante” quiere decir que nada de lo que allí se diga o manifieste tiene efectos de obligación ni para el ENRESP ni para las compañías de distribución EDESA-ESED. Es una instancia de mera consulta.

Tras la consustanciación de la audiencia pública no vinculante -que tuvo lugar con una modalidad sincrónica e híbrida-, el ENRESP transcribió tal instancia en la mencionada Res. 1219/23 que se publicó el 31 de agosto del 2023.

La RTI y sus resultados, entonces, han sido expuestos en esa Audiencia Pública y parcialmente quedan reflejados en la mencionada resolución. Sin embargo, en la página oficial del ente ni en el Boletín Oficial de la Provincia se encuentra ese documento íntegro, con todas las precisiones técnicas que se recogieron con el sistema de medición a través de los instrumentos inteligentes que se han comentado en el apartado anterior.

CONCLUSIONES

Como ha quedado claro a lo largo de este trabajo, el proceso de medición emprendido para la RTI del año pasado con medidores inteligentes de energía eléctrica ha estado plagado de incertezas que tanto reducen la precisión como incrementan el margen de error. Los datos que se exponen en la RTI son exactos y rigurosos, mas no precisos.

Por sólo mencionar algunos de los indicios que permiten esa conclusión habría que subrayar el hecho de que la muestra no ha sido comunicada de modo diáfano y que, de acuerdo a los comentarios testimoniales, para crear el recorte de domicilios medidos no se tomaron en cuenta criterios climáticos, térmicos ni mucho menos socio-económicos al respecto de las viviendas y su acceso y uso de electricidad. Tampoco hay pruebas fehacientes de que los medidores hayan sido instalados en toda la provincia, como afirmaron los interlocutores claves que formaron parte de la planificación del sistema de medición.

Para una próxima medición con una cantidad similar de medidores totales sobre el universo completo de usuarios finales de la energía eléctrica, convendrían planificaciones estadísticas trabajadas con mayor detalle para que la muestra pueda servir como proyección inferencial, representativa de todo ese universo. Salta es una provincia con diversidad climatológica, diversidad en el acceso a servicios de energía domiciliario y diversidad de usos domiciliarios de la energía. Como ha revelado la Encuestas Nacional de Gastos de Hogares (INDEC, 2022), la región del NOA es donde menos personas hacen un pleno goce del "derecho a la energía" (Hessling Herrera, 2023, Hessling Herrera et al. 2023). Esto último visto particularmente en la falta de acceso a electrodomésticos para usos domiciliarios de la energía tales como cocinar, climatizar o almacenar alimentos, en los altos valores de las facturas de luz y gas, en los precios de los combustibles líquidos y en las fuentes de energía para esos usos domiciliarios básicos.

Tomando en cuenta exclusivamente las prestaciones de los instrumentos empleados hay que decir que los Inhemeter monofásicos y trifásicos tienen funciones que no se han aprovechado para argumentar decisiones en la RTI. En ese mismo sentido, la posibilidad de establecer prepagos y pospagos para regular a través de los medidores los flujos de energía se constituye como un terreno a explorar si se desacopla la tarifa por kWh en franjas horarias, como podrían ser las horas-pico y horas-valle que se utilizan en otros países —por ejemplo— en varias regiones de España.

Con las referencias de una medición mejor planificada como muestra estadística, los 1905 medidores podrían arrojar indicios sobre las mencionadas franjas horarias, aquellas con mayor demanda y aquellas con menor demanda. Sin embargo, para que se pudiese montar un sistema de facturación homólogo al de algunas regiones de España habría que dotarse de muchos más medidores: los usuarios finales de la distribución oscilan los 400 mil en Salta. Ello representaría una ingente erogación estatal, aunque representaría un certero cambio de paradigma en el modelo de tarificación de la electricidad en Argentina.

Asimismo, las prestaciones de los medidores Inhemeter podrían aprovecharse en campañas de concientización sobre el uso racional de la energía, un aspecto cultural que va en sintonía con los afanes de eficiencia energética. Ello resulta de vital importancia si se adoptan como ciertos los principios de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los que se encuentra el afán por una energía limpia, asequible y segura.

Para finalizar habría que subrayar que las mediciones como insumos de políticas públicas, tal el caso analizado en esta monografía, encierran una serie de elementos coyunturales y contingentes, propios de la dinámica social, que vuelven necesariamente menos precisas las mediciones. Admitir eso no implica resignarse a que las mediciones se plaguen de errores evitables o tergiversaciones elucubradas para manipular la información. Al contrario, en la honestidad intelectual para diseñar, implementar y evaluar sistemas de medición de este tipo radica la posibilidad de proyectar políticas de estado que sobrevivan los avatares en los gobiernos de turno.

Como primer paso para un proyecto de redes inteligentes con internet de la energía, las mediciones inteligentes de la RTI son suficientes. Sin embargo, si se pretende empezar una pronta planificación

hacia sistemas energéticos más eficientes y modernos, habrá que mejorar las mediciones, apresurar las planificaciones e imponer a las empresas del sector inversiones en tecnología de punta para propiciar sistemas no sólo fiables y estables, sino también flexibles y resilientes.

REFERENCIAS

Fang, X., Misra, S., Xue, G. y Yang, D. (2012). Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. En IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 944-980.

Graham, S. (2009). *Disrupted cities: when infrastructures fails*. Routledges, Nueva York y Londres.

Guber, R. (2012). *La etnografía. Método, campo y reflexividad*. Siglo XXI Editores, Buenos Aires.

Guber, R. (2013). *La articulación etnográfica: descubrimiento y trabajo de campo en la investigación de Esther Hermitte*. Editorial Biblos, Buenos Aires.

Guicharrousse, P. (2021). Las redes eléctricas del futuro. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 29, N°3, pp. 402-405.

Hessling Herrera, F.D. (2023). *Genealogía de la pobreza energética y del derecho a la energía: Racionalidad del cálculo, epigrama "desarrollo" y derechos humanos*. Revista De Ciencias Sociales, 36(52), 157-173. https://doi.org/10.26489/rvs.v36i52.7

Hessling Herrera, F.D.; Garrido, S.M. y Gonza, C.N. (2023). Derecho a la energía desde los derechos humanos: transición profunda hacia viviendas adecuadas, un ambiente sano y modos de vida dignos. *Letras Verdes*, N°34, pp.48-65. ISSN 1390-6631. https://doi.org/10.17141/letrasverdes.34.2023.5904

Hughes, T. (1983). *Networks of powers. Electrification in western society, 1880-1930*. John Hopkins University Press, Londres.

INDEC (2022). *Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018. Uso hogareño de la energía*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos. Libro digital. Enlace.

Joseph, A. y Balachandra, P. (2020). Smart grid to energy internet: a systematic review of transitioning electricity systems. En *IEEE Access*, vol. 8.

León-Trigo, L.I., Méndez-Patiño, A., Reyes-Archundia, E., Chávez-Campos, G.M. y Gutiérrez-Gnecchi, J.A. (2019). Smart Grids en México: situación actual, retos y propuesta de implementación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol. XX (núm. 2), pp. 1-12.

Ley Nacional sobre el Régimen de Energía Eléctrica en Argentina N°24.065 (1992). Disponible en: https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=464

Ma, Y. Liu, H., Zhou, X. y Gao, Z. (2018) "An Overview on Energy Router Toward Energy Internet,". *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (ICMA), Changchun, China, pp. 259-263.

Mercado, G., Peña, J. M. D., Stasi, R., López, G., Burlot, A., Vivone, G. C., Arena, A. P. (2015). SG-SM - Smart Grid San Martin: Red de Distribución y Generación de Energía Inteligente en Ciudad Gral. San Martin – Mendoza. Documento de conferencia en UNLP. Disponible en SEDICI (repositorio UNLP): https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/45305/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pléta, T.; Karasov, S. y Jakstas, T. (2018). The means to secure critical energy infrastructure in the context of hybrid warfare: The case of Ukraine, en *Journal of Security and Sustainability Issues*, vol. 7, N° 3. http://doi.org/10.9770/jssi.2018.7.3(16)

Secretaría de Energía del Gobierno de la Nación Argentina. Resolución N°40/2021. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-40-2021-346395/texto [consulta: 15 de octubre de 2024]

SMART ELECTRICITY METERS FOR RESIDENTIAL USERS: TOWARDS A PERSONALIZED REGIME OF USAGE, CONSUMPTION AND TARIFFS

ABSTRACT: The aim of this paper is to analyze the use of smart meters in residential users in the province of Salta as an element to prefigure tariff schemes. Given that these instruments were used within a metering system for a Comprehensive Tariff Review process, their results were a postliminary argument for the elaboration of new tariff charts. Understanding this process through a methodology

that incorporated both documentary analysis and interviews to key interlocutors, it is concluded that the measurements made offer many uncertainties that move them away from the ideal precision and that more complex tariff charts could be planned, such as those that incorporate energy prices in peak and off-peak hours.

Keywords: electricity bills, electricity measurement, electricity consumption

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 184-197, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

USO DEL TERMOSTATO: ESTRATEGIAS PARA EL AHORRO ENERGÉTICO EN VIVIENDAS Y EDIFICIOS

Pablo Romero[1,2], Jorge Fiora[1,2], Cristian Carri[1], Italo Bove[3], Salvador Gil[2]
[1]Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Eficiencia Energética. Buenos Aires, Argentina.
[2]ECyT- Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). San Martín, Buenos Aires, Argentina.
[3]Universidad de la República (Udelar), Fac. de Ingeniería, Laboratorio de Energía Solar. Uruguay.
E-mail: sgil@unsam.edu.ar

RESUMEN: En este estudio se investiga el potencial de ahorro energético en el acondicionamiento térmico de viviendas y edificios mediante el uso eficiente de termostatos para calefacción y refrigeración. Se compara el comportamiento de calefactores convencionales, que funcionan a gas o resistencias eléctricas, con acondicionadores de aire frío/calor (bombas de calor), evaluando los Coeficientes de Performance de equipos disponibles en el mercado argentino. Se concluye que una reducción de 2 °C en la regulación de los termostatos en invierno puede reducir el consumo de calefacción en cerca del 30 %, siendo esta reducción aún más significativa en el caso de las bombas de calor durante el invierno. Por otro lado, durante el verano, un aumento de solo 1 °C en la regulación del termostato puede contribuir a una reducción de aproximadamente el 33 % en el consumo. Además, se muestra que las viviendas equipadas con bombas de calor presentan un consumo de calefacción considerablemente menor en comparación con aquellas que utilizan sistemas a gas natural, con una diferencia de hasta 7 veces en el consumo por metro cuadrado en el Área Metropolitana de Buenos Aires y posiblemente en toda la región centro norte del cono sur.

Palabras clave: eficiencia energética, acondicionamiento térmico edilicio, bombas de calor, acondicionadores de aire frío/calor, termostato, inverter.

INTRODUCCIÓN

Los servicios energéticos desempeñan un papel crucial en el presupuesto de las familias, especialmente aquellas de recursos económicos medios y bajos. Por esta razón, resulta fundamental comprender cómo se utiliza la energía en los hogares, con el fin de gestionarla de manera eficaz y racional. La gestión adecuada de la energía no solo contribuye a evitar sorpresas desagradables al recibir las facturas de electricidad y gas, sino que también promueve un uso más eficiente de los recursos disponibles, una pieza fundamental en la mitigación de emisiones de carbono. En ese sentido, la regulación de las temperaturas de los termostatos de los calefactores y refrigeradores ("*set points*") es una de las acciones más simples, de bajo costo y efectivas para reducir los consumos de energía de una vivienda (USA Department of Egergy, 2024), (Yan et al., 2022), (Prieto y Gil, 2014).

Este trabajo es una extensión de un estudio preliminar elaborado por nuestro equipo de trabajo, que se realizó suponiendo sistemas de calefacción de potencia constante, como lo son calefactores a gas u eléctricos con resistencia (Prieto y Gil, 2014). Sin embargo, con la irrupción masiva de equipos acondicionadores de aire frío/calor (AA_f/c) o bombas de calor, como sistemas de calefacción, aquellos estudios deben ser revisados, ya que una característica distintiva de las bombas de calor (BC) es que su rendimiento o *eficiencia* depende críticamente de la diferencia de temperaturas entre las que opera. Es decir, la diferencia de temperatura, ΔT, entre el interior (T_{int}) y exterior (T_{ext}). El presente estudio se apoya en el análisis de los perfiles térmicos registrados en diversas ciudades de Argentina y en mediciones de los Coeficientes de Performance o rendimiento (COP) de los equipos acondicionadores de aire frío/calor, presentes en el mercado argentino. Con esta información, es posible establecer que en

todos los casos la regulación de la temperatura de los termostatos juega un rol crucial en el consumo, pero con un peso mayor en los AA_f/c. Por último, se discute cómo a través de mediciones de campo, los consumos de calefacción usando AA_f/c son considerablemente menores que en aquellos que usan sistemas convencionales a gas natural o calefactores eléctricos a resistencia. De este modo, estamos en condiciones de evaluar qué sistemas de acondicionamiento térmico, son más eficientes y tienen menor emisiones de carbono en la zona centro norte de Argentina y del cono sur.

En la primera parte de este trabajo, hacemos una breve revisión del concepto de Déficit Grado Día (DGD) y cómo este parámetro se relaciona con la demanda de energía para calefacción, basada en datos de consumos y temperaturas para las principales regiones bioambientales de la región centro-norte de Argentina. Luego discutimos los resultados de nuestras mediciones de la variación de los Coeficientes de Performance de los AA_f/c en función de la diferencia de temperatura ΔT. Con esta información, realizamos un estudio de como varía el consumo de calefacción y refrigeración de las distintas regiones bioambientales de Argentina en función de los valores de ajuste ("*set-points*") de los termostatos.

METODOLOGÍA

Consumo energético residencial y déficit grado día

En el sector residencial argentino, el gas natural (GN) desempeña un papel crucial, utilizándose principalmente para la cocción, la calefacción y el agua caliente sanitaria (ACS). En la zona centro-norte de Argentina, al norte del Río Colorado, no se usa calefacción durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) debido al clima. Esto reduce el consumo de GN únicamente a la cocción y al ACS, lo que se conoce como *consumo base*. Al realizar un análisis *top-down*, fundado en los datos de consumos por región proveniente de datos globales de consumo reales de distintas zonas, como los que publica ENARGAS (2024), se obtiene un gráfico como el mostrado en la Figura 1. En esta figura se muestran los consumos por usuario y por día a lo largo del año. Los datos son de la región AMBA, para los años 2018-2023. Los consumos de los meses de verano determinan los *consumos base*. El incremento de demanda en los meses de invierno corresponde al uso de calefacción, que es del orden del 49 % ± 5 % del total, Figura 1.

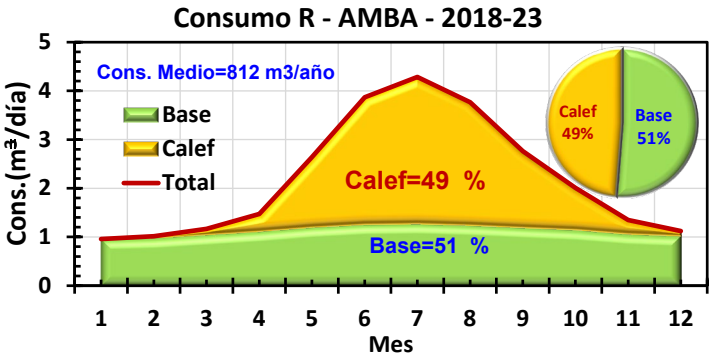


Figura 1: Consumos Residencial diarios promedio de gas natural a lo largo del año. Datos de la región AMBA, para los años 2018-2023 ENARGAS (ENARGAS, 2024).

Según este análisis el consumo medio de calefacción por vivienda en el AMBA es de unos 400 m^3/año de GN, que equivale a unos 4,3 MWh/año. Si tenemos en cuenta que según el INDEC (Indec, 2022) la superficie media de una vivienda familiar en el AMBA es de alrededor de 60 m^2, por lo que el consumo medio de calefacción por m^2, para los usuarios conectados a la red de gas en promedio sería de 72 ± 12 kWh/m^2. En un segundo estudio, *Bottom-Up*, se realizaron auditorías energéticas detalladas de una muestra de varias viviendas de la región. En este segundo análisis (Zavalía Lagos et al., 2023), basado en un relevamiento de campo en 390 viviendas individuales de la región del AMBA se determinó que el consumo de calefacción de viviendas con conexión a la red de gas natural que usaban principalmente calefactores de este combustible para calefacción tenía un valor medio de 83 ± 14 kWh/m^2, consistente con el valor obtenido del análisis global de consumos, indicado previamente (Zavalía Lagos et al., 2022).

La diferencia, puede comprenderse, teniendo en cuenta que algunos usuarios conectados a la red de gas natural no siempre usan el gas como combustible de calefacción, sino electricidad. En los datos de la Figura 1(análisis *Top-Down*) este efecto contribuiría a reducir esta estimación en el consumo de gas en calefacción. Por otro lado, en las mediciones de viviendas individuales relevadas con auditorías energéticas, cuando se reportan los consumos de gas para calefacción (análisis *Bottom-up*), sí estamos seguros de que estas familias efectivamente usan el gas para este servicio. En la región central y norte de Argentina, donde está concentrada más del 85 % de la población de este país, el principal consumo doméstico es el de calefacción, seguido del ACS. Aunque en las viviendas sin acceso a redes de gas natural, esta relación se invierte, siendo el ACS el principal consumo (Zavalía Lagos et al., 2022), (Zavalía Lagos et al., 2023).

Desde luego, la demanda de calefacción está fuertemente asociada a la temperatura y esta depende de los escenarios climáticos de cada región o localidad. (Prieto y Gil, 2014) Más específicamente, el consumo de calefacción depende de la diferencia entre la temperatura media exterior, T_{media_ext} y la temperatura de referencia interior, $T_{ref_invierno}$. Llamaremos Diferencia o Déficit Grado Día (DGD) (Ecuación 1) de un día a esta diferencia ($T_{ref_invierno}$ -T_{media_ext}), siempre que $T_{media_ext} < T_{ref_invierno}$, de lo contrario es cero, es decir:

$$DGD_{día}^{(i)} = \begin{cases} (T_{ref_invierno} - T_{media_{ext}}^{(i)}) \times día; \; si \; T_{ref_inierno} > T_{media_ext}^{(i)} \\ 0 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad ; \; si \; T_{ref_invierno} \leq T_{media_ext}^{(i)} \end{cases} . \tag{1}$$

El DGD de un período dado, $DGD_{(período)}$, será la suma de todos los $DGD_{(día)}$ de todos los días que conforman dicho período. $T_{ref_invierno}$ es aquella temperatura ambiente exterior para la cual no es necesario prender la calefacción dentro de una vivienda. Hay que recordar, también, que por lo general la temperatura interior en invierno es aproximadamente 2 grados superior a la temperatura exterior. Además, varios estudios indican que el consumo de calefacción depende de la *temperatura efectiva* diaria, (Iannelli et al., 2015), (Prieto y Gil, 2014), (Wikipedia, 2024), que se define como el promedio entre la temperatura del día en cuestión y el promedio de la temperatura de los tres días anteriores (todas exteriores). Así, la *temperatura efectiva*, tiene en cuenta la inercia térmica de las viviendas y edificios. En este trabajo, consideramos T_{med} como la *temperatura efectiva* diaria, ya que se correlaciona mejor con el consumo de energía para calefacción. Es de esperar que la *temperatura interior* o de referencia, $T_{ref_invierno}$, sea cercana a la temperatura de confort. De este modo, el consumo anual, destinado a la calefacción dependerá del parámetro:

$$DGD_{(año)} = \sum_{i=1}^{i=365} DGD_{(dia)}^{(i)} = \sum_{i=1}^{i=365} (T_{ref_invieno} - T_{media_ext}^{(i)}) \Big|_{T_{ref_invierno} > T_{media_ext}^{(i)}}, \tag{2}$$

que se define como la Deficiencia o Déficit Grado Día anual ($DGD_{(año)}$ o *Heating Degree Day*) (Ecuación 2) de cada zona, (Wikipedia, 2024). Si se representan las temperaturas efectivas diarias en función del tiempo a lo largo de un año, como se ve en la Figura 2; el valor de $DGD_{(año)}$ viene dado por el área sombreada en azul entre la temperatura de referencia y la curva que describe la temperatura efectiva diaria.

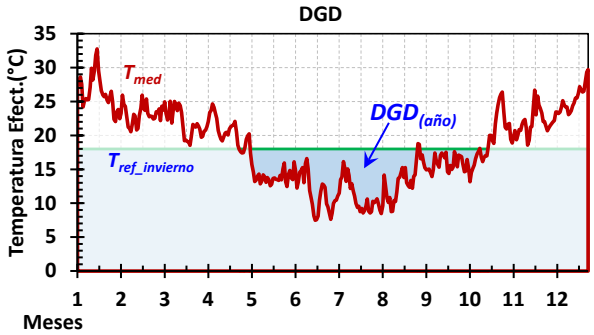


Figura 2: Temperatura efectiva diaria a lo largo de un año, la línea horizontal, representa la temperatura de referencia, $T_{ref_invierno} \approx 18$ °C. El área sombreada (azul) es el valor del $DGD_{(año)}$. Los datos corresponden a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) de 2016.

Asimismo, es posible para cada región definir un DGD para cada mes del año ($DGD_{(mes)}$). De hecho, como las temperaturas medias mensuales varían fuertemente a lo largo del año, como así también los consumos específicos medios de energía (o consumo por usuario) de cada mes, mediante un análisis *top-down* es posible analizar cómo varían los consumos específicos residenciales (o consumo por usuario) con $DGD_{(mes)}$, como se muestra en la Figura 3. Esta figura indica que los consumos asociados a la calefacción son proporcionales al $DGD_{(mes)}$.

En Argentina, la temperatura de referencia usada usualmente es: $T_{ref_invierno} \approx 18$ °C. De igual forma puede mostrarse que los consumos anuales asociados a la calefacción son, asimismo, proporcionales a las $DGD_{(año)}$ (Zavalía Lagos et al., 2022). Esta relación entre consumo y DGD se observa que es válida para todas las ciudades y regiones de Argentina y del mundo (Prieto y Gil, 2013), (Wikipedia, 2024). De este modo, el concepto de Déficit Grado Día (DGD) o *"Heating Degree Day"*, es utilizado frecuentemente para caracterizar las necesidades de calefacción (U.S. Energy Information Administration-DOE, 2024), (Wikipedia, 2024).

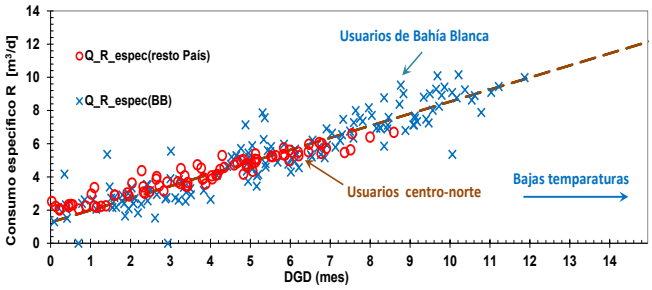


Figura 3: Variación de los consumos específicos R diarios, promediados mensualmente, en función del DGD(mes) con $T_{ref_invirno} \approx 18$ °C. Círculos rojos: zona norte y central de Argentina. Cruces azules: zona de Bahía Blanca.

De manera análoga, se define el Exceso Grado Día ($EGD_{(año)}$ (Ecuación 3) o *Coolling Degree* Day) (US Dept of Commerce, 2024), (Iannelli y Gil, 2022):

$$EGD_{(año)} = \sum_{i=1}^{i=365} \left(T_{media-ext} - T_{ref_Verano}\right)\Big|_{T_{media-ext} > T_{ref_Verano}} \quad , \qquad (3)$$

que permite calcular las necesidades de refrigeración en cada lugar, que resulta proporcional al $EGD_{(año)}$. Sin embargo, el valor de la $T_{ref_invierno}$ (≈ 18 °C) es diferentes de T_{ref_verano} (≈ 25 °C) (Iannelli y Gil, 2022). Desde luego, los consumos de acondicionamiento térmico, además del valor del DGD del lugar, dependen críticamente del diseño de la vivienda, su orientación, y de las características de su envolvente. Todos estos aspectos tienen muchas posibilidades de mejorar (Carrizo et al., 2022).
La Figura 3 da fundamento a la metodología que utilizaremos para correlacionar el consumo de energía en climatización tanto con el DGD como con el EGD de cada lugar.

Acondicionador de aire o bomba de calor
Las bombas de calor (BC) son dispositivos que mueven calor de modo antinatural, es decir de una fuente fría a otra más caliente. Generalmente estos equipos utilizan electricidad para funcionar y mover el calor de abajo (frío) hacia arriba (caliente) de manera análoga a una bomba hidráulica, de aquí el nombre de bombas de calor. Se utilizan para climatizar ambientes o para preservar los alimentos (refrigeradores o neveras). De hecho, la tecnología que un refrigerador o un Acondicionador de Aire (AA) usa, son muy similares. Un AA frío/calor es un ejemplo de bomba de calor.

En el modo calefacción, una BC cumple la misma función que un calefactor. Sin embargo, en lugar de generar calor a través de una combustión o calentar una resistencia, las bombas de calor lo toman de un entorno frío y lo inyectan en una habitación más caliente (Zavalía Lagos et al., 2023), (International Enegy Agency (IEA), 2023). En esta sección se revisan algunas características básicas del funcionamiento de las bombas de calor de uso doméstico.

El compresor es el componente más importante en términos de tamaño, costo y consumo de energía. Los AA más básicos cuentan con un compresor alternativo de velocidad fija que sólo puede funcionar a plena potencia, por lo que deben encenderse y apagarse periódicamente para mantener una temperatura interna determinada. Lo mismo ocurre en un refrigerador (heladera o nevera) convencional. Estos repetidos arranques y paradas causan una penalización en el consumo de energía, que pueden reducir la eficiencia.

Un parámetro muy utilizado para caracterizar la eficiencia de una BC es el coeficiente de desempeño (Ecuación 4) o Coeficiente de Performance (COP), que se define como el calor que produce (o bombea) dividido por la energía eléctrica utilizada para esta acción, o sea:

$$COP = \frac{Q_{Calor}}{W_{elec}}. \quad (4)$$

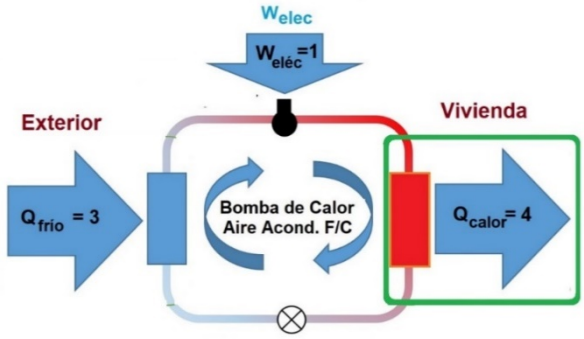


Figura 4: Diagrama esquemático de una bomba de calor (BC) usado en modo de calefacción. Fuente: *(Zavalía Lagos et al., 2023).*

El COP es un parámetro adimensional, fácil de interpretar: un COP de 4 significa que por cada 4 unidades de calor que el equipo entrega, consume 1 unidad de energía eléctrica. En la Figura 4 se ve un ejemplo en donde para generar 4 unidades de calor, se requiere de una unidad de energía eléctrica, o sea la eficacia de esta BC, entendida como una relación de costo-beneficio, es del 400 %.

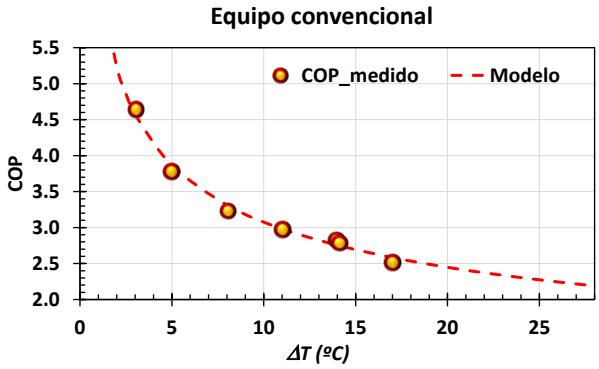


Figura 5: Valores medidos del COP de un AA convencional del mercado argentino en función de la diferencia de temperatura ΔT entre el exterior e interior (símbolos circulares rojos). La curva punteada en rojo es una parametrización que describe la variación del COP con ΔT.

Es usual determinar el COP utilizando un salto térmico ΔT = 13 °C. Sin embargo, el COP de cualquier BC varía en forma muy notable con la diferencia de temperatura entre el exterior e interior (Staffell et al., 2012). En el Apéndice 1, se discute cómo se realiza esta medición. Los resultados para un AA convencional (con compresor de velocidad fija), típico del mercado argentino, de unos 2,3 kW de potencia nominal, se muestra en la Figura 5. Un hecho notable y característico de las BC es esta disminución del COP con ΔT. La gran ventaja de usar una BC frente a estufas o calderas, incluso una eléctrica, es que en todas ellas la eficiencia de calentamiento puede ser a lo sumo del 100 %; por ejemplo,

en una resistencia eléctrica. Mientras que la eficiencia (el COP) de casi cualquier equipo moderno, para saltos térmicos inferiores a unos 25 °C, es superior a 100%, Ver Figura 5.

Acondicionadores de aire con tecnología inverter

Los equipos de AA con compresor de velocidad variable, accionado por un inversor (comúnmente referidos como AA con *inverter*), se han popularizado por todo el mundo en los últimos años. Su principal ventaja, respecto de los tradicionales, es decir los AA con compresor de velocidad constante, es su mayor rendimiento o eficiencia. Un AA con *inverter* ofrece importantes ventajas en comparación con los AA tradicionales. Sin embargo, estos últimos siguen siendo omnipresentes y preferidos por muchos consumidores debido a que son más baratos en comparación con los modelos con inversor.

La creciente popularidad de los acondicionadores de aire con *inverter* se debe principalmente al ahorro en las facturas de electricidad. Estos equipos evitan ciclos frecuentes de encendido y apagado y están diseñados para operar con cargas menores a su capacidad máxima, logrando transferencias de calor más eficientes. Esto se traduce en una mejor eficiencia energética, temperaturas estables y menor desgaste de los equipos. En términos prácticos, un aire acondicionado con tecnología Inverter puede ***reducir el consumo de electricidad entre un 35 % y un 50 %*** en comparación con un modelo convencional de características similares. (Yon et al., 2018), (Almogbel et al, 2020). Por lo tanto, un AA con tecnología *Inverter* puede ser una excelente opción para reducir el consumo energético. La correcta selección del equipo según el ambiente es crucial para asegurar un buen funcionamiento y ahorro de energía, estos ahorros se producirán si el equipo no está trabajando mayormente a su máxima potencia, es decir, el equipo no debe ser sub dimensionado en sus condiciones de trabajo.

RESULTADOS

Sensibilidad de los consumos con la temperatura de referencia

Como se describió más arriba, los consumos de calefacción dependen del valor del DGD del lugar. El uso y regulación apropiada de los termostatos en el acondicionamiento térmico de viviendas y edificios ha sido analizado por varios autores (Staffell et al., 2012), y varias agencias nacionales e internacionales hacen recomendaciones específicas sobre su uso e importancia en el ahorro de energía (Energy Saver , 2024), (Consumer Reports, 2024).

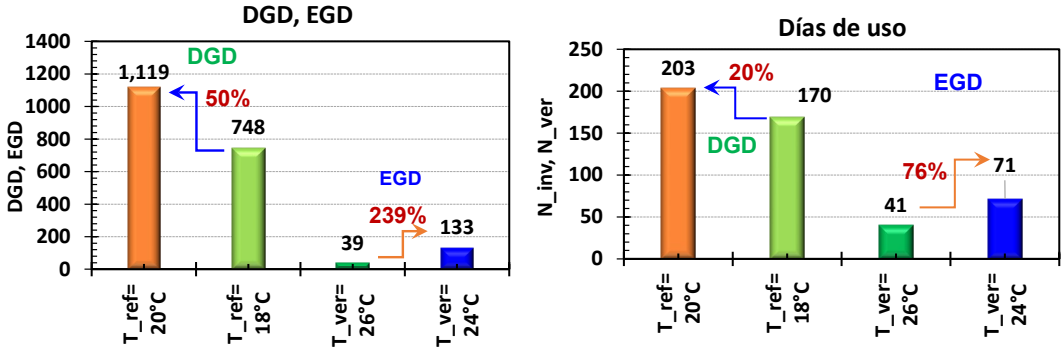


Figura 6: Variación de la $DGD_{(año)}$ y del $EGD_{(año)}$ como función de la temperatura de referencia (termostato). Los datos corresponden al Área Metropolitana de Buenos Aires, tomando como base los años 2013 a 2023.

Se asocia la temperatura de referencia $T_{ref_invierno}$ con la temperatura exterior por debajo de la cual se comienza a calefaccionar. De esta manera, al fijar el termostato, el valor del DGD varia muy significativamente con el valor elegido: $T_{ref_invierno}$ ("*set-point*"). La variación del DGD con $T_{ref_invierno}$, se ilustra en la Figura 6. Mediante la metodología planteada más arriba, una variación de la $T_{ref_invierno}$, entre 18 °C y 20 °C, para un escenario térmico real en AMBA, produce una variación del DGD de 748 *grado.día* a 1119 *grado.día*, o sea un incremento del 50 % o inversamente una reducción del 33 % cuando se pasa de 20 °C a 18 °C. Asimismo, el panel derecho muestra que el número de días a calefaccionar, varia de 170 días a 203 días (incremento del 20%). Se puede hacer un análisis similar con la refrigeración. Si la temperatura del termostato en verano se varia en 2 °C, por ejemplo de 24 °C a 26

°C, el EGD varia de 133 *grado.día* a 39 *grado.día*, o sea en un 239%. Asimismo, los días en que se usaría el acondicionador de aire varían de 41 a 71 días, o sea en un 76 %.

Como se puede ver, el consumo de calefacción es proporcional a la DGD que a su vez es función de la $T_{ref_invierno}$, y dado que el consumo anual de calefacción depende de ella, nuestro análisis permite inferir la variación del consumo para calefacción con el valor de $T_{ref_invierno}$. En la Figura 7 se muestra el resultado de este análisis para el caso de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Se pueden ver que los ahorros de energía para calefacción por variación de 1 °C en el valor de $T_{ref_invierno}$. En la Ref. (Hoyt et al., 2014) se estudia el caso para viviendas en la zona central de California, con resultados similares.

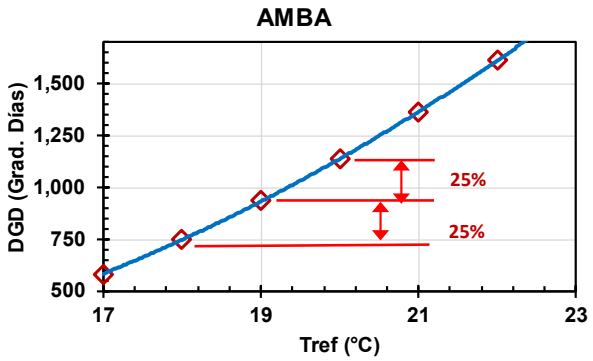


Figura 7: Variación de la DGD anual como función de la temperatura de referencia (termostato). Los datos corresponden a la región del AMBA, tomando como base de los años 2013 a 2023.

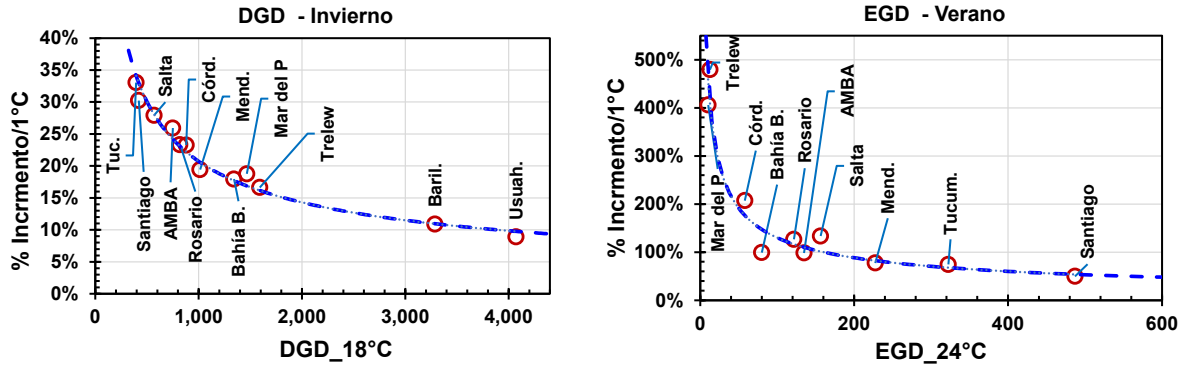


Figura 8. Potenciales ahorros en consumo de energía para calefacción, y refrigeración por variación de 1 °C en la temperatura de referencia o de termostato, para distintas ciudades de Argentina. Izquierda invierno y derecha verano.

En la Figura 8 se muestran los potenciales ahorros de energía para diversas ciudades de Argentina, producidos al variar la temperatura en 1 °C, tanto para invierno (izquierda) como verano (derecha). Desde luego, estos valores pueden variar ligeramente de un año a otro según sean las temperaturas en cada año. Se ve que estas variaciones, para la calefacción, son del orden del 10 % para las regiones más frías (mayor valor de DGD) y para ***la zona centro norte, superan el 25 %.*** Este resultado es sorprendente sobre todo si se lo compara con el reportado en otros países, donde los ahorros son del orden de 10 % (S.A. Al-Sanea, 2008). Cabe señalar que estos últimos resultados fueron realizados en las zonas más bien frías del hemisferio norte. En ese sentido, ciudades como Bariloche o Ushuaia que tiene escenarios térmicos similares a Londres o Nueva York, dan resultados concordantes con los reportados para esas ciudades.

En la Figura 8 se muestran también los potenciales ahorros producidos al aumentar la temperatura de los termostatos en 1 °C, durante el verano. Se ve que los incrementos del consumo en todas las ciudades de Argentina ***son superiores al 50 %***, por lo que una política que promueva el uso de los termostatos en verano a 26 °C para todo el país podría contribuir a reducir el costo de las facturas de electricidad de las familias y mitigar significativamente las emisiones de carbono.

Sensibilidad de los Consumos con la Temperatura de Referencia con uso de BC

Como ya mencionamos, el COP de una BC varía en forma muy notable con la diferencia de temperatura, ΔT, entre el exterior e interior, (Staffell et al., 2012), (International Enegy Agency (IEA), 2023) Por lo tanto, al considerar la variación del consumo energético de una BC con el valor de $T_{ref_invierno}$, es necesario tener en cuenta esta variación de la eficiencia. De hecho, en la Figura 9, se muestra la variación de los potenciales ahorros de consumo, relativos al valor de $T_{ref_invierno}$ = 18 °C, para un calefactor convencional a gas (círculos azules). Por su parte, para el caso de una BC, con cruces verdes, la variación del COP supuesto es como en descripto en la Figura 5.

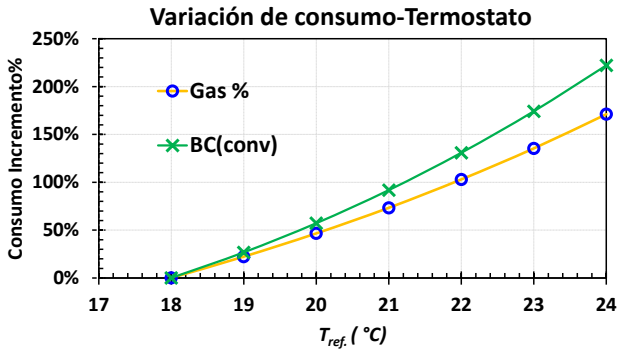


Figura 9. Variación de los potenciales ahorros de consumo con el "set-point" de los termostatos, relativos al valor de T_{ref} = 18 °C, para un calefactor convencional a gas (círculos azules) y para una BC (cruces verdes) con variación del COP como es descripto en la Figura 5.

Como era de esperar, en el caso de la BC, la variación del consumo con el valor de $T_{ref_invierno}$, es mayor que para calefactores convencionales, como consecuencia de la variación de COP con ΔT. Así para un incremento de la temperatura del termostato (*set-point*), de 18 °C a 20 °C (salto térmico de 2 °C, el consumo con un calefactor convencional se incrementa en un valor cercano al 50 %, mientras que para una BC el incremento en regiones con climas templados como Buenos Aires es del 55 %.

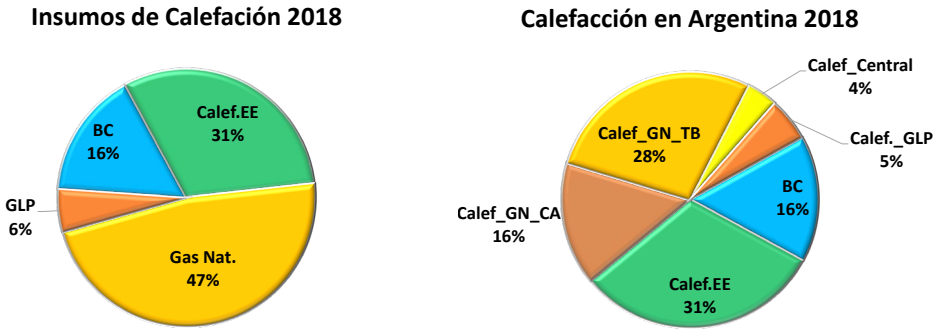


Figura 10. Izquierda, distribución de los equipos de calefacción según el insumo energético que utilizan en Argentina. Derecha, distribución de los equipos de calefacción según su tipo.

En la Figura 10, se muestra la distribución de los calefactores en las viviendas de Argentina al año 2018. (Indec, 2022). En esta figura, Calef.EE indica calefactores eléctricos a resistencia, BC son acondicionadores de aire frío/calor, Calef_GN_TB son calefactores a gas natural (GN) con tiro balanceado, Calef_GN_CA son calefactores de GN con cámara abierta, Calef_GLP calefactores a GLP y Calef_central son sistema de calefacción centrales a GN (radiadores, piso radiante, etc.).

La Figura 11 muestra los resultados de estudios "*Bottom-Up*" recientes sobre los consumos de calefacción en Argentina (Observatorio de Vivienda CABA, 2023), (Zavalía Lagos et al., 2023). Se observa que las familias que usan GN por redes para la calefacción, tienen un consumo por m^2 alrededor de 7,5 veces mayor que las que usan BC. Además, sus emisiones en Argentina son 5 veces mayores. Estos estudios tienen mucha relevancia para el sistema energético argentino ya que muestran que aun

usando gas para generar electricidad (con una eficiencia del 50 %), **todavía sería posible reducir los picos de consumo de gas para calefacción en un factor ¡del orden de 3!, lo cual para Argentina tiene mucha significación económica, energética y ambiental.**

Al observar la Figura 11 es inevitable esbozar alguna explicación al respecto. La relación entre la eficiencia de una BC de COP = 3,5 (quizás los más comunes en el parque de AA en Argentina) al de una estufa a gas de tiro balaceado (eficiencia~ 70 %) es un factor 3,5/0,7 = 5. Sin embargo, una ventaja significativa de las BC respecto de las estufas a gas es que son fáciles de encender y apagar.

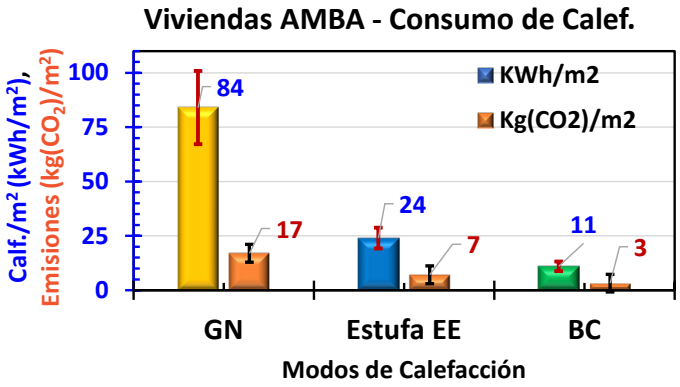


Figura 11: Variación del consumo energético asociado a la calefacción por m^2, según la tecnología usada. En naranja se indican las emisiones asociadas a cada tecnología por m^2.

En las estufas a gas, el encendido y apagado no es sencillo, por lo que la llama piloto, que tienen un alto consumo (0,5 m^3/día ≈ 5 kWh/día), tiende a permanecer encendida por largos períodos. La simplicidad de encendido de las BC y el tiempo corto en que empiezan a generar confort hace que estos equipos se enciendan solo cuando se usan. Además, al momento de encender el equipo, ya contamos con un termostato de regulación de temperaturas en nuestras manos. Por último, por razones de seguridad, es preciso que muchas viviendas con estufas a gas requieren además de alguna ventilación extra por ambiente. Estas **ventilaciones al exterior** son una fuente de ineficiencia en la vivienda, lo que hace que los rendimientos de las estufas a gas sean aun, más bajos. La regulación del termostato, generalmente ausente en las estufas a gas, resulta sumamente sencilla en las BC y contribuye significativamente a la eficiencia. Como vimos, un exceso de 2 °C en la regulación del termostato puede significar un incremento en el consumo del orden del 40 % al 50 %, Figura 6.

Los picos de consumo del sector residencial y comercial están en el máximo de prioridad de abastecimiento del gas en Argentina. Eso implica que para satisfacer esta demanda sea necesario hacer cortes en el suministro de industrias y centrales eléctricas (Prieto et al., 2022), de alto costo para la producción nacional y la economía en general. Además, al no ser suficientes estos recortes de consumo, es necesario apelar a la importación de gas (GNL) a valores mucho más altos y volátiles. En ese sentido el uso de BC para calefacción (junto con las mejoras en las envolventes de edificios, o mejoras de bajo costo en las aberturas de las viviendas), puede aportar una solución interesante y de no muy alto costo para palear estos picos de consumo de gas en invierno.

Por último, es importante destacar que este análisis se refiere a las cantidades de energía y sus emisiones, y no al costo de la energía. El costo de la electricidad relativo al gas depende de muchos factores. La disponibilidad de recursos locales, origen de las fuentes de abastecimiento y las decisiones políticas que regulan estos precios. En Argentina, sin intervención de subsidios, el costo de una unidad de energía de electricidad es aproximadamente 3,5 veces mayor que la del gas. **Por lo que con una reducción de consumo de 6 o 7 implicaría una reducción del costo de calefacción de aproximadamente 2 veces.**

DISCUSIÓN: EL TERMOSTATO Y SU IMPACTO EN EL AHORRO DE ENERGÍA

En la zona de humedad relativa entre 30 % a 70 %, la temperatura de confort para la mayoría de las personas se halla entre 18 °C y 25 °C. En verano, la mayoría de las personas estarán confortables a una

temperatura de unos 25 °C a 26 °C con ropa liviana. En invierno, quizás una temperatura de 18 °C a 19 °C, con un suéter o pulóver, casi todas las personas se sentirán cómodas. La razón de esta diferencia de temperatura para verano e invierno deviene de varios factores: 1) La vestimenta que usamos en cada estación del año, 2) la disminución y los cambios bruscos de temperatura, 3) el ahorro en el uso de la energía, y su consecuente disminución de los costos de funcionamiento, 4) mitigación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

En invierno usamos más abrigos que en verano. Así, con suficiente ropa, en invierno necesitamos de una temperatura más baja en los interiores de viviendas y edificios. Lo opuesto sucede en verano. Además, es conveniente por razones de salubridad y confort, minimizar los cambios bruscos de temperatura al entrar y salir de las viviendas o edificios. En base a lo discutido, surge como necesidad tomar acciones concretas para generar una cultura de uso eficiente de la energía, que incluye la regulación de los termostatos como un elemento importante en el uso de calefacción y refrigeración.

Para el caso de calefacción, sería útil recomendar el adecuado uso de termostatos en los sistemas de acondicionamiento térmico de ambientes, como un método eficaz de reducción del consumo de la energía utilizada en calefacción y refrigeración (Department of Energy USA, (DOE), 2013). En concordancia con el *US Department of Energy* (DOE) se debería recomendar usar el termostato en invierno a 20 °C, mientras los ocupantes estén despiertos y reducir esta temperatura a 18 °C o 17 °C cuando los ocupantes duermen. Los porcentajes de ahorro son mayores para los edificios en climas templados que en los de climas más rigurosos.

En verano, se puede aplicar la misma estrategia, manteniendo la temperatura de las casas y edificios a 26 °C solo cuando están ocupados y apagando la refrigeración en otros horarios. En gran parte de Argentina, durante varios meses no se requiere ningún tipo de apoyo térmico, lo que permite apagar los sistemas de climatización. La regla general es que las pérdidas de calor son menores cuando la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es menor. Por lo tanto, reducir esta diferencia conduce a mayores ahorros de energía, tanto en verano como en invierno.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se discutió cómo el consumo de energía para calefacción es proporcional al Déficit Grado Día (DGD) del lugar. Análogamente, el consumo de refrigeración es proporcional al Exceso Grado Día (EGD). Dado que estos dos parámetros, el DGD y el EGD, dependen de la temperatura a la que se fijan los termostatos. Este estudio indica que una disminución de 1 °C en la temperatura de regulación puede generar un ahorro de energía del orden del 25 % en la zona centro norte de Argentina, donde se encuentra la mayoría de la población. De manera análoga, un incremento de 1 °C en la refrigeración puede generar ahorros superiores al 50 % en la mayoría de las ciudades de Argentina.

De este modo, una estrategia altamente eficaz y económica para reducir el consumo de energía es ajustar las temperaturas de los espacios interiores de manera adecuada según la temporada. Durante el verano, mantener las temperaturas interiores lo más altas posible ($T_{int} \approx$ 25 °C o 26 °C), permite minimizar el uso del acondicionador de aire. De modo similar en invierno, mantenerlas lo más bajas posible ($T_{int} \approx$ 19 °C o 20 °C), ayuda a reducir la necesidad de calefacción. Este enfoque no solo contribuye al ahorro de energía, sino que también puede generar beneficios significativos para el medio ambiente y a la salud de las personas, evitando los saltos bruscos de temperatura, causante de numerosos problemas de salud. Asimismo, esta estrategia permite reducir los costos asociados con el consumo de energía en el hogar o en los lugares de trabajo. En el caso de calefacción con bombas de calor, el efecto de la sensibilidad del consumo con el valor a que se fija el termostato (*set-point*) es aún mayor que para los calefactores convencionales a gas u otro combustible.

Nuestro estudio revela que la adopción de bombas de calor (acondicionadores de aire frío/calor), como sistemas de calefacción en la zona norte del Río Colorado, puede resultar en una reducción de los consumos de acondicionamiento térmico en factores que oscilan entre 5 a 7 veces en comparación con sistemas tradicionales basados en gas natural. Estos incluyen artefactos tales como estufas de tiro balanceado, calderas, etc. La mejora en eficiencia respecto de calefactores eléctricos a resistencia es en

un factor de 3 a 4. Estas ventajas de las bombas de calor respecto de los sistemas tradicionales a gas (o eléctricos) se deben principalmente a la alta eficiencia de las BC (350 % a 400 %) relativa a una estufa de tiro balaceado (~ 70 %), o sea un factor cercano a 5. Además, las BC son fáciles de encender y apagar, lo que contrasta con las estufas a gas, e incrementa más su potencial de ahorro de energía. Por otro lado, al encender una BC ya se dispone de un termostato en la mano, con lo que se logra una eficiencia aún mayor, por una mejor regulación de la temperatura de los ambientes. Finalmente, al no ser necesario usar ventiletes, como lo requeridos para las estufas a gas, se reducen las pérdidas de calor por infiltraciones de aire.

Por su parte los aires acondicionados *inverter* tienden a tener una vida útil más larga debido a su funcionamiento más eficiente y menor desgaste en los motores o compresores. Además, por la mejor administración del uso de los motores y compresores y las mejores eficiencias en la transferencia de calor al funcionar a cargas parciales, la tecnología inversora permite lograr mayor eficiencia en el uso de la energía. Desde el punto de vista normativo, sería deseable requerir que todos los equipos de calefacción incluyan termostatos de regulación de temperatura. Mejor aún si son termostatos inteligentes.

- ✓ Requerir que todos los edificios públicos cumplan con las pautas de eficiencia en la regulación de temperaturas.
- ✓ Requerir que los nuevos edificios tengan sistemas de regulación de temperatura por cada unidad, y ambientes individuales, en lugar de sistemas centralizados de regulación.

En definitiva, la correcta regulación del termostato es una herramienta muy simple y de bajo costo, para lograr ahorros importantes de energía y reducir el costo de las facturas.

Mucho del trabajo realizado aquí, pudo lograrse por la activa y gentil colaboración del Laboratorio Lenor (Lenor Group-Organismo de Evaluación de la Conformidad, Buenos Aires, Argentina) y sus expertos y técnicos. En particular, agradecemos al Ing. R. Baumann, a Ricardo Rodríguez, Lucas Rodríguez, Fernando Pellizer del Laboratorio Lenor, por su apoyo y colaboración. Asimismo, agradecemos al Ing. Javier Mariani, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

APÉNDICE 1: MEDICIÓN DE LOS VALORES DE COP PARA UNA BOMBA DE CALOR

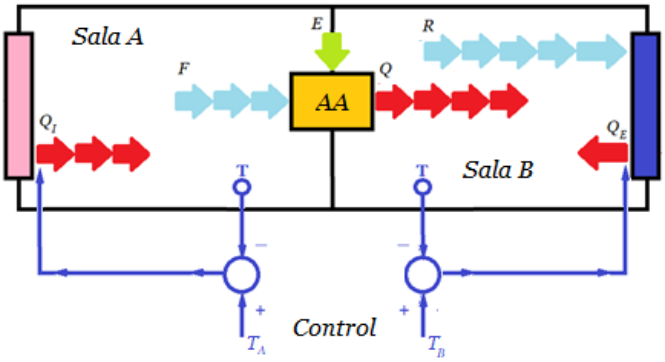


Figura 12. Esquema simplificado de un ensayo de un acondicionador de aire en modo refrigeración, el calorímetro se considera absolutamente adiabático. Experimentalmente se miden: QI, QE, E y R. En modo frío las salas A y B representan el interior y el exterior de la vivienda respectivamente. En modo calor se invierten los papeles.

En la Figura 12 se presenta un esquema que describe a grandes rasgos el ensayo de un equipo acondicionador. Cuando el equipo se ensaya en modo frío la *sala A* funciona como el interior de la vivienda y la *sala B* como el exterior. En modo calor se invierten los roles y la sala A funciona como exterior y la B como interior. Cada sala cuenta con sistema de humidificación, deshumidificación, refrigeración, y sistema de calefacción, así como un dispositivo de control y sensores de temperatura y humedad, similar al usado por otros laboratorios de ensayos. (Andrade et al., 2021)

El equipo en cuestión, AA (en amarillo), bombea calor desde la sala A hacia la B utilizando energía eléctrica E (flecha verde). El calor F que extrae de la sala A (3 flechas celestes) más la energía eléctrica (1 flecha verde) se vuelcan en forma de calor Q (4 flechas rojas) en la sala B, es decir: Q = F + E. Para mantener en condiciones estables la sala A, su equipo re-acondicionador (calefactor a resistencias en rosa) debe suministrar a la sala una cantidad de calor Q_I (3 flechas rojas) igual a la que extrae el acondicionador, Q_I = F, lo que hace ajustando la potencia entregada por unas resistencias calefactoras para mantener la temperatura en el valor especificado T_A. Dado que es simple medir la potencia suministrada a una resistencia los valores de Q_I y F se conocen fácilmente. Asimismo, el re-aconcionador de la sala B, en azul, debe extraer el calor que entrega el equipo ensayado, para lo cual extrae en exceso R por medio de un intercambiador de calor con agua (4 flechas celestes) y ajusta con Q_E mediante un calefactor a resistencias eléctricas (1 flecha roja) para que la temperatura de la sala B, T_B, queda estable. En estas condiciones de estabilidad Q = R - Q_E.

De esta manera el re-acondicionador B controla agregando calor por resistencias eléctricas (Q_E) a una base de frio más o menos constante (R) suministrada por el intercambiador.
El objetivo principal del ensayo para un equipo en modo frío es la determinación del índice de *Eficiencia Energética de Refrigeración* (EER) del equipo (Ecuación 5), este es:

$$EER = \frac{F}{E}\,. \tag{5}$$

y en modo calor el índice de *Eficiencia Energética de Calefacción (Ecuación 6)*, o COP (*Coefficient Of Performance*).

$$COP = \frac{Q}{E}\,. \tag{6}$$

Para la determinación de estos índices, vemos que $F = Q_I$ y E se miden fácilmente, ya que son simples potencias eléctricas integradas en el tiempo (Ecuación 7). Claro está que esto debe realizarse en condiciones de estabilidad.
Por otra parte, debe ocurrir que:

$$F + E = Q_I + E = Q = R - Q_E. \tag{7}$$

Como las potencias E, Q_I, Q_E, y R son medibles directa o indirectamente, la determinación de todas ellas es necesaria para establecer la coherencia del ensayo mediante la validez de la igualdad (7) dentro de las tolerancias debidas a los errores de medición. Además, se cumple aproximadamente (Ecuación 8):

$$COP \approx 1 + EER \tag{8}$$

REFERENCIAS

Almogbel, A., & et al. (2020). Comparison of energy consumption between non-inverter and inverter-type air conditioner in Saudi Arabia. *Energy Transitions, 4*, 191-197. https://doi.org/doi.org/10.1007/s41825-020-00033-y

Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. (2021). EER or Fcsp: A performance analysis of fixed and variable air conditioning at different cooling thermal conditions. *Energy Reports, 7*, 537–545.

Carrizo, S., Azqueta, P., Strier, D., & Gil, S. (2022). Futuros Urbanos - Vivienda social asequible y sostenible. En *Serie Futuros- URBANOS* (págs. 119-160). Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias y Fundación UNSAM .

Consumer Reports. (2024). *Are Smart Thermostats Worth It?* https://www.consumerreports.org/appliances/thermostats/are-smart-thermostats-worth-it-a7822875275/

Department of Energy USA, (DOE). (2013). *Department of Energy USA, (DOE) Energy saving-Thermostat. Thermostat Operation.* http://energy.gov/energysaver/articles/thermostats.

ENARGAS. (2024). *Ente Nacional Regulador del Gas - Argentina*. (Ente Nacional Regulador del Gas en Argentina) Ente Nacional Regulador del Gas: https://www.enargas.gob.ar/

Energy Saver . (2024). *Programmable Thermostats*. (US Department of Energy) https://www.energy.gov/energysaver/programmable-thermostats

Hoyt, T., Arens, E., & Zhang, H. (2014). *Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings.* Center for the Built Environment, University of California at Berkeley, USA. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.010

Iannelli, L., & Gil, S. (2022). Eficiencia en climatización I, Sugerencias para optimizar su consumo - Medidas de bajo costo para el invierno. *Petrotecnia, LXII*(2), 52-59.

Iannelli, L., & Gil, S. (2022). Eficiencia en climatización II. Eficiencia en climatización, Acondicionamiento térmico de interiores-Medidas de bajo costo para períodos estivales. *Petrotecnia Suplemento Tecnico, Nov. 2022*, 1-11.

Iannelli, L., Fiora, J., y Gil, S. (2015). Indicador de eficiencia energética en una vivienda modelado de la temperatura interior. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA), 3*, 08.399-08.406.

Indec. (2022). *Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018- Energía*. https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/sociedad/engho_2017_2018_uso_energia.pdf

International Enegy Agency (IEA). (2023). *Heat Pumps.* https://www.iea.org/energy-system/buildings/heat-pumps#overview

Peffer, T., y otros. (2011). How people use thermostats in homes: A review. *Building and Environment, 46*, 2529e2541.

Prieto, R., y Gil, S. (2013). ¿Cómo se distribuye el consumo residencial de gas? Modos de promover un uso más eficiente del gas,. *Petrotecnia, LIV*(6), pag. 81-92.

Prieto, R., y Gil, S. (2014). Regulación del termostato: un modo simple y racional de ahorrar energía en calefacción y refrigeración. *Petrotécnia (Revista del IAPG), V*(5), 102-104.

Prieto, R., Carrizo, S., Codeseira, L., & Gil, S. (2022). Relevancia del Gas Natural para una Transición Energética Justa. *Petrotecnia, XXVI*(51), 4-20.

Observatorio de Vivienda CABA. (2023). *Proyecto de Fortalecimiento del Observatorio de Vivienda de la CABA*. https://vivienda.buenosaires.gob.ar/informe-final

S.A. Al-Sanea, M. Z. (2008). Optimized monthly-fixed thermostat-setting scheme for maximum energy-savings and thermal comfort in air-conditioned spaces. *Applied Energy, 85*, 326–346.

Staffell, I., y otros. (2012). A review of domestic heat pumps. *Energy Environ. Sci., 5*, 9291. https://doi.org/10.1039/c2ee22653g

U.S. Energy Information Administration-DOE. (2024). *Degree days*. https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/degree-days.php#:~:text=A%20high%20number%20of%20degree,%C2%B0F%20has%2025%20HDDs.

US Dept of Commerce. (2024). *What Are Heating and Cooling Degree Days*. (National Weather Service) https://www.weather.gov/key/climate_heat_cool

USA Department of Egergy. (2024). *Energy Saver*. https://www.energy.gov/energysaver/energy-saver

Wikipedia. (2024). *Heating degree day*. https://en.wikipedia.org/wiki/Heating_degree_day

Yan, H., y otros. (2022). Thermal adaptation of different set point temperature modes and energy saving potential in split air-conditioned office buildings during summer. *Building and Environment, September 2014, 225*(Nov), 109565.

Yon, M., y otros. (2018). Experimental Study on Comparison Of Energy Consumption Between Constantand Variable Speed Air Air-Conditioners In Two Different Climates. *Proceedings of the 9th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning ACRA2018.* Sapporo, JAPAN.

Zavalía Lagos, R., y otros. (2023). Calefacción eficiente, ¿Bombas de calor o sistemas tradicionales de calefacción? *Petrotecnia, IAPG., LXIII*(4), 92-104. https://www.petrotecnia.com.ar/

Zavalía Lagos, R., Iannelli, L., y Gil, S. (2022). Anatomía del Consumo Residencial Argentino -Uso Racional y Eficiente del Acondicinamiento Termico. En *Futuros Energía - Fundación UNSAM - N.Coppari y otros.* San Martín - Buenos Aires: Fund. UNSAM y ASsoc. Argentina para el Progreso de las Ciencias. . https://aargentinapciencias.org/serie-futuros/

USE OF THE THERMOSTAT: STRATEGIES FOR ENERGY SAVING IN HOMES AND BUILDINGS

ABSTRACT: This study explores the potential for energy savings in the thermal conditioning of homes and buildings through efficient thermostat use for both heating and cooling. It compares the performance of conventional heaters with hot/cold air conditioners (heat pumps), assessing the performance coefficients of equipment available in the Argentine market. The findings show that reducing the thermostat setting by 2°C in winter can lower heating consumption by about 30%, with even greater savings for heat pumps. Similarly, raising the thermostat by just 1°C in summer can reduce cooling consumption by around 33%. Additionally, homes with heat pumps consume significantly less energy for heating compared to those using natural gas systems, with consumption differences of up to sevenfold per square meter in the Buenos Aires Metropolitan Area and likely throughout the central-northern region of the Southern Cone.

Keywords: energy efficiency, building thermal conditioning, heat pumps, thermostat, inverter.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 198-208, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

AHORRO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA DE PRECALENTAMIENTO DE AIRE EN ESTUFAS DE TABACO BULK-CURING

Fabiana Altobelli[1], Miguel Condorí[1], Gonzalo Durán[1], Ileana Cruz[1]
[1]Grupo de Eficiencia Energética y Desarrollo Socio-Productivo (GEEDESP) – Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387-4258709 e-mail: fabi_altobelli@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se presentan los resultados obtenidos a partir de la intervención de una estufa de tipo bulk-curing para el curado de 8 toneladas de tabaco Virginia, en la localidad de Vaqueros, Salta, para producir ahorro energético en su consumo de gas natural con incorporación de energía solar y mejora de la eficiencia térmica del proceso. En dicha intervención se incorpora al techo de la estufa un sistema de precalentamiento de aire conformado por colectores solares y recuperación de calor residual de la combustión del quemador. Durante los años 2022-2024 se efectuaron ensayos de la estufa intervenida tanto en vacío como con carga de hojas de tabaco. Los resultados de los ensayos realizados dan cuenta de ahorros del orden del 40 % en el consumo de gas para un proceso completo de curado, con la incorporación del sistema de precalentamiento propuesto. Considerando los costos de inversión necesarios, y los ahorros en gas para toda la campaña, el tiempo de recupero de la inversión es de aproximadamente 2,8 campañas teniendo en cuenta tarifas internacionales de gas. Estos resultados permiten demostrar la factibilidad técnica y financiera del sistema propuesto en un contexto de tarifas no subsidiadas.

Palabras clave: curado de tabaco, eficiencia energética, energía solar.

INTRODUCCIÓN

En el contexto del desarrollo sostenible, es fundamental la integración de fuentes de energía renovables en la producción regional. La ONU subraya la necesidad de incrementar la participación de energías renovables y la planificación regional para mejorar la eficiencia energética mediante todas las tecnologías disponibles, al mismo tiempo que se fomente la innovación (United Nations, 2021). En este marco, la eficiencia energética en el secado del tabaco emerge como un área clave para la sostenibilidad ambiental y la viabilidad económica.
Los estudios muestran que el potencial de ahorro energético y reducción de emisiones en las empresas tabacaleras chinas es de 57,2 % y 68,1 %, respectivamente, con mayores oportunidades de optimización a través de la escala o mejora de procesos en lugar de solo mejoras tecnológicas (Wang y Yuan, 2020). Investigaciones previas han explorado hornos de secado energéticamente eficientes y fuentes alternativas de energía, como la solar, biomasa y tecnologías de bombas de calor, evidenciando una mayor eficiencia en el uso del calor y una reducción en el consumo de combustible comparado con los hornos convencionales (Fara et al., 1985; Naga Raju, 1989).
Actualmente, existe un creciente interés en la industria tabacalera local para reducir el consumo energético en el proceso de curado. Las estufas de tabaco de tipo bulk-curing comprenden el modelo de mayor difusión en el noroeste argentino (Altobelli et al., 2010). Destinadas a cumplir con el proceso de curado de tabaco Virginia (flue-cured), en su gran mayoría se encuentran abastecidas por gas natural. La estructura tradicional de las mismas está formada por una base de mampostería de ladrillo, y paredes y techos de doble chapa galvanizada, incluyendo aislación interna de lana de vidrio entre ambas. A su vez, se diferencian claramente dos secciones, una cámara de secado con abertura frontal, y el sector de quemador y turbinas, en una ubicación posterior denominada unidad de calor (Condorí et al., 2020).

Tradicionalmente se considera que una estufa convencional tiene un consumo de gas natural del orden de 1 m^3 por cada kg de tabaco curado. Este valor puede verse ligeramente modificado en diferentes establecimientos y manejos particulares. En promedio la capacidad de carga de cada estufa de tabaco ronda los 10.000 kg de tabaco fresco, obteniéndose aproximadamente 1.000 kg de tabaco curado. Los estudios de auditoría energética locales mostraron que solo el 30% del gas natural y la electricidad suministrados se utilizaron de manera efectiva, con pérdidas térmicas debido a un aislamiento deficiente, puentes térmicos en la estructura y fugas de aire (Altobelli et al., 2011).

El presente trabajo tiene como objetivo exhibir los resultados obtenidos tras la implementación de un sistema de precalentamiento de aire en una estufa de curado de tabaco tipo bulk-curing, ubicada en dependencias de un productor tabacalero en la localidad de Vaqueros, provincia de Salta. Dicha intervención se enmarca en un convenio de asistencia entre el Fondo Especial del Tabaco (Secretaría de Agricultura de la Nación) y el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO). Desde fines del año 2022 se inició el diseño del mencionado sistema, el cual fue instalado durante fines del año siguiente. Dada la estacionalidad de la producción tabacalera, inicialmente sólo pudieron efectuarse ensayos en vacío (Altobelli, et al. 2023), los que ya permitieron estimar ahorros significativos en el consumo de gas natural. Los resultados aquí mostrados obedecen a ensayos realizados durante la campaña 2023-2024, ya con carga de hojas.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

La Estufa convencional intervenida

Durante el año 2023 se trabajó en el diseño de un sistema de precalentamiento de aire híbrido (solar y con recuperación de calor residual) a ser instalado en el techo de una estufa de tabaco de tipo bulk-curing (Altobelli, et al. 2023). La estufa de tabaco intervenida cuenta con 4,67 m de ancho y 7,7 m de largo, con una altura máxima en la cumbrera de 3,88 m (Figura 1). La estructura basal de la misma está constituida por mampostería de ladrillo con revestimiento de cemento. El resto de la construcción, paredes y techo, poseen sus caras con doble chapa galvanizada ondulada incluyendo aislación térmica de lana de vidrio entre ambas. En la parte posterior la estufa se encuentra la unidad de calor, conformada por el quemador de gas natural, al cual se anexa un intercambiador de calor de veinte tubos dispuestos en 5 filas, donde el humo circula por el interior y el aire por el exterior de los tubos. La salida de humos se lleva a cabo por dos chimeneas ubicadas arriba de la unidad de calor, que los vierten directamente al ambiente. El flujo de aire en la estufa es forzado mediante una turbina centrífuga de 4 kW ubicada en la parte inferior de la unidad de calor, debajo del quemador. Esta estufa posee 4 niveles para la carga de peines con hojas de tabaco. Por último, el suelo de la cámara de cemento se encuentra cubierto por un contrapiso de cemento.



Figura 1: Vista oeste de la estufa de tabaco y su unidad de calor, antes de ser intervenida. A la derecha vista de frente de la cámara con la carga de tabaco. Fuente: Altobelli, et al. 2023

La propuesta de intervención de la estufa incluyó dos aspectos:

1) Se colocaron en el techo de la estufa dos calentadores solares de aire, construidos con caño estructural, chapa y cubierta de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor, conformando un ducto que se conecta a la unidad de calor a nivel del techo. El aire ambiente se precalienta indirectamente con el humo de combustión, para lo cual se extienden las chimeneas por el interior de los calentadores, y por ganancia de radiación solar absorbida por los calentadores, durante el día.

2) Se colocó una envolvente de chapa, aislada térmicamente con lana de vidrio de 5 cm de espesor, en la parte superior de la unidad de calor para tomar el aire precalentado desde el colector-techo. A la unidad de calor ingresa aire precalentado por la ventana que antes tomaba aire ambiente. Se recupera el calor de salida de humo del quemador colocando una caja de distribución con dos caños rectangulares de 0,10 m x 0,2 m que vienen del intercambiador de calor, y sale con cuatro caños redondos de 7,5 x 10-2 m de diámetro. Estos caños continúan a lo largo y por el interior del colector solar, descargando el humo al ambiente a la altura de la puerta de carga de la estufa, como puede verse en las figuras 2 y 3. El aire que ingresa a la unidad de calor, para ser calentado por el quemador de gas, se encuentra a mayor temperatura que el aire ambiente produciendo ahorro de energía de acuerdo con la etapa de curado.

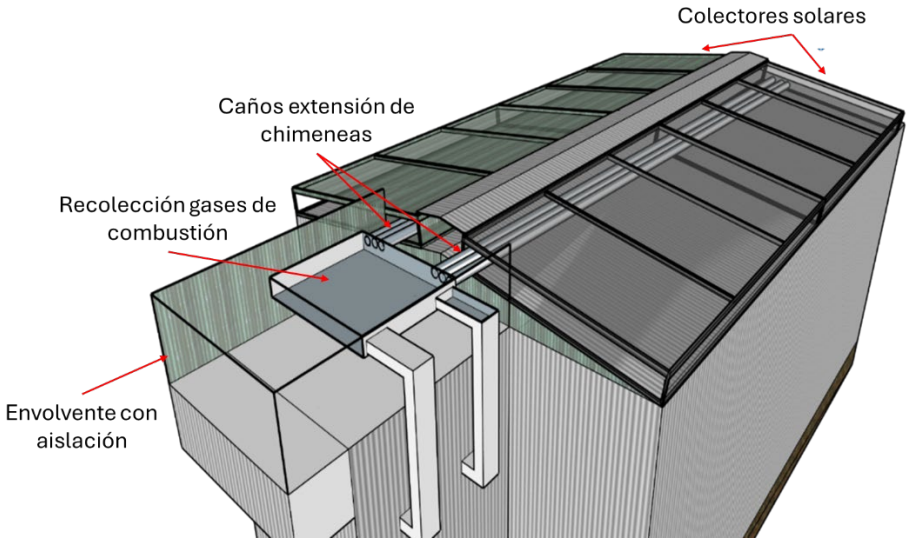


Figura 2: Esquema del sistema instalado. Se aprecia envolvente de la unidad de calor, salida de humo del quemador de gas y caja de distribución con salida por caños redondos

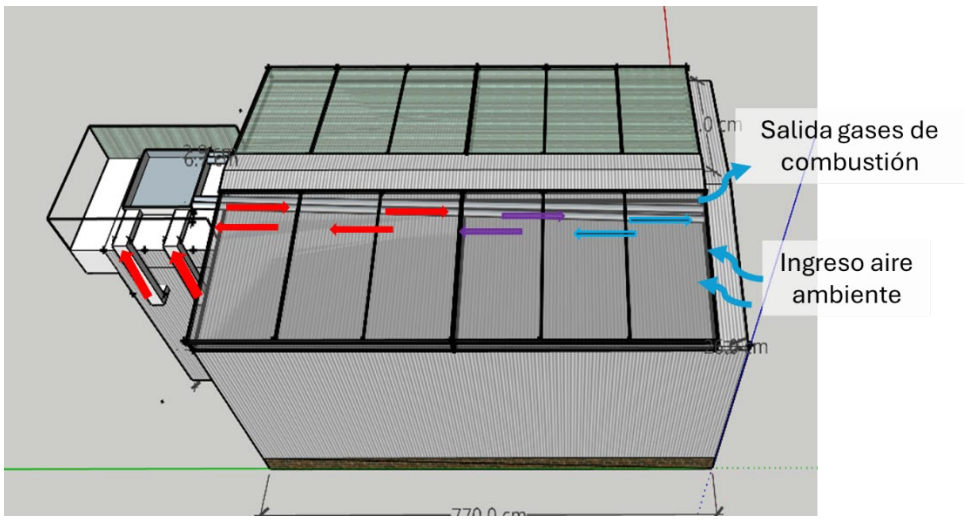


Figura 3: Detalle de circulación y dirección del aire en el sistema de precalentamiento (véase que el humo caliente proveniente de la combustión se enfría a medida que cede calor al aire ambiente que circula a contracorriente)

“Con estas modificaciones se recupera calor de la estufa las 24 horas de funcionamiento, y se aporta ganancia durante el día con energía térmica de la radiación solar. El aire que ingresa a la unidad de calor, para terminar de ser calentado por el quemador de gas, se encuentra a mayor temperatura que el ambiente produciendo ahorro de energía de acuerdo con la etapa de curado” (Altobelli et al., 2023).



Figura 4: Fotografía aérea del sistema propuesto ya instalado en los techos de la estufa

Sistema de medición estufa intervenida y testigo

Durante la campaña de producción de tabaco 2023-2024 se procedió a medir el funcionamiento de la estufa intervenida con carga de tabaco y, de manera comparativa, de una estufa testigo. En búsqueda de reducir diferencias debido a aspectos meteorológicos y externos al funcionamiento y eficiencia de cada estufa, se trató de que las estufadas y sus registros fueran simultáneas. El sistema de medición estuvo compuesto por termocuplas tipo K, tipo E y sensores DHT22. Por su parte, los datos se registraron mediante un datalogger Campbell, y módulos Arduino. En lo que respecta a los datos de irradiación global fueron medidos mediante un solarímetro Kipp&Zonen instalado en el techo de la estufa intervenida.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la ubicación de los sensores:

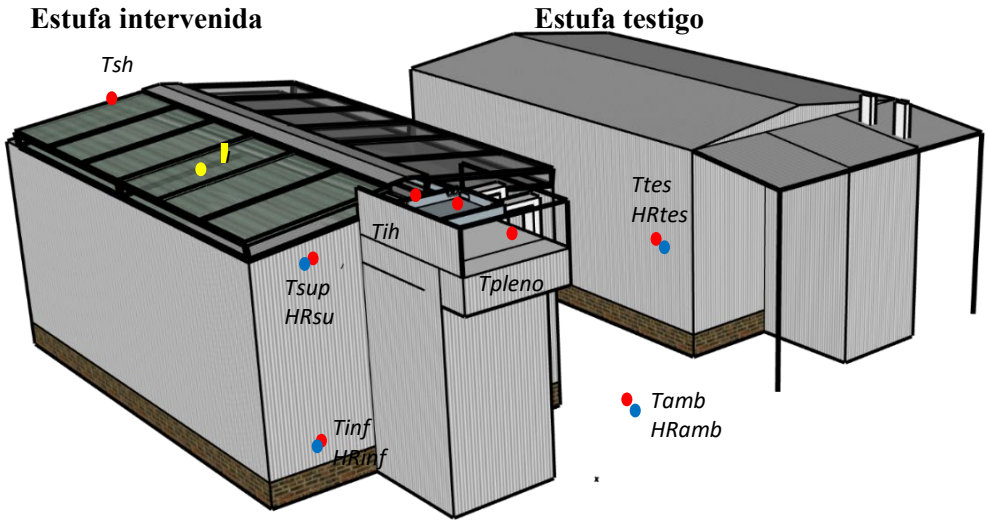


Figura 5: Esquema ubicación sensores en la estufa intervenida y su par testigo

-Temperatura ambiente (Tamb)
-Temperatura estufa testigo (Ttes)

-Humedad relativa estufa testigo (HRtes)
-Temperatura pleno (Tpleno)
-Temperatura salida de humo (Tsh)
-Temperatura ingreso de humo (Tih)
-Temperatura sector superior de la estufa (Tsup)
-Humedad relativa sector superior de la estufa (HRsup)
-Temperatura sector inferior de la estufa (Tinf)
-Humedad relativa sector inferior de la estufa (HRinf)
-Radiación global (I)

Por otro lado, se solicitó al productor las planillas de estufado, las cuales son diariamente completadas por su personal a cargo. En este caso los valores que se registran corresponden a las temperaturas obtenidas mediante un par psicrométrico (Temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco). Este registro sirvió para cotejar las mediciones realizadas con el resto de los sensores.

Cálculos de ahorro
Para determinar los ahorros logrados con el sistema propuesto, por la naturaleza y características del proceso de curado de tabaco, es necesario considerar de manera individual a la etapa inicial en la que predomina la recirculación de aire (Amarillamiento) de las etapas posteriores en la que se produce el secado de las hojas y las nervaduras.

Recirculación de calor
La primera etapa del curado de tabaco, llamada Amarillamiento, posee una duración de entre 24 – 36 horas. La misma es llevada a cabo con todas las ventanas de la estufa cerradas, recirculando el aire en su interior y llevando a las hojas a condiciones de humedad relativa cercanas a la saturación, con temperaturas no superiores a los 35 °C. Dicha recirculación es forzada mediante la turbina de la estufa (Figura 6).

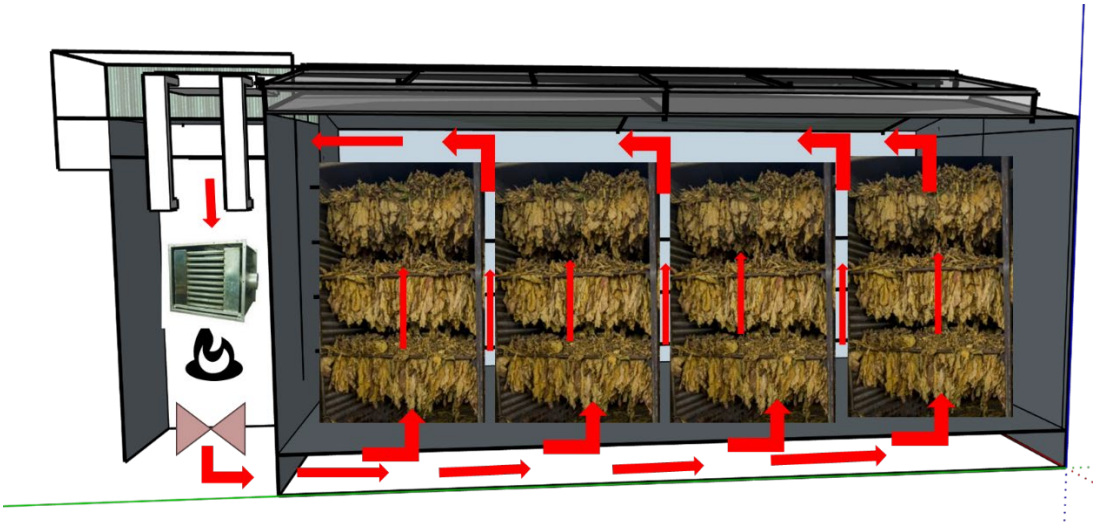


Figura 6: Diagrama de circulación de aire en el interior de la estufa durante la etapa de amarillamiento

En la etapa de recirculación no se utiliza el aire proveniente de la unidad de calor, por lo que los ahorros se justifican por la disminución de las pérdidas térmicas, mayormente por el techo debido a la presencia del precalentador con mejor aislación térmica. La Ec. (1) fue utilizada para el cálculo del ahorro energético, la cual representa la relación entre las pérdidas del colector al ambiente frente a las pérdidas de la estufa al ambiente, considerando la temperatura del pleno superior de la estufa.

$$AE = \frac{T_{col} - T_{amb}}{T_{est_a} - T_{amb}} \quad (1)$$

Donde T_{col} es la temperatura media de los colectores, T_{amb} es la temperatura ambiente, y T_{est_a} es la temperatura de la estufa en el pleno superior.

Secado de lámina y nervadura

Luego que las hojas de tabaco llegaron al color adecuado durante el "amarillamiento" las etapas siguientes implican elevación de la temperatura siguiendo rampas ya definidas (Altobelli et al., 2013), e intercambio de aire con el ambiente. De esta manera se inicia el proceso de secado, donde las hojas van perdiendo humedad. En estas etapas el flujo de aire es nuevamente forzado por la turbina de la estufa y el aporte térmico proviene del quemador con una rampa de temperatura creciente hasta los 70 ºC (Figura 7).

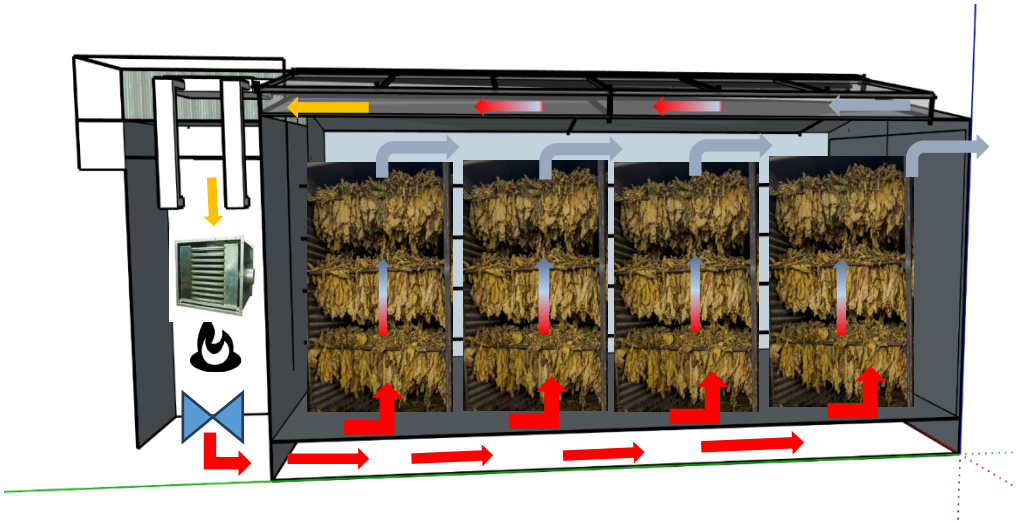


Figura 7: Diagrama de circulación de aire en el interior de la estufa durante las etapas de secado de lámina y de nervadura

Con la estufa mejorada, en la etapa de secado de láminas y nervaduras, no se toma el aire directamente del ambiente sino desde los calentadores de techo a través de la unidad de calentamiento. La temperatura de la estufa es cada vez más uniforme en la medida que se elimina el vapor de agua hacia el exterior. Para determinar el ahorro energético se utiliza la Ec. (2), la cual comprende la razón entre la diferencia de temperaturas entre la cámara de recuperación y el ambiente, dividido por la diferencia de temperaturas entre el interior de la estufa y el exterior.

$$AE = \frac{T_{rec} - T_{amb}}{T_{est} - T_{amb}} \quad (2)$$

Donde T_{rec} es la temperatura de recirculación desde los colectores de techo, T_{amb} es la temperatura ambiente, y T_{est} es la temperatura media de la estufa.

RESULTADOS OBTENIDOS

Mediciones de temperatura

Los resultados fueron obtenidos a partir del análisis y procesamiento de los valores de temperatura registrados en la campaña 2023-2024. En la Figura 8 se muestran los valores de temperatura registrados en la estufa intervenida durante un proceso de curado de ocho días. En la misma se muestra las temperaturas de la estufa en el pleno superior e inferior, la temperatura de salida de los colectores tomada por el quemador de gas y la temperatura ambiente. Los valores de la curva de temperatura correspondiente a la salida del colector siempre superan a la temperatura ambiente, siendo la diferencia entre ambas entre 20-30 °C. Si bien la temperatura de los colectores sigue el comportamiento de la temperatura ambiente, a su vez está influenciada por la radiación solar y por la mayor temperatura del

humo de salida del sistema de recuperación de calor, que se puede observar especialmente en los dos últimos días del proceso.

El ahorro energético se materializa por el menor requerimiento térmico del quemador de gas, controlado por el termostato, para alcanzar las temperaturas características de la estufa en cada etapa del curado de tabaco. Al iniciar el proceso, las temperaturas en la estufa son del orden de los 35 ºC, no ingresa aire ambiente a la unidad de calentamiento, sino que el aire se recircula directamente desde el pleno superior de la estufa, calentándolo y retornando por el pleno inferior. En esta etapa, el requerimiento energético está relacionado principalmente a las pérdidas térmicas de la estufa, que son menores en el caso de la estufa mejorada por la mejor aislación térmica que proporciona tener los calentadores solares en el techo y en menor medida por el flujo de calor desde los colectores a la estufa por la diferencia de temperatura. El inicio de las etapas de secado se aprecia claramente porque se separan las temperaturas del pleno inferior y superior. La unidad de calentamiento toma el aire ahora desde los calentadores solares y se abren ventanas en el frente de la estufa para evacuar aire húmedo. La temperatura del pleno superior disminuye debido al efecto de enfriamiento por evaporación que produce el secado de las hojas. Hacia la última mitad del proceso ambas temperaturas tienden a ser iguales en la medida que se uniformiza el secado de las hojas de tabaco. La última etapa del curado se realiza a 70 ºC de temperatura, para el secado de las nervaduras. Mientras las hojas ya están deshidratadas, la circulación de aire entre las mismas aumenta llevando a la homogenización de la temperatura.

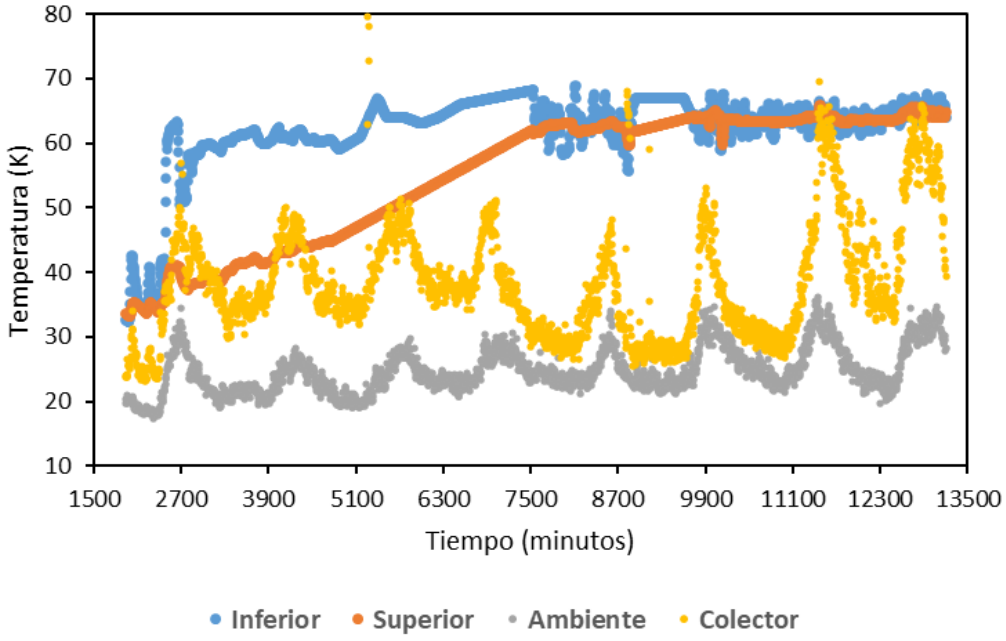


Figura 8: Temperaturas registradas en una estufada completa de la campaña 2023-2024

Ahorros estimados con el sistema propuesto

En la Figura 9 se muestra el ahorro energético producido en función del tiempo utilizando la Ec. (1) para la etapa de recirculación y la Ec. (2) para las etapas de secado. Los puntos de alta eficiencia, incluso cercanos a 1, corresponden a un desfase entre las respuestas temporales de los parámetros. También se muestra un ajuste lineal de los datos que tiene una muy suave pendiente negativa de 4E (-6) y una ordenada al origen de 0,42. En base a esta figura se puede afirmar que el sistema de precalentamiento del aire mediante el aprovechamiento del calor residual proveniente de los gases de combustión, y el soporte de calentamiento solar proporciona un ahorro energético y en el consumo de gas del orden del 40%, siendo esta una medida más bien ligeramente conservadora.

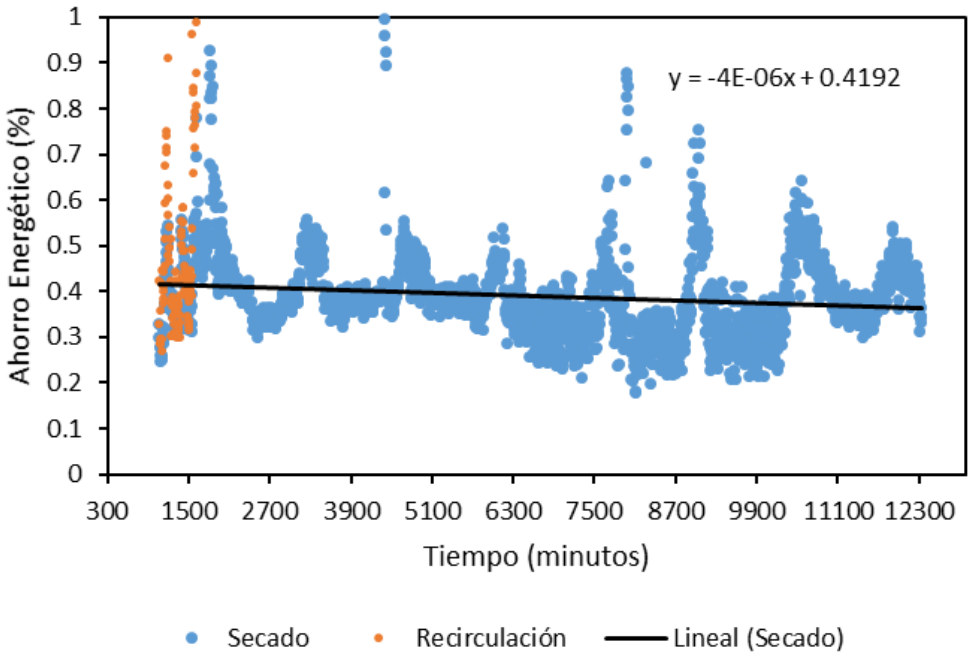


Figura 9: Ahorro calculado para la estufa intervenida

En el resultado que se muestra y en experiencias previas, se ha observado una reducción de los tiempos de curado. En este caso el proceso llevó aproximadamente 9 días frente a los 10 en promedio que se asume para las estufas convencionales. En términos técnicos esto implicaría una mejora desde el punto de vista del manejo logístico del emprendimiento, ya que se puede sumar una estufada (un curado de carga completa) extra por campaña.

Estudio Financiero

Los datos de costos de inversión se actualizaron mediante un relevamiento de los precios de mercado actuales, tanto de materiales como de la información disponible en cuanto a paritarias del rubro pertinente. Se estimó un aumento promedio del orden del 380 % con respecto a los valores del año anterior, y se consideró un cambio de U$D 1 = $884 según datos del Banco Nación Argentino con fecha 10/04/2024; esto lleva a un valor de inversión como se estipula en la Tabla 1.

Tabla 1. Insertar nombre de tabla y reordenar números de tabla

Inversión	*$*	*USD*
Materiales	1944800	2200
Mano de obra	1591200	1800
Total	**3536000**	**4000**

Consumos energéticos

Para el caso del consumo de gas, se actualizaron los valores de las tarifas locales mediante la nueva Resolución N°114/2024.

Tabla 2: Datos de producción de tabaco y consumo de gas por estufa del emprendimiento

Consumo energético gas estufada	850	m^3
Días de proceso	12	
Estufadas por campaña	10	
Nivel de producción (Tabaco curado) por campaña	8500	kg
Consumo energético de gas por campaña	8500	m^3

Tabla 3: Datos tarifarios para categoría de consumo SGP P2

Categoría	*SGP P2*
Cargo fijo mensual	$12729,95
Tarifa por m^3	$115,12

Tabla 4: Datos de gastos por consumo de gas

Gastos por consumo energético gas	
Gasto por campaña	$978520,00
Costo fijo por campaña	$152759,40
Costo anual en gas	$1131279,40
Costo anual en gas (USD)	USD 1279,73

Se realizaron dos tipos de análisis financieros. Por un lado, se estimó el tiempo de recupero de la inversión, a partir del ahorro logrado, con los valores actuales de las tarifas de gas (Fuente: GASNOR). Por otro lado, con el fin de referir los cálculos a valores comparables, se empleó la tarifa internacional de gas natural proveniente de la U.S. Energy Information Administration (www.iea.gov). Para el caso específico del gas natural se consideró la tarifa de consumidor final categoría comercial (USD/mil pies cúbicos), aplicado al promedio de los valores mensuales del último año (enero 2023 a enero 2024): USD10,65/mil pies cúbicos.

- Costo anual en gas a precio internacional: USD 3198,76

Ahorro estimado

Con las mejoras incorporadas a la estufa, se prevé un ahorro en el consumo de gas del orden del 40 %. Esto dado por el precalentamiento del aire que ingresa a la misma, debido a la recuperación del calor del humo de las tuberías del quemador y al aprovechamiento térmico de la radiación solar.

Tabla 5: Ahorros financieros estimados con la intervención propuesta

Ahorros en el consumo energético gas	
Ahorro por estufada	$11846,77
Ahorro por campaña	$129237,52
Ahorro por campaña (USD)	USD 442,77
Ahorro por campaña a precio internacional (USD)	USD 1407,45

Tiempo de recupero de la inversión

El tiempo de recupero de la inversión (TRI) es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de una inversión (Ec. (3)). El mismo se refiere al período de tiempo necesario para que los flujos de efectivo generados por una inversión igualen o superen el monto inicial de inversión realizado. En otras palabras, es el tiempo que se tarda en recuperar el dinero invertido a través de los ingresos generados por la inversión.

$$TRI = \frac{Inversión\ inicial}{Flujos\ anuales} \tag{3}$$

Considerando para el caso bajo estudio al ahorro como los beneficios generados por las mejoras de la estufa, y considerando el monto de la inversión requerida para lograr los mismos, surge que:

$$TRI = \frac{USD\ 4000}{USD 442{,}77} = 9{,}03\ campañas$$

Con precio internacional del gas

$$TRI = \frac{USD\ 4000}{USD 1407{,}45} = 2{,}84\ campañas$$

Cabe mencionarse que para los cálculos previos no se incorporó un ajuste por inflación ni por recategorización de consumidores en las tarifas de gas natural. Se entiende que, los tiempos de recupero de la inversión serían menores incluyendo en su cálculo los cambios en el cuadro tarifario argentino.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado un sistema innovador de precalentamiento de aire para estufas de curado "bulk curing", con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de gas natural. Los resultados obtenidos confirman que el sistema propuesto cumple con estos objetivos, demostrando mejoras significativas en la eficiencia del proceso. El sistema propuesto permite mejorar la eficiencia energética de la estufa disminuyendo el consumo de gas natural, y reduciendo el tiempo de curado, respecto de las estufas convencionales. En la etapa de mayor temperatura del proceso de curado, 70 °C, la diferencia de temperatura correspondiente al ahorro es de 30 °C y disminuye para las etapas iniciales. El sistema mejorado fue ensayado, en vacío a fines de 2023 y con carga durante la campaña 2024. El mismo permitió mejorar la eficiencia energética de una estufa "bulk curing" disminuyendo el consumo de gas natural en un 40%. Se pudo calcular el ahorro energético a partir de balances térmicos y la medición de temperaturas. Es decir, sin intervenir la red de gas. La metodología para la determinación del ahorro energético se probó y verificó en la estufa tanto sin carga como con carga de hojas de tabaco, obteniendo valores similares.

El análisis financiero del sistema revela que el TRI es de aproximadamente 8 campañas bajo el precio actual del gas en Argentina. Sin embargo, si se consideran las tarifas internacionales de gas natural para usuarios finales de categoría comercial (a abril de 2024), el TRI se reduce considerablemente, a 2,8 campañas. Este cambio en el indicador económico destaca la viabilidad financiera del sistema en contextos de precios internacionales y refuerza su potencial para plantear su difusión y adopción regional. Estos valores se obtuvieron considerando únicamente lo ahorros en gas natural, los mencionados indicadores mejoran de incluirse también los ahorros en electricidad y los cargos por impuestos.

REFERENCIAS

Altobelli F., Condorí M., Durán G., Díaz Russo G. (2011). Determinación de pérdidas térmicas estructurales en estufas de tabaco tipo bulck-curing en la provincia de Salta. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 15, 07.47-07.53.

Altobelli F., Vicente P., Díaz Russo G., Condorí M. (2013). Evaluación de sistemas de ahorro energético en estufas de curado de tabaco tipo bulk curing. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 17, pp.07.37-07.44.

Altobelli F., Condorí M., Durán G., Cruz I. (2023). Incorporación de un sistema de precalentamiento de aire en una Estufa de Curado de tabaco. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 27, pp. 287 – 298.

Bao Y., Wang Y. (2016) Thermal and Moisture Analysis for Tobacco Leaf Flue-curing with Heat Pump Technology. Procedia Engineering, 146, 481-493.

Cao G., Bao Y., Wu, Ch., Wang, Y. (2017). Analysis on efficiency optimization of tobacco leaf flue-curing process. Procedia Engineering, 205, 540–547. 10.1016/j.proeng.2017.10.413.

Cerquera Peña N., Ruiz Osorio Y., Pastrana Bonilla E. (2010) Evaluación del horno de curado de tabaco por convección forzada USCO-MADR. Ingeniería e Investigación, 30, 91-96.

Condorí M., Albesa F, Altobelli F., Duran G., Sorrentino C. (2020). Image processing for monitoring of the cured tobacco process in a bulk-curing stove. Computers and Electronics in Agriculture, 168, 105-113. 10.1016/j.compag.2019.105113.

Fara V. L., Grigorescu R., Marinescu P., Dogărescu V. (1985) Experimental results at a pilot solar station used for curing tobacco in a bulk-curing system — Economic implications. Energy in Agriculture, 4, 41-55

Jun L., Juan W., Zhentao Z., Luwei Y., Zhaomin L., Qingmin Y. (2012) Experimental study on performance of heat pump system for tobacco leaf flue-curing. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(25): 63-67

MINISTERIO DE HACIENDA, Presidencia de la Nación (2019). Informes de Cadenas de Valor. Tabaco, mayo 2019. ISSN 2525.0221.

Naga Raju, J. (1989) An energy efficient drying chamber for FCV tobacco curing process. Solar & Wind Technology, 6, 159-163.

Rodríguez Faraldo M. A. y Zilocchi H. O. (2012). Historia del cultivo de tabaco en Salta. Salta Capital: Ministerio de agricultura ganadería y pesca.

United Nations (2021). The Sustainable Development Report 2021.

Wang Q., Yuan Q. (2020). Energy-saving and emission reduction potential of the tobacco industry: A case study of China's 18 cigarette enterprises. Journal of Cleaner Production, 244, 118429.

Zhao J., Wang R., Wangb M., Huang X. (2019). Application of Heat Pump Energy-Saving Flue-Cured Tobacco Technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 252, Issue 3.

ENERGY SAVINGS OF AN AIR PREHEATING SYSTEM IN BULK-CURING TOBACCO BARNS

ABSTRACT: This paper presents the results obtained from the intervention of a bulk-curing barn used for curing 8 tons of Virginia tobacco in Vaqueros, Salta, aimed at reducing energy consumption by incorporating solar energy and improving the thermal efficiency of the process. The intervention included installing an air preheating system on the barn roof, consisting of solar collectors and heat recovery from the burner's exhaust. Between 2022 and 2024, tests were conducted on the modified barn both in unloaded conditions and during tobacco leaf curing. The results show a gas consumption reduction of approximately 40% for a complete curing cycle with the incorporation of the proposed preheating system. Considering the necessary investment costs and gas savings for the entire curing season, the investment payback period is around 2.8 seasons, based on international gas rates. These results demonstrate the technical and financial feasibility of the proposed system in the context of unsubsidized tariffs.

Keywords: tobacco curing, energy efficiency, solar energy

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 209-220, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ETIQUETADO ENERGÉTICO, TERMOGRAFÍA Y MEDICIONES DE UNA CABAÑA TURÍSTICA DE MIRAMAR DE ANSENUZA, CÓRDOBA. CONSTRUCCIÓN DE MEJORAS

Lautaro Oga Martínez[1], Halimi Cristina Sulaiman[2], María Paz Sánchez Amono[3]
[123]Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Tel. 0351-4894442
[1]e-mail: lautaro.ogamartinez@gmail.com

RESUMEN: El Ministerio de Ciencia y Técnica de Córdoba Argentina detectó la necesidad de mejorar sustancialmente la eficiencia energética en el sector turístico de Miramar de Ansenuza. Se concretó el Proyecto de transferencia tecnológica *Ahorro y Eficiencia Energética en el Sector Turístico. Soluciones técnicas, arquitectónicas y urbanas sustentables*. El objetivo general es *mejorar las prestaciones térmico-energéticas de hoteles, departamentos y cabañas locales mediante la aplicación y materialización de múltiples estrategias de diseño bioclimático para sentar las bases de una transformación de la oferta turística desde una perspectiva sustentable*. En este artículo se analiza una cabaña de madera de dos plantas, modelada con la herramienta de etiquetado energético, imágenes termográficas y mediciones de temperatura y humedad relativa interiores con data loggers en condiciones reales de uso. Basado en los resultados obtenidos, se propusieron y construyeron mejoras. Estas modificaciones logran un ahorro calculado del 60 % respecto al original.

Palabras clave: eficiencia energética, sector turístico, etiquetado, mejoras constructivas.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido a los altos costos energéticos sumados al contexto inflacionario, es de vital importancia emplear de manera correcta la energía en los edificios. Esto es especialmente importante para los prestadores de servicios turísticos donde un consumo energético excesivo en climatización tiene un impacto negativo en el porcentaje del beneficio percibido. Según ANDIMA (Asociación Nacional de Industrias de Materiales Aislantes, 2022), el 50% del consumo de energía en los hogares de Argentina se destina a la climatización de los ambientes. En promedio, significa que la mitad del costo de energía que paga el usuario corresponde a refrigerar o calefaccionar su vivienda (Ámbito Financiero, 2022).

Teniendo en cuenta el paradigma de la construcción sustentable, a la hora del diseño, los profesionales deben tener en cuenta el costo energético de funcionamiento de los edificios proponiendo el empleo de materiales alternativos (Sulaiman, et al. 2023). El Proyecto marco de transferencia tecnológica *Ahorro y Eficiencia Energética en el Sector Turístico. Soluciones técnicas, arquitectónicas y urbanas sustentables*, (financiado por Proyecto Federal de Innovación 2023) tiene como objetivo general *mejorar las prestaciones térmico-energéticas de hoteles y cabañas localizados en el municipio Miramar de Ansenuza Argentina mediante la aplicación y materialización de múltiples estrategias de diseño bioclimático que sirvan para sentar las bases de una transformación de la oferta turística desde una perspectiva sustentable.* Miramar de Ansenuza, busca una disminución significativa de sus consumos energéticos a través de la exploración de alternativas que le permitan avanzar hacia la sustentabilidad dado que la localidad es una zona sin acceso a la red de gas natural y su único vector energético es la electricidad. El empleo de artefactos para climatizar es eléctrico, los cuales presentan un alto consumo de energía.

El potencial de ahorro es factible de ser logrado a través de mejoras edilicias, toma de conciencia de sus residentes, como así también de los turistas. Cabe mencionar que, parte de la demanda puede ser cubierta por la incorporación de fuentes de energía renovable. Los objetivos específicos del proyecto marco incluyen el relevamiento y registro fotográfico de los posibles casos testigos, selección de los mismos, auditoría energética, planificación y construcción de mejoras, capacitaciones sobre el desarrollo sostenible del turismo local y uso de herramientas para mejorar las ordenanzas locales, entre otras actividades.

La etiqueta de eficiencia energética en viviendas permite determinar un índice de prestación energética (IPE) expresado en kWh/m^2 año y así clasificar al inmueble en una escala de A (más eficiente) a la G (menos eficiente), convirtiéndose en una herramienta más de decisión para el usuario, a la hora de comprar, vender o alquilar. A nivel nacional, se establecen lineamientos generales y definen criterios unificados; genera herramientas para la implementación respaldada por los organismos técnicos nacionales (Ministerio de Minería y Energía de la Nación, 2020). En el caso de Córdoba las autoridades de la provincia firmaron el convenio de adhesión al Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas (PRONEV) recién a fines de agosto del 2023 y aún no ha determinado sus casos pilotos y por ende no ha definido su propio IPE. Cabe resaltar que este proyecto pretende aportar casos para la determinación de dicho índice. A nivel municipal dicha herramienta tiene por objetivo actuar como un instrumento para la planificación urbana, establecer estándares mínimos en los códigos de edificación, e incluso, una vez que sea implementado, otorgar los permisos y certificaciones a aquellas edificaciones que hayan solicitado la etiqueta.

El objetivo del presente trabajo es evaluar mediante herramientas de diagnóstico (relevamiento, mediciones e imágenes termográficas) y el aplicativo del etiquetado energético nacional de viviendas, una cabaña en sus condiciones reales de uso (CCB). En base a los resultados obtenidos proponer un conjunto de mejoras (CCM), y construirlas.

La CCB es uno de los cuatro casos testigo del proyecto marco: cabaña de madera de dos plantas. Como primer paso, se utilizaron herramientas de diagnóstico: relevamiento, toma de imágenes termográficas interiores y exteriores; y mediciones de temperatura y humedad relativa interior con data loggers. Luego, mediante el aplicativo del Etiquetado Energético de Viviendas (EEV) se modeló la CCB determinando sus características técnicas y prestaciones energéticas. En base a los resultados obtenidos, se propusieron mejoras (CCM). Por último, se diagramó un plan de obra y actualmente, las mejoras en la cabaña (CCM) se han completado en un 80% y se continúan las mediciones higrotérmicas interiores.

METODOLOGÍA

La metodología empleada consiste en las siguientes etapas: 1) relevar en conjunto con las mediciones higrotérmicas y fotos termográficas cada caso testigo; 2) modelar, evaluar y proponer mejoras de la CCB, mediante el Software del Etiquetado de Vivienda; y 3) plan de obra y construcción de las mismas.

Etapa 1: Se realizó el relevamiento, se armó un legajo técnico, se iniciaron las mediciones de temperatura y humedad y se tomaron imágenes termográficas.

Al no existir planos en formato papel ni digital, se realizó un exhaustivo relevamiento, mediante el empleo de herramientas métricas y visuales (toma de medidas e imágenes) para poder confeccionar los planos. Luego, se instaló instrumental de medición (Data Loggers marca Elitech RC-4HC) en el interior de la cabaña durante la duración del proyecto marco, midiendo las condiciones de temperatura y humedad relativa cada 30 minutos en dos ambientes: estar-comedor en planta baja (PB) y dormitorio en planta alta (PA). Esto sirve para determinar los puntos críticos de las condiciones interiores. Las mediciones de las condiciones climáticas exteriores fueron obtenidas de la estación meteorológica local.

La toma de imágenes termográficas se emplea para diagnosticar en forma rápida el desempeño térmico de edificios. Es una tecnología de investigación no destructiva y se ha utilizado durante los últimos 30 años. El funcionamiento de la cámara termográfica se basa en un detector que capta la radiación infrarroja emitida por los objetos e interpretada por la cámara. De la imagen obtenida, se aprecian varios

colores que corresponden con las diferentes señales de radiación infrarroja de onda larga emitida, absorbida y reflejada que provienen del elemento analizado. Resulta ser un método efectivo, conveniente y económico cuando se busca detectar características ocultas de estructuras de edificios como formas preexistentes, cambios estructurales, HVAC (Heating, Ventilation, Air Condition), aislaciones, etc. (Rocha, Santos y Póvoas, 2018). En este caso se empleó para determinar puentes térmicos, mapear humedad, verificar aislamientos y determinar las temperaturas superficiales, tanto exteriores, como interiores. La cámara termográfica es marca HTI, Modelo HT-19.

Etapa 2: El Etiquetado Nacional de Viviendas prevé las siguientes etapas: a) estudio de la documentación; b) relevamiento; c) definición del sistema de estudio; d) carga de datos; e) evaluación de resultados; f) emisión de la etiqueta (Manual de Aplicación Práctica para Certificadores, 2020).

a) Se analiza la documentación disponible.
b) En este relevamiento se determinan aquellos ambientes que son climatizados y no climatizados, las características térmicas de las envolventes, los obstáculos de las sombras, tanto de los envolventes, como de las aberturas, se discriminan los espacios según su funcionalidad y las instalaciones (calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria e iluminación).
c) Se identifican y clasifican los ambientes y espacios, se definen las zonas térmicas, se reconocen e identifican la envolvente térmica y se detectan los elementos internos de dichas zonas.
d) Se procede a realizar la carga de datos en el aplicativo.
e) Se evalúan los resultados.
f) Se emite la etiqueta.

Aspectos considerados en la simulación
Si bien el caso de análisis no es una vivienda de uso residencial permanente, su ocupación es durante todo el año funcionando de manera similar. Cabe destacar que la exigencia predeterminada de condiciones interiores de confort que propone la Etiqueta es en el rango entre 20 y 26 °C, que coincide con las exigencias propias de esta tipología turística.

Por otro lado, las condiciones climáticas de Miramar no se asemejan a las mediciones que incluye el aplicativo de la estación meteorológica del Observatorio de la ciudad de Córdoba. Por esta razón, se tomaron los datos de la ciudad de Ceres, una ciudad ubicada en el noroeste de la provincia de Santa Fe, que cuenta con características climáticas y relieve geográfico muy similares. Tanto Miramar como Ceres están contemplados dentro de la subzona IIb (IRAM 11603). Para esta subzona se detallan las siguientes recomendaciones de diseño: empleo de colores claros en paredes exteriores y techos; gran aislación térmica en techos y en paredes orientadas al este y al oeste. Todas las superficies deben estar protegidas de la radiación solar. Para las ventanas, si es posible, no orientarlas al este o al oeste y minimizar su superficie. La ventilación cruzada debe ser fundamental, dada la influencia benéfica de la velocidad del aire, para disminuir el "disconfort". En esta zona, el invierno reviste muy poca importancia.

En el apartado Análisis de resultados, se determinan cuáles son las modificaciones que mayor impacto producen en cuanto a la eficiencia energética sin modificar sustancialmente la estructura ni la estética de la misma (requisitos pedidos por parte de los privados y el municipio local).

Etapa 3: Se confeccionó un plan de obra para llevar a cabo las construcciones de mejora (CCM) en cuanto a: aislaciones, reducción de superficie vidriada en envolventes, e infiltraciones. Hasta el momento, se han efectuado el 80 % de las mismas. Esto se evidencia mediante el relevamiento fotográfico del apartado Caso de propuesta de mejoras.

DESARROLLO

Etapa 1: Relevamiento, Mediciones y Fotos termográficas

Caso de estudio: Cabaña Caso Base (CCB)
El caso de análisis es una cabaña de dos plantas, localizada en la ciudad de Miramar de Ansenuza (30°54′53″S 62°40′12″O, Córdoba, Argentina) (Fig. 1). La ciudad de Miramar se encuentra en el noreste

de la provincia de Córdoba, en la zona bioclimática IIa (cálido) según la Norma IRAM 11603 (1996). En esta zona, el verano es la estación crítica, con valores de temperatura media sobre los 24 °C y temperatura máxima promedio superior a 30 °C. Las mayores amplitudes térmicas ocurren en esta época del año, con valores de 16 °C como máximo. El invierno es más seco, con bajas amplitudes térmicas y temperaturas medias comprendidas entre 8 °C y 12 °C.

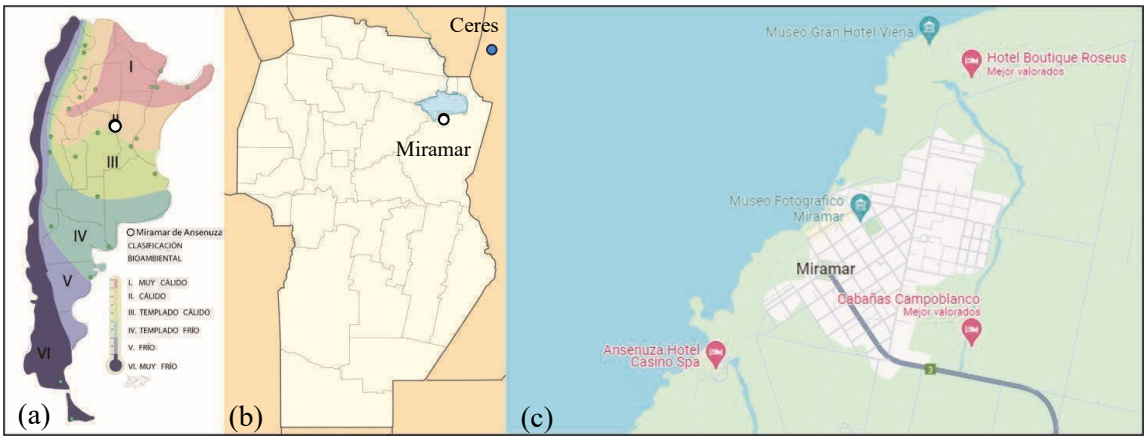


Figura 1: Ubicación en el mapa bioclimático (a), Provincia de Córdoba ubicación de Miramar y Ceres (b) y ciudad de Miramar (c). Fuente: elaboración propia (E.P).

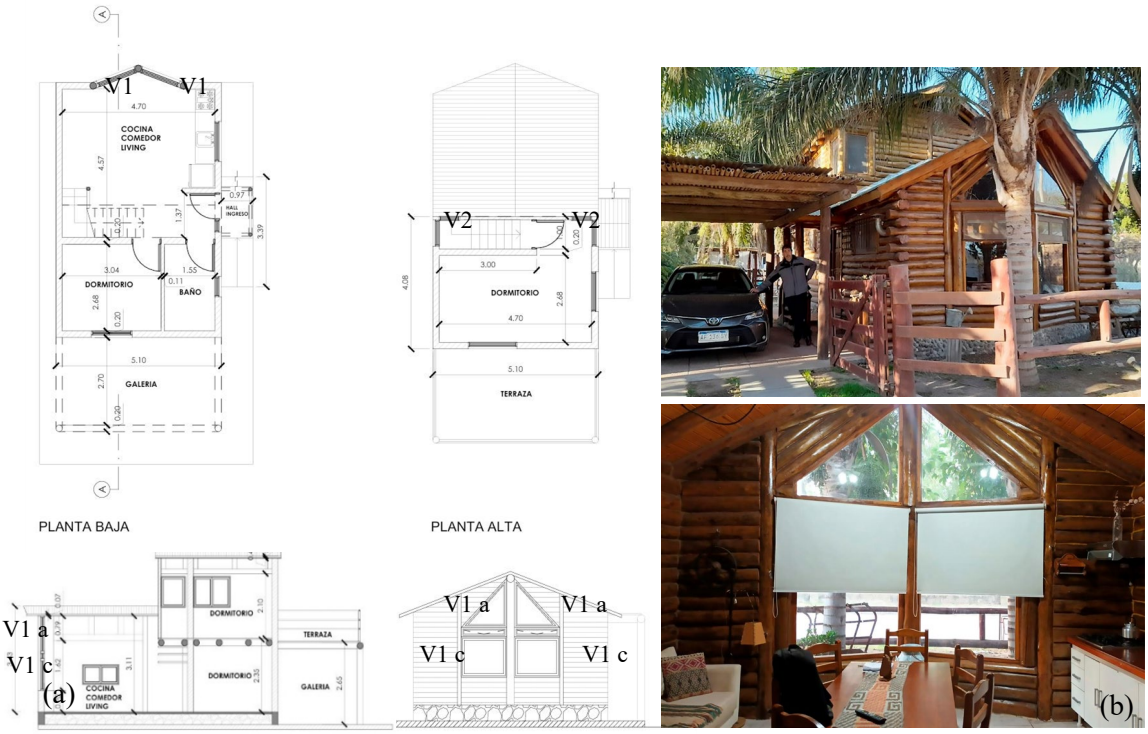


Figura 2: Planos (planta baja y alta), fachada y corte de CCB (a). Imágenes del exterior e interior de la cabaña (b). Fuente: E.P.

En la CCB, tanto los muros interiores y exteriores están construidos con troncos de madera tipo eucalipto de un diámetro promedio de 200 mm. Su cubierta está realizada con machimbre, espuma aislante de 5mm y chapa sinusoidal verde y las aberturas son de tipo tradicional de madera con vidrio de 3 mm. La planta baja comprende una cocina-comedor (al noroeste), un dormitorio (al suroeste) y un baño (al sur). Hacia el exterior, una galería cubierta con la terraza de planta alta (sureste). En la planta superior se encuentra una habitación más (sureste) (Fig. 2). En la zona, existen numerosos complejos de estas características, sin ningún tipo de certificado de aptitud técnica, planos ni características específicas. El

mantenimiento anual de protección de la madera y renovación de juntas, ha permitido un uso continuo por más de 12 años.

Mediciones de temperatura interior en CCB

Como parte del diagnóstico, se realizan mediciones cada 30 minutos en las zonas isohigrotérmicas de cada caso testigo. En este caso, se colocaron el 29 de diciembre 2023 2 data loggers uno en planta baja y otro en planta alta con un registro de temperatura de bulbo seco y humedad relativa interiores con un lapso de 30 minutos durante la duración del proyecto de transferencia tecnológica que da marco al presente trabajo.

En el siguiente análisis se comparan las mediciones de temperatura interior de la cocina comedor (azul) y del dormitorio de planta alta (rojo) de la cabaña. La figura 3 muestra las curvas de temperatura de ambos locales junto a la temperatura exterior para el día 12 de enero del 2024. Se observa que las temperaturas del dormitorio de planta alta ascienden a partir de las 00:09 a.m. hasta las 5:39 a.m. donde se realizó una ventilación natural provocando un descenso de la temperatura hasta los 28 °C. Desde ese punto, la temperatura vuelve a subir hasta las 10:09 a.m. donde alcanza un pico máximo de 33,8°C. Después de las 11:09 p.m. la temperatura comienza a disminuir debido a la puesta en marcha de un equipo de aire acondicionado tipo split 3000 frigorías clase A, alcanzando los 25°C una vez que entra en régimen a las 18:39 p.m. manteniéndose dentro de la zona de confort (20°C a 26°C) resaltada en el gráfico. Se observa que dicho equipo tarda hasta 9 horas en entrar en régimen disminuyendo la temperatura interior 7,2 °C.

En cuanto a la cocina comedor de la planta baja, la temperatura es más estable durante todo el día mostrando una curva de distribución de temperatura normal cuyo pico se da a las 10:39 a.m. alcanzando los 31°C. Del mismo modo que el dormitorio de planta alta se registra el encendido del aire acondicionado, equipo similar al descrito anteriormente. Debido a las protecciones solares que presenta la planta baja (vegetación y galería lateral) no se producen picos en la temperatura interior, como sí ocurre en el dormitorio superior que se encuentra totalmente expuesto. No obstante, se observa que la disminución de temperatura en ambos locales comienza a la misma hora resaltada con línea de trazo en la figura 3, coincidiendo con el encendido de los equipos de climatización.

En relación a la temperatura exterior, ésta se encuentra dentro de la zona de confort desde las 00:09 a.m. hasta las 10:00 a.m. y mantiene esta condición por debajo de las interiores hasta las 14:09 p.m. donde la temperatura alcanza los 29,3 °C. Desde las 14:09 p.m., tanto la cocina -comedor, como el dormitorio de planta alta se encuentran por debajo de la temperatura exterior la cual alcanza un pico máximo de 32 °C a las 17:09 p.m.

El comportamiento térmico en la cocina-comedor se asemeja a la temperatura exterior, presentando menores variaciones debido principalmente a la presencia de protecciones solares tanto propias como del entorno inmediato donde el retardo es de 6 h observado desde el pico de temperatura entre las 11 y las 17 h.

En contraste, el dormitorio experimenta mayores variaciones de temperatura, con picos significativamente más elevados, atribuidos a una envolvente expuesta directamente a la radiación solar y caracterizada por una excesiva superficie vidriada que favorece la acumulación de calor durante el día. Cabe destacar que la temperatura máxima alcanzada en el dormitorio es 2.8 °C mayor que en la cocina comedor y 1.9 °C superior a la exterior.

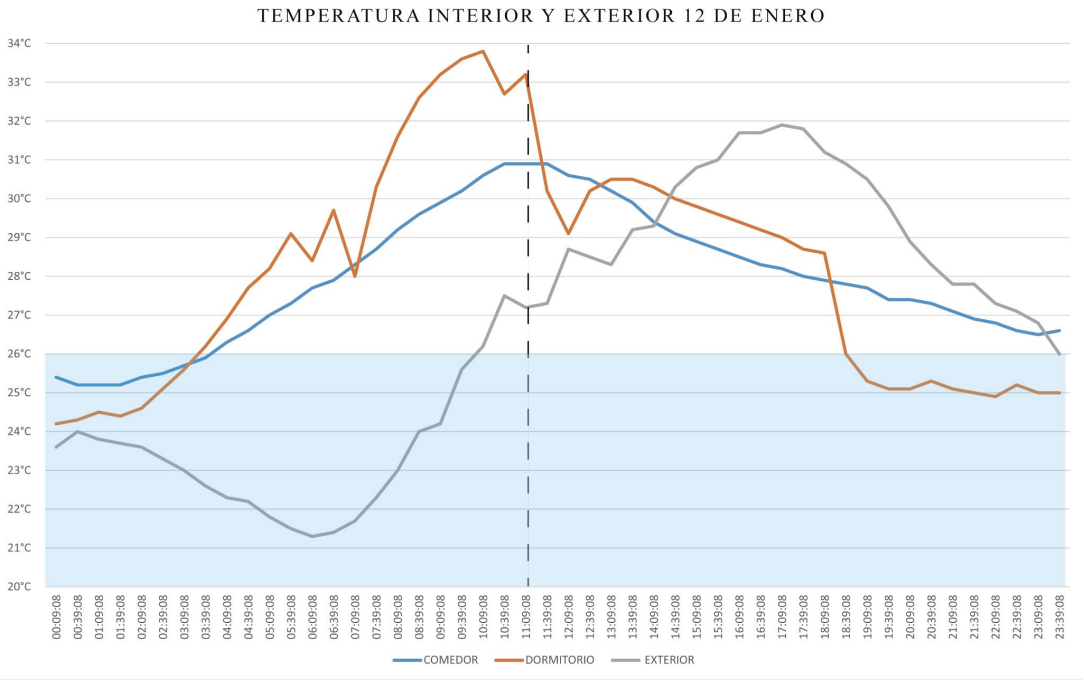


Figura 3: Temperatura interior y exterior 12/01/24 de CCB. Fuente: E.P.

Imágenes termográficas en CCB

La figura 4 muestra las imágenes termográficas obtenidas, tanto del exterior, como del interior de la cabaña. Como se observa en (a) tomada durante el mes de enero, la temperatura en la vegetación (palmeras tipo Pindó) es de 17,4 °C, mientras que la temperatura superficial exterior de la pared (troncos de eucalipto) oeste oscila entre 54 y 59,5 °C produciendo en la planta alta un sobrecalentamiento extremo. Cabe recordar que esta cabaña no cuenta con ningún material aislante en las paredes, y sólo en la cubierta existe una capa de espuma aislante con aluminio de 5 mm.

La figura 4b, muestra las superficies interiores de la cubierta del dormitorio en planta alta. Se observa que el machimbre alcanza un pico de 41,1 °C, debido principalmente a la irregularidad del aislante y su espesor que no alcanza para brindar una protección térmica adecuada. En contraposición, las vigas presentan una temperatura inferior al igual que la pared sur donde se encuentra la cabecera de la cama cuya temperatura ronda los 32°C, siendo aproximadamente 9 °C menor que la temperatura interior de la cubierta. No obstante, esta temperatura se encuentra al menos 6°C sobre los 26°C recomendados según diferentes normas.

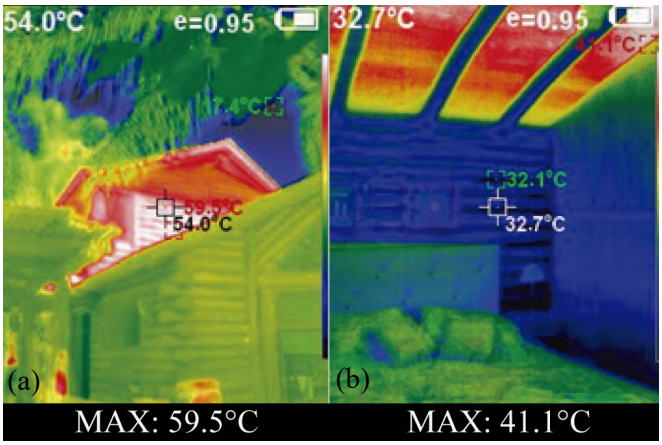


Figura 4: Imagen termográfica exterior (a) e interior (b) de la CCB. Fuente: E.P.

Etapa 2: Etiquetado energético. Comparativa CCB y CCM
Se detallan los resultados obtenidos:

Los requerimientos específicos de energía (Tabla 1), los cuales determinan el valor del IPE (Índice de Prestaciones Energéticas) son un valor característico de la vivienda que representa el requerimiento de energía primaria que tendría la normal utilización de la misma, durante un año y por metro cuadrado de superficie, para satisfacer las necesidades de calefacción en invierno, refrigeración en verano, producción de agua caliente sanitaria e iluminación (Manual de Aplicación Práctica para Certificadores, 2020). La cabaña caso base (CCB) presentaba un valor de IPE de 223.

En base a los resultados de la etapa 1 y 2, se realizan en conjunto con el equipo de ejecución del proyecto y los profesionales de Obras Públicas y privadas de la Municipalidad ya capacitados, las propuestas de mejoras constructivas e incorporación renovables.

Ideas de Mejoras Propuestas
Para la cabaña caso mejorado (CCM) se proponen las siguientes mejoras:
1. *Añadir celulosa proyectada con adhesivo en la cubierta:* Este material es un aislante térmico, acústico y ecológico que consiste en una mezcla de cartón reciclado y papel de periódico triturados. Se emplea también además para evitar puentes térmicos e incluso para incrementar las resistencias al fuego de estructuras de madera.
2. *Reducción de la superficie vidriada fija.* Con el software del Etiquetado Energético se simula la CCM donde se propone la eliminación de dos ventanas V2 (figura 2a), en planta alta.
3. *Incorporación de DVH selectivo con protección solar*. En la V1a y, por último, en la V1 se propuso la colocación de cortina de madera exterior.
4. *Idem anteriores + Colector solar para Agua Caliente Sanitaria:* Por último, se simularon los valores de la incorporación de todas las variantes anteriores con un colector solar para ACS.

A continuación, se muestran los resultados de mejoras en la transmitancia media de las envolventes (figura 5) que es la medida de la cantidad de calor que puede pasar a través de un material en un período de tiempo determinado. En cuanto a la cubierta, se observa en la Tabla 1 La CCB presenta un valor de 3,35 W/m^2K.

Tabla 1: Transmitancia media en envolventes

Transmitancia térmica media (W/m^2K)	Cabaña caso base (CCB)	Cabaña caso mejorado (CCM)
En cubierta	3,35	0,75
En aberturas	4,36	2,91
En paredes	1,24	1,15
En piso	0,52	0,52

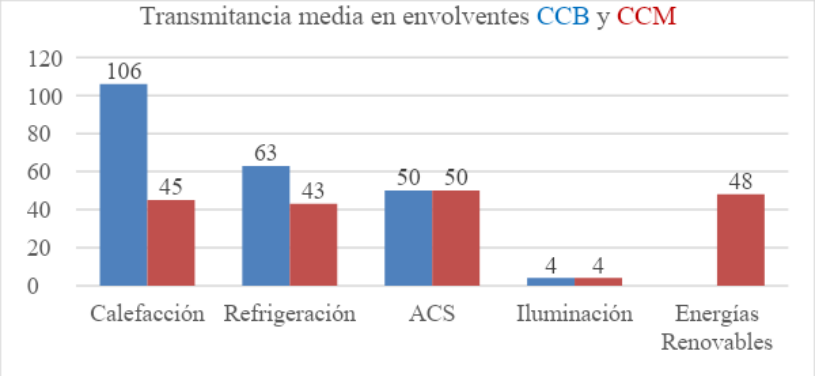


Figura 5: Transmitancia media en envolventes CCB y CCM. Fuente: E.P.

Al incorporar la mejora constructiva 1, el valor en el CCM es de 0,75 W/m^{2}K. Es decir, mejoró su valor en un 77 %. La transmitancia térmica media de las aberturas de la CCB era de 4,36 W/m^{2}K y en la CCM mejoró en un 33,20 %, con valor es de 2,91 W/m^{2}K. Dado que no se podía modificar la estética de la cabaña se redujo el albedo con un barniz apenas más claro. En lo que respecta al piso, el valor es el mismo tanto como para CCB como para CCM.

Impactos de las mejoras

La incorporación de 1 logra disminuir la demanda energética de 223 a 149 kWh/m^2 año equivalente a un 33,18 % de disminución del valor de IPE. Las ideas 2 y 3 se aplican en conjunto logrando una reducción de 223 a 213 kWh/m^2 año, es decir un 4,48%. Luego con la propuesta de mejoras 4, se logró reducir el IPE para la cabaña caso mejorado (CCM) a 93 kWh/m^2 año. Su valor mejoró casi un 60 %, donde un 21,5% son atribuibles a la incorporación del colector solar para ACS (ver Tabla 2).

Tabla 2: IPE y requerimientos específicos de energía CCB y CCM

	CCB			CCM		
	Requerimientos específicos de energía (kWh/m^{2}año)					
	Útil	Neta	**Primaria**	Útil	Neta	**Primaria**
Calefacción	32	32	**106**	14	14	**45**
Refrigeración	60	19	**63**	42	13	**43**
Producción de ACS	8	15	**50**	8	15	**50**
Iluminación	-	1	**4**	-	1	**4**
Requerimiento específico global de energía			**223**			**142**
Contribución específica de energías renovables			**0**			**48**
Índice de Prestaciones energéticas (IPE)			**223**			**93**

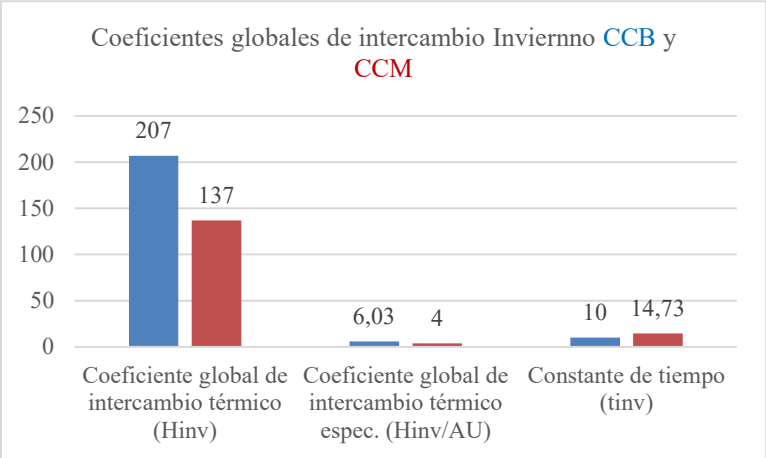


Figura 6: Coeficientes globales de intercambio CCB y CCM en invierno. Fuente: E.P.

Al realizar un análisis comparativo entre los coeficientes globales de intercambio térmico de CCB y CCM se observa, por un lado, que en invierno (figura 6) el Hinv se redujo un 33,8 %; el Hinv/AU disminuyó un 33,67 % y la Tinv aumentó 4,73 h. Por otro lado, en verano (figura 7) el Hver se redujo un 23,39 %; el Hver/AU disminuyó un 23,43 %; mientras que la Tinv aumentó 1,54 h. Se destaca que el impacto de las mejoras en los coeficientes antes mencionados es más significativo en la temporada invernal que en la estival. A continuación, el análisis comparativo se resume en la tabla 3.

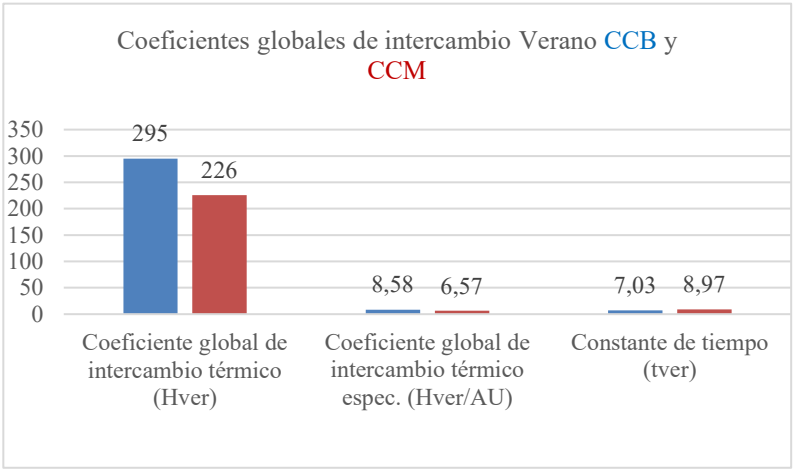


Figura 7: Coeficientes globales de intercambio CCB y CCM en verano. Fuente: E.P.

Tabla 3: Coeficientes globales de intercambio

	CCB	CCM
INVIERNO		
Coeficiente global de intercambio térmico *(H_{inv})*	207 W/K	137 W/K
Coeficiente global de intercambio térmico espec. ($H_{inv/AU}$)	6,03 W/m^{2}K	4,00 W/m^{2}K
Constante de tiempo *(t_{inv})*	10,00 h	14,73 h
VERANO		
Coeficiente global de intercambio térmico *(H_{ver})*	295 W/K	226 W/K
Coeficiente global de intercambio térmico espec. ($H_{ver/AU}$)	8,58 W/m^{2}K	6,57 W/m^{2}K
Constante de tiempo *(t_{ver})*	7,03 h	8,97 h

En calefacción, la CCB tiene un requerimiento de energía primaria para calefacción de 106 kWh /m^{2}año, mientras que la CCM es de 45 kWh /m^{2}año. Es decir, en la cabaña mejorada se redujo un 57,55 %. Para la refrigeración, el requerimiento de la CCB es de 63 kWh /m^{2}año y el de la CCM es de 43 kWh /m^{2}año. Es decir, una disminución del 31,75 %. En la producción de ACS, el requerimiento tanto de la CCB como la de la CCM es del mismo valor, es decir 50 kWh /m^{2}año. Lo mismo sucede con la iluminación, ya que en ambos casos el valor es similar. Al hacer referencia a la contribución específica de energías renovables, la CCB no contaba con ningún dispositivo. Para el CCM se propone la incorporación de un colector solar, el cual requiere kWh /m^{2}año de energía primaria (Fig. 8).

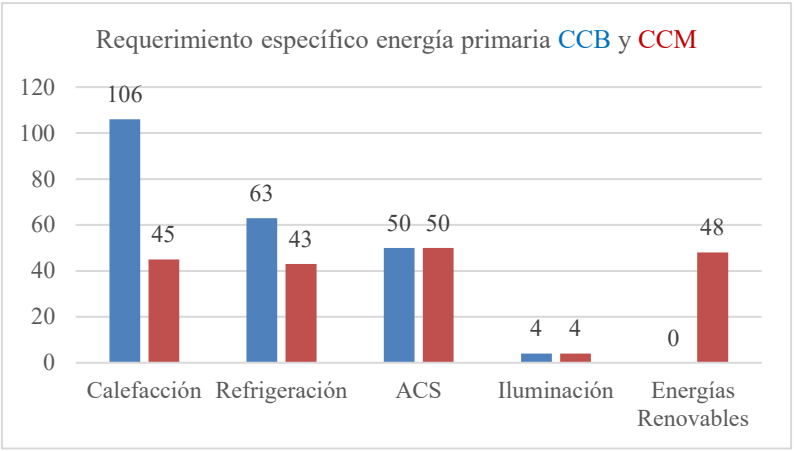


Figura 8: Requerimiento de energía primaria en CCB y en CCM Fuente: E.P.

Etapa 3: Plan de obra y construcción de mejoras CCM

Actualmente, se cumplimentaron tres de las cuatro propuestas de mejoras. En primer lugar, se añadió aislante de celulosa en la cubierta (Fig. 9). Este material requiere menos energía para producirse en comparación con otros materiales de aislamiento como la espuma de poliuretano. Este material se colocó mediante la técnica proyectado con adhesivo. Es una proyección de una manta uniforme ideal para rehabilitar viviendas o edificaciones con escasa o nula aislación térmica y/o acústica con cielo raso existente. De esta manera se disminuye la liberación de gases de efecto invernadero en el medio ambiente (EcoAislación, 2024). Si bien en el software del Etiquetado Energético se realizó la simulación de la CCM donde se propusieron varias modificaciones, se han renovado los vidrios de las ventanas, solucionado infiltraciones en las carpinterías y cubierta y se colocaron burletes dobles de goma en las ventanas y puertas. Estos se adaptan sin problema, y al ser de diferentes espesores se sellan a la perfección. A futuro, se prevé la incorporación de un colector solar en la cubierta.



Figura 9: Proceso de colocación de celulosa en cubierta y lámina de membrana aislante hidrófuga. Fuente: E.P.

CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir el cumplimiento del objetivo del artículo. Los resultados son auspiciosos. La metodología aplicada en cuanto a relevamiento, auditoría y mediciones permiten un diagnóstico del comportamiento térmico energético en condiciones reales de uso que, en conjunto con la herramienta del etiquetado disponible, permite analizar el comportamiento de las envolventes y proponer soluciones de mejoras por etapas proporcionando una visualización mediante la etiqueta. La construcción de dichas mejoras propuestas y su continua evaluación permitirán observar si el impacto aquí calculado se verifica y los valores de las condiciones higrotérmicas interiores del caso testigo se acercan a la zona de confort sin el uso permanente del aire acondicionado.

Cabe destacar el incipiente y por ello novedoso uso de esta herramienta en la provincia, especialmente en municipios del interior como Miramar de Ansenuza. La provincia Córdoba se ha adherido recientemente al sistema de etiquetado nacional. Por esta razón, aún no existen proyectos piloto ni el valor del índice de prestaciones energéticas definidos. Se han iniciado tratativas para brindar a la Secretaría de Energía los datos obtenidos en el presente artículo como “caso testigo” para contribuir a la determinación del IPE de Córdoba. Las mediciones higrotérmicas detalladas y las fotos termográficas

aportan información relevante a la hora de definir el caso base. A su vez, la construcción de las mejoras y su continua evaluación le aporta un valor agregado para ser considerado como caso testigo.

Si bien la herramienta del Etiquetado es para viviendas de uso residencial, y este caso es una amplia cabaña de dos dormitorios que se utiliza durante todo el año con fines turísticos, el rango de confort exigido por la etiqueta entre 20 y 26°C, coincide con los estándares de esta tipología de alojamiento temporal. El uso de agua caliente sanitaria es similar también. En el verano (estación crítica) el relevamiento de ocupación supera los periodos continuos de más de 15 días ininterrumpidos, con una ocupación continua de diciembre hasta principios de marzo del presente año.

El cálculo del IPE representa una estimación de la energía primaria que demandaría la normal utilización de dicho inmueble durante un año y por metro cuadrado de superficie útil para satisfacer las necesidades asociadas a calefacción en invierno, refrigeración en verano, producción de agua caliente sanitaria e iluminación. La etapa 2 de modelado y simulación con el software del Etiquetado arrojó un IPE de 223 kWh/m^2 año. Posterior a la propuesta de mejoras, se logró reducir ese valor en la cabaña caso mejorado (CCM) a 93 kWh/m^2. Es decir, casi un 60 % menos de demanda energética, independientemente de la fuente de energía.

En las fotografías termográficas, donde se evaluó el comportamiento térmico de la CCB se evidenció el calor acumulado durante el día en el dormitorio de la planta alta (fotografía interna). Las imágenes tomadas desde el exterior tienden a revelar temperaturas homogéneas en las superficies. Si bien la cabaña se encuentra rodeada de vegetación, se observó una elevada temperatura en la cabaña. Con respecto a la Norma IRAM 11603 para la subzona IIb (Miramar y Ceres), para las modificaciones en la CCM se tuvieron en cuenta las recomendaciones propuestas. Una de ellas fue colocar aislación térmica en la cubierta. Para el caso de las ventanas, además de colocarse burletes, es necesario adquirir el hábito de realizar la ventilación cruzada, dada la influencia benéfica de la velocidad del aire, para disminuir el "disconfort".

Se recomendó anular dos paños fijos vidriados ya que este dormitorio cuenta ya con una puerta ventana con terraza privada y una ventana. Se concluye que las herramientas empleadas han cumplido el objetivo de analizar la edificación (cabaña) y proponer estrategias (mejoras) para reducir los consumos energéticos, y fomentar la adquisición de tecnología energéticamente eficiente.

Como actividad futura, solo resta instalar el colector solar que por devaluación del proyecto, no está contemplado actualmente en el proyecto. Este dispositivo es una alternativa utilizada para capturar la energía del sol y convertirla en calor para calentar agua. De todos modos, mediante el informe, se preve que en un futuro los dueños realicen la inversión.

Si el principal aporte del proyecto marco es la conjunción entre la capacitación de profesionales municipales y prestadores turísticos, con el diseño y construcción de mejoras en casos testigos para dar base a futuras ordenanzas, el presente trabajo representa un instrumento clave para aportar al cumplimiento de las metas propuestas.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

"*Ahorro y Eficiencia Energética en el Sector Turístico. Soluciones técnicas, arquitectónicas y urbanas sustentables en Miramar de Ansenuza",* financiado por el PFI (Proyecto Federal de Innovación 2023*)*. Monto total: $20.000.0000 (veinte millones de pesos argentinos) en conjunto con la Municipalidad de Miramar de Ansenuza y la Cámara de Comercio y Turismo de Córdoba.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de la Municipalidad de Miramar de Ansenuza, en especial al Intendente Sebastián Ianantuony y a los integrantes del Área Obras Públicas y Privadas por su colaboración en el proyecto.

REFERENCIAS

Ámbito Financiero (2022). Tarifas sin subsidio: como no superar 400 Kwh de energía. Diario Ámbito financiero. Recuperado de https://www.ambito.com/energia/tarifas/subsidios-como-no-superar-400-kwh-n5506553). 13 de agosto de 2022.

EcoAislación (2024). Disponible en https://www.ecoaislacion.com.ar/. Accedido el 08/08/24

Etiquetado de Viviendas (2024) Ministerio de Economía. Secretaría de Energía. https://etiquetadoviviendas.mecon.gob.ar/ (accedido el 23 de mayo de 2024).

IRAM 11603 (1996). Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico. Clasificación Bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.

Manual de Aplicación Práctica para Certificadores (2020). Programa Nacional de uso racional y eficiente de la energía (PRONUREE). Ministerio de Economía. Secretaría de Energía. Información disponible en https://eficienciaenergeticaargentina.mecon.gob.ar/

Rocha, J. H. A.; Santos, C.F. y PóvoaS, Y.V. (2018). Evaluation of the infrared thermography technique for capillarity moisture detection in buildings, Procedia Structural Integrity, vol. 11, pp. 107-113.

Sulaiman, H., Oga Martínez, L. y Filippín, C. (2023). ¿Utopía o realidad? Factibilidad de un proyecto de vivienda multifamiliar con materiales reciclados en el centro de Argentina. Revista 180, (51), 41-55. http://dx.doi.org/10.32995/rev180.Num-51.(2023).art-1006

ENERGY LABELING, THERMOGRAPHY, AND MEASUREMENTS OF A TOURIST CABIN IN MIRAMAR DE ANSENUZA, CÓRDOBA. CONSTRUCTION OF IMPROVEMENTS

ABSTRACT: The Ministry of Science and Technology of Córdoba, Argentina, identified the need to substantially improve energy efficiency in the tourism sector of Miramar de Ansenuza. This led to the implementation of the technology transfer project "Energy Saving and Efficiency in the Tourism Sector: Sustainable Technical, Architectural, and Urban Solutions." The general objective is to enhance the thermal and energy performance of local hotels, apartments, and cabins through the application and realization of multiple bioclimatic design strategies, laying the foundation for a transformation of the tourism offer from a sustainable perspective. This article analyzes a two-story wooden cabin modeled with the energy labeling tool, thermographic images, and measurements of indoor temperature and relative humidity using data loggers under real usage conditions. Based on the results obtained, improvements were proposed and implemented. These modifications achieve an estimated 60% savings compared to the original.

Keywords: energy efficiency, tourism sector, labeling, constructive improvements.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 221-232, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

COMPARACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN CLIMATIZACIÓN DE UN EDIFICIO EDUCATIVO CON Y SIN TECHO VERDE. ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Martín S. García[1], Natalia Muñoz[2], Luis I. Silva[1]
[1]Centro de Investigación y Transferencia Rafaela (CIT RAFAELA) – Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf) – Bv. Roca 989, 2300 Rafaela
Tel. 03492-501155 e-mail: martin.garcia@unraf.edu.ar – luissilva@unraf.edu.ar
[2]Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro Provincia de Buenos Aires (CIFICEN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires − Pinto 399, 7000 Tandil
e-mail: nmunoz@ifas.exa.unicen.edu.ar

RESUMEN: El ahorro de energía eléctrica en edificios se ha convertido en un desafío clave en busca de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático. En la última década, la instalación de techos verdes como estrategia ha avanzado fuertemente en diferentes ciudades del mundo, mientras que en Argentina adquiere mayor visibilización y aceptación de la sociedad. En este estudio, se analiza el impacto de la implementación de techos verdes en el consumo energético de la climatización de un edificio de la Universidad Nacional de Rafaela. Mediante el programa de simulación *EnergyPlus*, se compara el consumo de energía de dos escenarios: uno con techo verde y otro sin él. Los resultados se evalúan para los meses de mayor y menor temperatura externa, y para el ciclo anual completo, proporcionando una perspectiva detallada sobre la efectividad de los techos verdes en la región. Se establece la necesidad de medir el consumo de energía de los equipos de climatización, así como las temperaturas y humedades internas a diferentes alturas y en zonas térmicas de interés.

Palabras clave: techo verde, simulación, EnergyPlus, eficiencia energética, campus universitario, edificio, terraza verde.

INTRODUCCIÓN

El sector Edificios es uno de los principales responsables de la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contribuyendo aproximadamente con el 30% a nivel global. Según el IPCC (2022), los GEI son una de las principales causas del cambio climático. Los efectos adversos de este fenómeno, como el aumento de la temperatura y olas de calor cada vez más frecuentes, generan desafíos en la búsqueda de construcciones que permitan un ahorro energético, (Hassid, 2011), así como la implementación de diversas estrategias pasivas o de bajo consumo energético para la refrigeración y calefacción en el interior de los edificios (Breesch y Janssens, 2010; Yi et al., 2014; Zhou, 2014; Santamouris, 2016).

Dentro de las alternativas, la construcción de techos verdes se ha convertido en una opción concreta en determinados lugares (Berardi, 2016), y su implementación continúa en aumento, debido a los diversos beneficios que ofrece, tanto a nivel particular como comunitario (Castleton et al., 2010). Ciudades de Alemania y Países Bajos en Europa; así como de Canadá, Estados Unidos y Brasil en América, promueven este tipo de construcciones a través de marcos legislativos, ya sea mediante incentivos, obligaciones impositivas o subsidios a la construcción (Liberalesso et al., 2020). Si bien la incorporación de techos verdes se realiza principalmente en nuevas construcciones, en la actualidad también se están implementando en edificios ya existentes, mejorando el confort térmico, generando ahorros energéticos, y aportando una mejora en el aspecto estético, tanto del edificio como del entorno urbano (Gagliano et

al., 2016; Gagliano et al., 2014). En Argentina, el empleo de techos verdes se encuentra en una fase incipiente, con pocos proyectos llevados a cabo, pero con un creciente interés por parte de diferentes actores (Arregui, 2016). En esta dirección, entre los primeros antecedentes, la ciudad de Rosario creó un programa de techos verdes mediante una ordenanza, y más tarde, en 2016 la ciudad de Córdoba promulgó la ordenanza N° 12548 que obliga la inclusión de techos verdes en superficies mayores a los 400 m^2.

Investigaciones realizadas a nivel global han demostrado los diversos beneficios que aporta la implementación de techos verdes en el tejido urbano. Estos incluyen mejoras en el confort térmico, ahorro energético, retención y mitigación del escurrimiento hídrico, reducción del efecto de "isla de calor", y una mayor valoración estética, entre otras ventajas (Berardi et al., 2014; Saadatian et al., 2013; Czemiel, 2010; Giobellina et al., 2016). Además, los techos verdes representan una importante alternativa para abordar la escasez de espacios verdes en las ciudades (Lanham, 2007).

En cuanto a la construcción de techos verdes en instituciones universitarias, no solo mejora en los aspectos antes mencionado, sino que se promueven y replican nuevos paradigmas de sustentabilidad, eficiencia energética y un entorno urbano más amigable con la naturaleza, fomentando así una comunidad más comprometida con el medioambiente (Sangita y Sakharle, 2022; Köhler y Kaiser, 2021). En la región de Santa Fe (Argentina), aunque investigaciones de esta índole recién se están iniciando, forman parte de un trabajo en eficiencia energética que se consolida de manera progresiva (García et al., 2023; Fernández et al., 2023; Cabrera et al., 2023).

Las construcciones de techos verdes, se dividen inicialmente en dos grandes grupos, extensivos e intensivos (Henk, 2016; Berardi et al., 2014). Sin embargo, en la actualidad se puede encontrar un tercer grupo denominado semi-intensivo, que combina características de los dos anteriores, ofreciendo una mayor flexibilidad en su clasificación (Czemiel, 2010; Bevilacqua, 2020). El tipo de techo varía según el tipo de vegetación, la profundidad del sustrato, la accesibilidad y el mantenimiento, entre otras particularidades (Berardi et al., 2014).

Por otra parte, la simulación en el ámbito de la eficiencia energética en edificios es una herramienta muy potente que permite obtener resultados importantes y verosímiles a bajo costo y sin grandes intervenciones en las estructuras. Así, EnergyPlus es un software de simulación versátil, robusto, que desde hace varios años se consolidó como herramienta de preferencia en todo el mundo, y especialmente en esta región (Bre, 2018; Marino et al., 2019; Ávila-Hernández et al., 2020).

El presente artículo tiene como objetivo comparar, mediante simulación, el consumo energético de la climatización en dos espacios de un edificio del Campus universitario de la Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf), uno sin techo verde y uno con techo verde, durante los meses de mayor y menor temperatura, así como a lo largo del año. Esta simulación se realiza después de que el techo verde original fuera retirado, una decisión tomada principalmente por razones presupuestarias, pero que no estuvo respaldada por una investigación exhaustiva. Este trabajo dará los primeros pasos en la búsqueda de información que confirme o rectifique dicha decisión.

METODOLOGÍA

El Campus de la UNRaf se erige sobre un predio de 10 hectáreas y está ubicado en el sector suroeste de la ciudad de Rafaela, provincia de Santa Fe. Este proyecto se inició a partir del año 2017, en conjunto con la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), la cual estuvo encargada de diseñar el Plan Director. El mismo involucra la construcción de 5 edificios principales y 6 módulos más pequeños, de los cuales, actualmente dos de los edificios principales ya se encuentran en funcionamiento, y otros dos edificios (también dentro de los principales) en la fase de construcción. El resto de las edificaciones no están iniciadas. De los edificios en marcha, el primer edificio, conocido como Edificio 1, se inauguró en el año 2021, y el segundo, conocido como Edificio 4, en el año 2023. Ambos cuentan con las instalaciones de plantas fotovoltaicas que generan aproximadamente el 20% del consumo interno de energía eléctrica de cada uno. El Edificio 1 (Figura 1) es objeto de estudio de este trabajo.



Figura 1: Vista aérea de Edificio 1 Campus UNRaf.

Descripción del edificio

El Edificio 1 es un edificio construido por la empresa Pirámide SA, de la ciudad de Santa Fe. Su diseño se basa en una estructura trapezoidal, organizada en dos plantas y una azotea técnica. Su orientación es N-S, con el acceso principal hacia el sur; cuenta con muros vidriados en ambos frentes que le proporcionan luminosidad durante gran parte del día. Sus espacios están destinados principalmente a laboratorios, aulas, salas de reuniones y salas de trabajo. En su construcción se incorporaron diferentes criterios innovadores. Dentro de ellos se destacan los muros translúcidos de doble vidriado hermético (DVH) como parte de la envolvente, y ventanas y ventanales de DVH, ambas características buscando favorecer la iluminación natural; muros opacos construidos con ladrillos de hormigón celular curado en autoclave (HCCA); ventilación cruzada generada por una cámara subterránea, con salida en el techo a través de una chimenea; instalación de un termotanque solar para el abastecimiento de agua caliente; estructuras metálicas perforadas, instaladas verticalmente al exterior de los ventanales que tienen como objeto disminuir la posibilidad de deslumbramiento. En las Figuras 1 y 2 se observan varias de estas características. En Figura 2 (a) la normal hacia afuera del acceso apunta en dirección hacia el sur, mientras que en Figura 2 (b) la normal hacia afuera del acceso apunta hacia el norte.

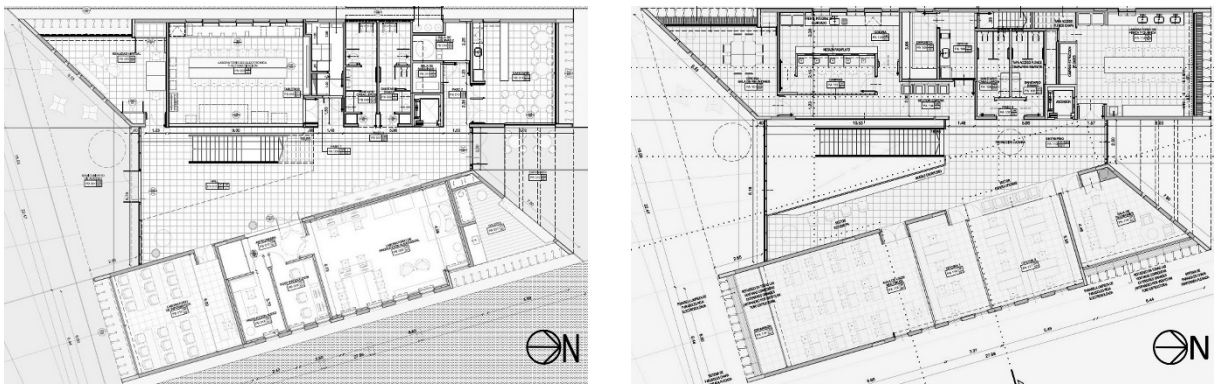


(a) *(b)*

Figura 2: Edificio 1 Campus UNRaf, (a) Vista sur-acceso principal, (b) Vista norte-acceso secundario.

En el interior, todos los espacios de trabajo se ubican en las alas este y oeste, distribuidos en las dos plantas, mientras que, en el centro del edificio, se encuentran un hall en planta baja que conecta los dos accesos y un hall de menor tamaño en planta alta (Figura 3).

Las Tabla 1 y Tabla 2 presentan las propiedades físico-térmicas de los diferentes materiales que componen la envolvente del edificio. En Tabla 1 se detallan los elementos de los componentes opacos, en Tabla 2 los elementos translúcidos, y en Tabla 3 las propiedades de las cámaras de aire que componen el cielo raso, según la norma IRAM 11601. A partir de toda esta información la Tabla 4 muestra la conformación de los muros de la envolvente.



(a) *(b)*

Figura 3: Edificio 1 Campus UNRaf, (a) vista planta baja, (b) vista planta alta.

Tabla 1: Propiedades físico-térmicas de materiales de la envolvente. Opacos

	Carpeta	Hormigón Armado	Hormigón RDC300	Poliestireno expandido	Madera roble	Ladrillo HCCA	Membrana asfáltica
Espesor (cm)	3	8/10/20	8/11	12	2,54	12,5/15/20	7
Conductividad (W/m·K)	1,3	0,97	0,89	0,037	0,24	0,12	0,7
Densidad (Kg/m^3)	2100	1800	1900	15	650	680	2000
Calor específico (J/KG·C)	836,8	836,8	836,8	1200	2400	1000	1300

	Mosaico granítico	Placa fonoabsorbente	Placa yeso	Revoque exterior	Revoque interior	Aluminio	Lana vidrio
Espesor (cm)	1,8	3	1,25	2,5	2,5	0,25	7
Conductividad (W/m·K)	4,1	0,027	0,51	1,16	0,93	204	0,045
Densidad (Kg/m^3)	2900	32	1200	1900	1900	2700	10
Calor específico (J/KG·C)	837	1400	837	837	837	900	840

Tabla 2: Propiedades físico-térmicas de materiales de la envolvente. Translúcidos

	Vidrio	Policarbonato
Espesor (mm)	3/4/6	10
Conductividad (W/m·K)	1,05	0,23
Transmitancia solar a 90°	0,85	0,837
Reflectancia solar frontal a 90°	0,08	0,075
Reflectancia solar dorsal a 90°	0,08	0,01
Transmitancia visible a 90°	0,906	0,898
Reflectancia visible frontal a 90°	0,08	0,081
Reflectancia visible dorsal a 90°	0,08	0,01

Tabla 3: Propiedades físico-térmicas del aire estacionario en cielo raso

	Aire	
Espesor (cm)	>10	
Dirección flujo de calor	Ascendente	Descendente
Resistencia térmica (m^2·K/W)	0,14	0,21

Los espacios seleccionados para este trabajo se muestran en Figura 4. Sobre el ala este, el espacio de trabajo elegido se conoce como *CIT* (Centro de Investigación y Transferencia Rafaela), ubicado en el centro. Sobre el ala oeste, en la esquina norte, el espacio es un laboratorio denominado *Alimentos*. Al momento de su elección, se tuvo en cuenta que sean espacios afectados de manera directa por el techo expuesto al exterior y, el cual se ensaya con y sin techo verde. Además, se priorizó que pertenezcan a diferentes alas y tengan una actividad constante durante todo el año. El espacio *CIT* tiene una dimensión de 8,80 m de largo y 5,30 m de ancho. Su piel interna está conformada por (Tabla 5): (i) *Pared interior 1* al sur; (ii) *Pared interior 2* junto con *Muro vidriado* y 2 *Puerta vidrio* al oeste; (iii) *Pared interior 3* al norte; y (iv) *Piso 2*. El espacio *Alimentos* tiene un tamaño de 6,60 m de largo por 6,00 m de ancho.

Su piel interna está compuesta por: (i) *Pared interior 2* al sur; (ii) al este por *Pared interior 4* y *Puerta vidrio*; y (iii) *Piso 1*.

Tabla 4: Muros de la envolvente

Pared exterior 1	Pared exterior 2	Techo 1	Techo 2	Piso	DVH	Ventanas DVH 1	Ventanas DVH 2	Lucarna
Revoque exterior	Revoque exterior	Membrana asfáltica	Membrana asfáltica	Poliestireno expandido	Vidrio (6 mm)	Vidrio (4 mm)	Vidrio (3 mm)	Policarbonato
Ladrillo HCCA (20 cm)	Ladrillo HCCA (20 cm)	Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón armado (8 cm)	Vacío (12 mm)	Vacío (6 mm)	Vacío (6 mm)	
Revoque interior	Revoque interior	Hormigón armado (20 cm)	Hormigón armado (20 cm)	Hormigón RDC300 (11 cm)	Vidrio (6 mm)	Vidrio (4 mm)	Vidrio (3 mm)	
	Lana vidrio	Aire	Aire	Carpeta				
	Placa yeso	Placa yeso	Madera roble	Mosaico granítico				
	Placa fonoabsorbente							

Tabla 5: Piel interna de los espacios CIT y Alimentos

Pared interior 1	Pared interior 2	Pared interior 3	Pared interior 4	Muro vidriado	Puerta vidrio	Piso 1	Piso 2
Placa yeso	Revoque interior	Revoque interior	Revoque interior	Vidrio (6 mm)	Vidrio (6 mm)	Placa yeso	Placa fonoabsorbente
Lana vidrio	Ladrillo HCCA (20 cm)	Ladrillo HCCA (15 cm)	Ladrillo HCCA (12,5 cm)	Vidrio (6 mm)	Vidrio (6 mm)	Aire	Placa yeso
Placa yeso	Revoque interior	Revoque interior	Revoque interior			Hormigón armado (20 cm)	Aire
						Hormigón RDC300 (8 cm)	Hormigón armado (20 cm)
						Carpeta	Hormigón RDC300 (8 cm)
						Mosaico granítico	Carpeta
							Mosaico granítico



Figura 4: Espacios seleccionados para la investigación.

Modelado de energía del techo verde

El techo verde se divide en tres grandes grupos: (i) extensivo, (ii) semi-intensivo e (iii) intensivo. La diferencia entre ellos radica en su carga, profundidad de sustrato, tipos de plantas, accesibilidad y mantenimiento. Mientras que en el extensivo prácticamente se dificulta su acceso, por lo que no requiere mantenimiento, en el intensivo ocurre lo contrario. El tamaño de planta y la profundidad de sustrato también varía de menor altura en un techo extensivo a mayor altura en un intensivo. En el caso del semi-intensivo, es una categoría que puede tener características de las otras dos. Para el modelado se consideró un techo semi-intensivo con las características que se presentan más adelante. En Tabla 6 se detallan las características de los techos extensivos e intensivos.

Tabla 6: Tipos de techos verdes. Principales características

Atributos	Extensivo	Intensivo
Espesor de sustrato	Hasta 25 cm	Por encima de 25 cm
Accesibilidad	Inaccesible	Accesible (mantenimiento y otros)
Peso	70-140 kg/m^2	Por encima de 200 kg/m^2
Altura de plantas (tipos)	Bajas (mayormente césped)	Altas (plantas, arbustos y árboles)
Irrigación	No es necesaria	Es necesaria
Mantenimiento	No requiere atención	Requiere atención

El mecanismo de intercambio de energía de un techo verde se produce por los modos convectivo, conductivo y por evapotranspiración (Berardi et al., 2014; Gagliano et al., 2016). Para modelar el balance de energía, el techo verde se debe subdividir en tres capas (Sailor, 2008): (i) la capa estructural o de soporte, (ii) la capa de sustrato o suelo, y (iii) la cubierta. Según Gagliano et al., 2014, el sustrato es un compuesto complejo que cuenta con una fase sólida (materiales orgánicos y minerales), una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua). La cubierta se compone por la vegetación y el aire que se encuentra entre ella. La ecuación que modela el balance térmico se conoce como FASST (Fast All-Season Soil STrength) (Engineering Reference – EnergyPlus, 2023), e involucra la temperatura de la superficie del suelo (T_g) y la temperatura del follaje (T_f) (Figura 5). De esta forma, las ecuaciones (1) y (2) determinan los balances térmicos del follaje y de la superficie del suelo, respectivamente. Así, se tiene:

$$F_g = (1-\sigma_f)\left[I_s^{\downarrow}(1-\alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^{\downarrow} - \varepsilon_g T_g^4\right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1}\left(T_g^4 - T_f^4\right) + H_g + L_g + K\frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (1)$$

$$F_f = \sigma_f\left[I_s^{\downarrow}(1-\alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^{\downarrow} - \varepsilon_f \sigma T_f^4\right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1}\left(T_g^4 - T_f^4\right) + H_f + L_f \quad (2)$$

donde:

F_g = flujo de calor del suelo(W/m^2)
F_f = flujo de calor del follaje (W/m^2)
H_g = flujo de calor sensible del suelo (W/m^2)
H_f = flujo de calor sensible del follaje (W/m^2)
$I_s^{\downarrow}$ = radiación de onda corta total recibida (W/m^2)
$I_{ir}^{\downarrow}$ = radiación de onda larga total recibida (W/m^2)
L_g = flujo de calor latente del suelo (W/m^2)
L_f = flujo de calor latente del follaje (W/m^2)
K = conductividad térmica total (W/m·K)
σ = constante de Stefan-Boltzmann
σ_f = fracción de cubierta de la vegetación
ε_g = emisividad de la superficie del suelo
ε_f = emisividad de la superficie del follaje
$\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g\varepsilon_f$
α_g = albedo del suelo
α_f = albedo del follaje

Según Gagliano et al., 2016, el flujo de calor radiante incluye la radiación solar absorbida por las hojas, y la radiación de onda larga intercambiada por las hojas y el cielo, por las hojas y la superficie del suelo y entre las hojas mismas. Asimismo, las plantas cumplen la función de atenuación del sobrecalentamiento que se produce en el verano, las cuales absorben el 60% de radiación incidente y reflejan el 22% aproximadamente, limitando a un 18% la absorción de radiación solar hacia el interior.

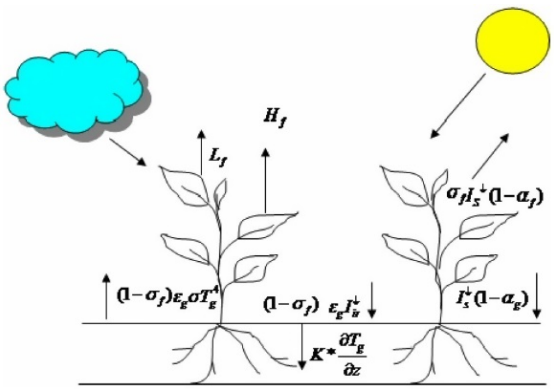
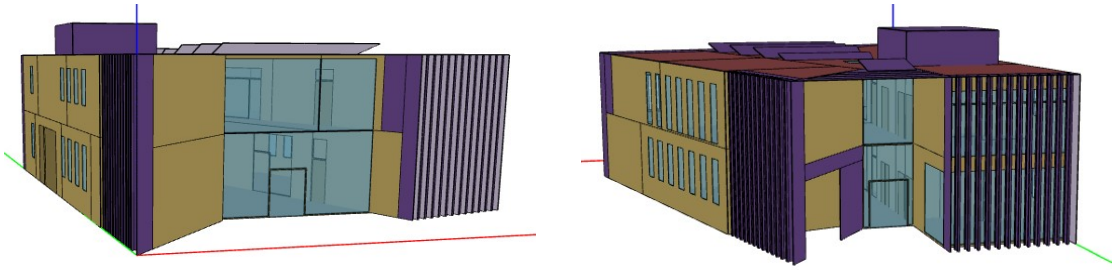


Figura 5: Balance de energía de un techo verde.

Modelado y Simulación

El modelado del edificio (diseño, materiales y las zonas térmicas) se realizó en el programa OpenStudio. En Figura 6 se puede ver el modelo 3D. Los detalles restantes, como el modelado del piso y el techo verde se definieron directamente en el programa de simulación. Internamente, en la mayoría de los espacios se respetaron sus conformaciones, con algunas excepciones: cocina, baños y depósito en planta alta conformó una zona térmica; baños, depósito y servidores otra zona térmica. Por otra parte, *CIT* posee una división interna que divide en dos el espacio.



(a) *(b)*

Figura 6: Render de modelado edificio, (a) vista sur, (b) vista norte.

En el caso del techo verde original del edificio no se dispone de la composición por capa ni todas sus propiedades. Por lo tanto, en el modelado se ha recurrido en parte a la información del techo verde retirado y en parte a datos de otras investigaciones (Gagliano et al., 2014; Gagliano et al., 2016). De esta forma, en Tabla 7 se detallan las diferentes capas y sus propiedades. Para la vegetación se consideró gramilla (Figura 1), con una altura de 10 cm, abundante, con un índice de superficie de hoja (LAI, por sus siglas en inglés) LAI = 4.

Tabla 7: Composición por capa del techo verde. Propiedades térmicas

Capa	Profundidad (cm)	Conductividad (W/m·K)	Densidad (kg/m^3)	Calor específico (J/kg·K)
Vegetación	10	0,98	1460	900
Filtrado agua	0,1	0,22	910	1800
Drenaje	10	0,93	1800	1000
Antirraíz	0,5	0,19	1400	1200
Membrana impermeable	0,5	0,033	100	710

Respecto a la simulación, la misma se realizó con EnergyPlus, versión 23.2.0. El clima anual utilizado se obtuvo a través de un año típico para la región de Rafaela, entre los años 2007 – 2021 (Figura 7). De aquí se dedujo que el mes más caluroso es enero (temperatura promedio $\bar{T}_{enero} = 26{,}24°C$), con $T_{min} = 14{,}00°C$ y $T_{max} = 37{,}40°C$; y el mes de julio como el mes más frío ($\bar{T}_{julio} = 12{,}38°C$), con $T_{min} = -0{,}60°C$ y $T_{max} = 30{,}20°C$. El edificio se consideró con su carga térmica típica del año 2023. Para el *CIT*, se consideraron 20 personas en total con actividades de oficina, desde las 8:00 hasta las 20 horas, con fluctuaciones según la hora. La carga de iluminación relevada resultó en 600 W, considerándose prácticamente activas durante las 12 horas. El equipamiento eléctrico comprende un promedio de 7 puestos de trabajos activos (PC con monitor) y otros (cafetera, pava eléctrica, cargadores de notebook y celular, etc.), promediando una energía de consumo horaria de 1500 Wh. Para Alimentos se consideró activo a partir de las 16 hasta las 22 horas, con días intermitentes activos en la mañana. Se asumió una capacidad de 5 usuarios, con algunas variaciones según el día de la semana. La iluminación representa una carga de 700 W, activa el 100% en sincronía con los usuarios. La carga máxima de este espacio es de 4000 W debido a la existencia de una heladera y un horno eléctrico, entre otros equipos. No obstante, el consumo promedio es de 400 Wh, ya que, en el caso del horno, tiene un uso insignificante al día de hoy.

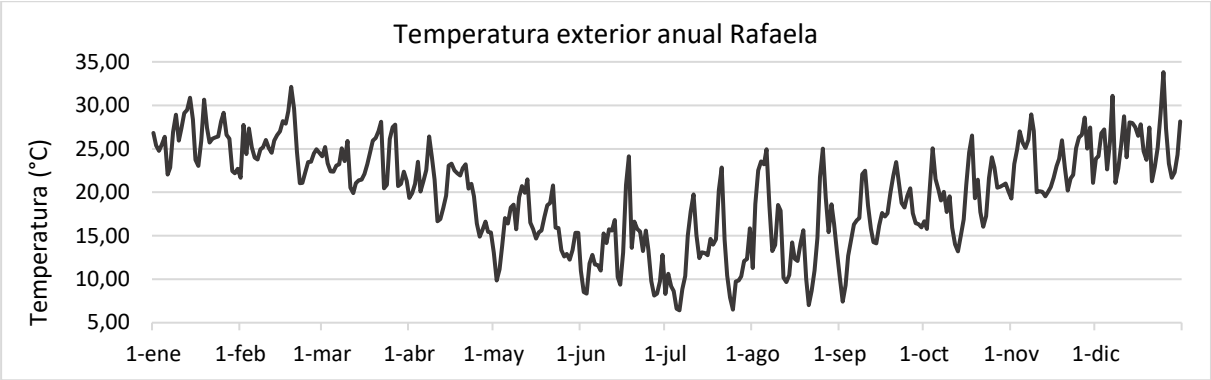


Figura 7: Temperatura anual típica (año 2007 – 2021). Zona Rafaela.

En la climatización se consideraron equipos individuales para cada espacio, con sistemas de refrigeración y de calefacción eléctricos. El tamaño de los mismos se obtuvieron mediante el mismo programa de simulación, a través del método de *SizingPeriod:DesignDay*, el cual dimensiona los equipos teniendo en cuenta el volumen, las cargas térmicas y dos días típicos, de calor y de frío, de la zona. Las temperaturas de termostatos elegidas para refrigeración y para calefacción fueron de 24°C y 21°C respectivamente. Las temperaturas de los ambientes se controlaron durante todo el año, de lunes a viernes, de 8 a 23 horas, y los sábados de 8 a 13 horas.

Finalmente, terminados los modelos con y sin techo verde, se seleccionó como salida la variable de consumo de energía de cada equipo HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning, por sus siglas en inglés).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las simulaciones llevadas a cabo fueron en los meses de temperaturas más extremas de la región de Rafaela, es decir, el mes de enero (mes más caluroso), y el mes de julio (mes más frío), y una simulación anual. En Figuras 8, 9 y 10 se observan los resultados obtenidos en *CIT*, mientras que en Figuras 11, 12 y 13 se muestran los resultados en *Alimentos*.

Los gráficos muestran un ahorro de energía durante gran parte del tiempo, cuando el edificio cuenta con techo verde. No obstante, se observan importantes diferencias entre los espacios analizados (*CIT* y *Alimentos*) y en el período anual. En el mes estival *CIT* llega a un ahorro del 30%, siendo que en *Alimentos* apenas llega al 10%. En julio, el ahorro mayor sucede en *Alimentos* (cerca de un 40% menos de consumo), mientras que en *CIT* es de 10%. Estos valores se relacionan con la ubicación de cada espacio, y con la exposición a la radiación solar. *Alimentos* cuenta con ventanales hacia el norte que permite mayor ingreso de radiación solar, al mismo tiempo que posee tres de sus paredes expuestas al exterior. Estas características hacen que en verano no haya una diferencia significativa en el uso de techo verde. Algo opuesto sucede en invierno, sobre todo en el mes más frío, la aislación térmica del techo verde permite mantener el calor ganado por la radiación solar que ingresa por los ventanales. En el espacio *CIT*, el ahorro de energía es mayor durante los meses de calor, disminuyendo en los meses de bajas temperaturas. En otras palabras, la incorporación del techo verde tiene un efecto más contundente, especialmente en verano. De esta forma, la instalación de un techo verde sobre el Edificio 1 permite un ahorro de energía por encima del 25% en *CIT*, y un ahorro de 15% en *Alimentos*.

Cabe destacar que el techo verde, al ser semi-intensivo requiere de un mantenimiento mínimo, que de no hacerlo puede llevar incluso a que el mismo pase a ser una carga térmica más para el edificio.

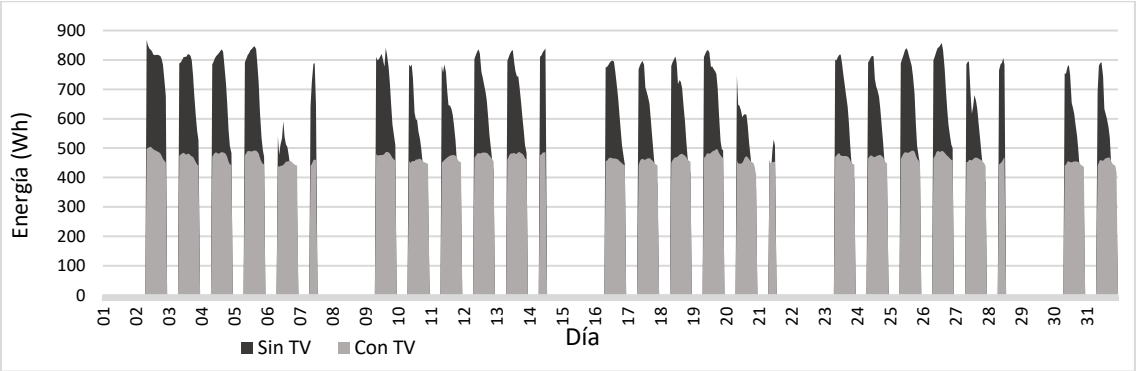


Figura 8: Consumo de energía en CIT. Enero.

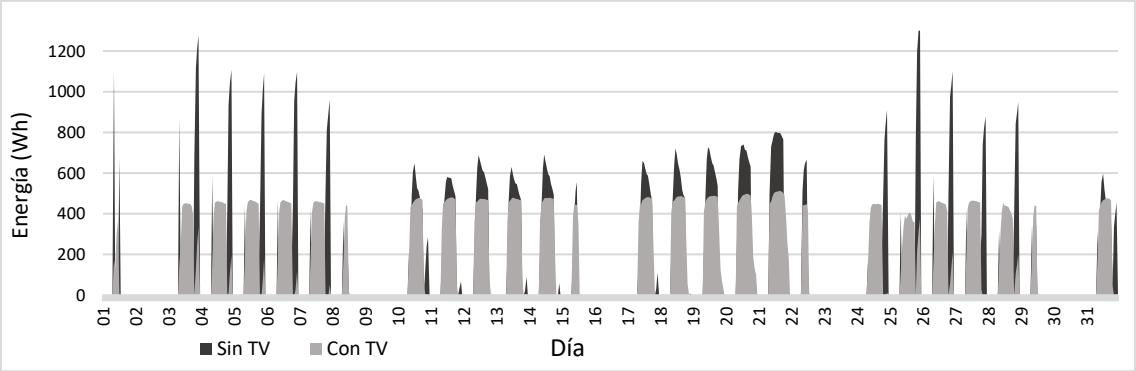


Figura 9: Consumo de energía en CIT. Julio.

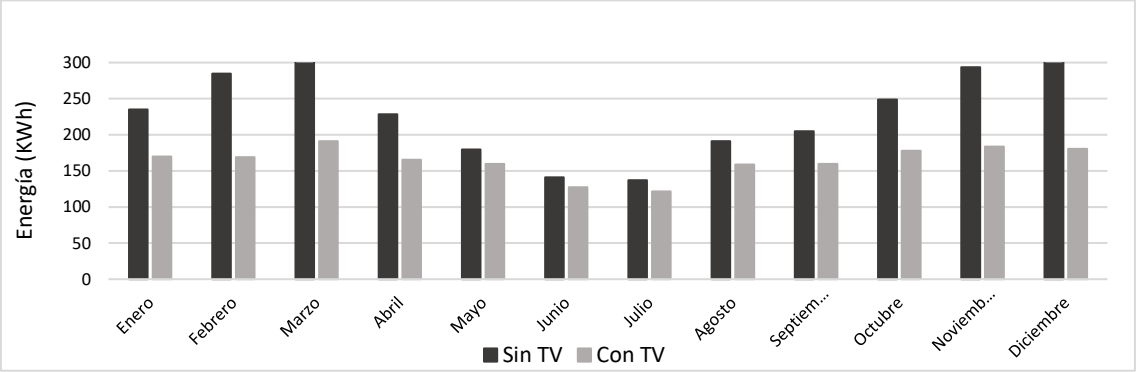


Figura 10: Consumo de energía en CIT. Anual.

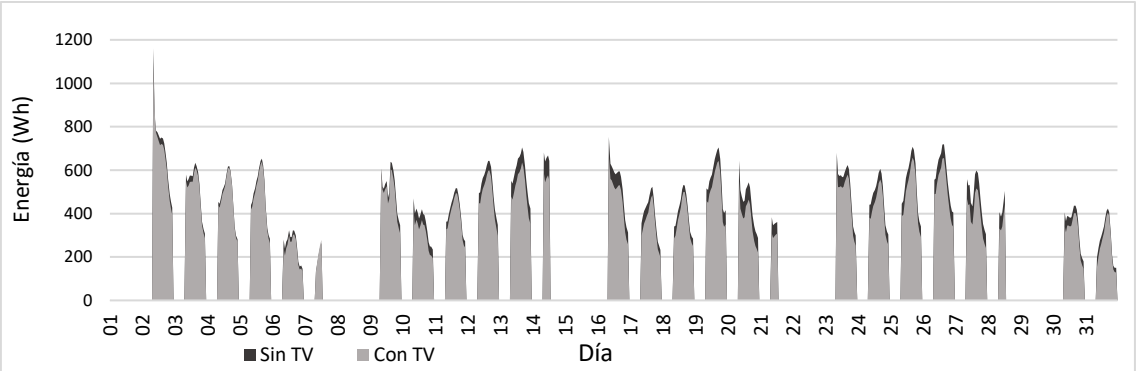


Figura 11: Consumo de energía en Alimentos. Enero.

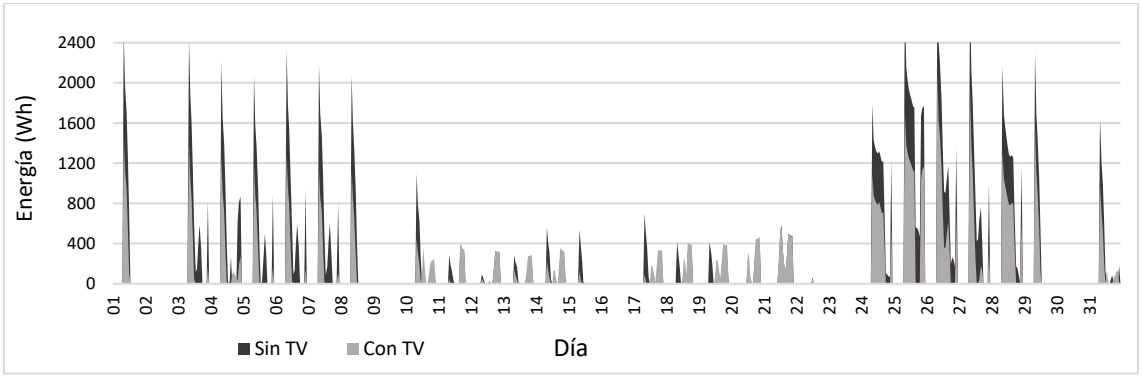


Figura 12: Consumo de energía en Alimentos. Julio.

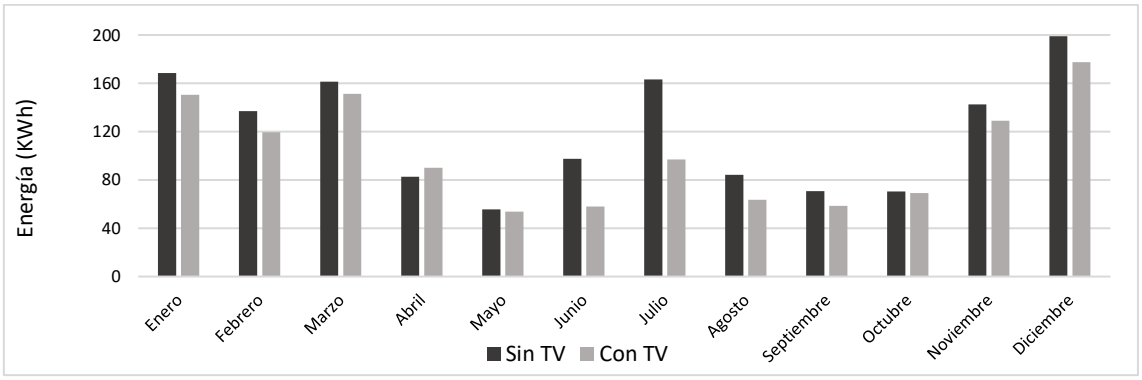


Figura 13: Consumo de energía en Alimentos. Anual.

CONCLUSIONES

En el Edificio 1 del Campus de la UNRaf se analizó y comparó el consumo energético de dos espacios de trabajo, uno sin techo verde y otro con techo verde. El análisis se realizó para periodos de tiempo de temperaturas extremas de frío y calor, y para el periodo de un año. El modelado se llevó a cabo en *OpenStudio* y las simulaciones se realizaron utilizando el programa *EnergyPlus*. Los resultados mostraron que: (i) en los meses de enero y de julio se produjo un ahorro energético que varía desde un 10% hasta el 30% (hasta un 40% en julio), dependiendo de la ubicación del espacio y sus características constructivas; (ii) a lo largo del año se observó un ahorro de energía significativo en los dos espacios, con variaciones relacionadas con lo mencionado en (i); (iii) el consumo de energía del HVAC en *CIT* teniendo en cuenta el techo verde, es más estable y con menor variación entre los diferentes meses del año, debido al aumento de inercia térmica que este provoca en dicho espacio, si se compara sin el techo verde; no sucede lo mismo en *Alimentos* ya que, se puede observar la influencia que tiene la radiación solar entrante en este espacio.

Estas características que diferencian la forma de consumo de un espacio respecto del otro, destacan la importancia del control de la radiación solar tanto en los meses de calor como en los de frío, ya sea para evitar o aprovechar su efecto térmico. De este modo, la gestión del calor adicional (o su faltante) puede influir en el consumo eléctrico.

A partir de estos resultados, se establece la necesidad de medir el consumo de energía de los equipos HVAC, así como las temperaturas internas y humedades internas a diferentes alturas y en zonas térmicas de interés. Esto permitirá validar el resultado de las simulaciones y evaluar el costo de instalación y mantenimiento del techo verde. Así como, calcular el tiempo de amortización del mismo para compararlo con las actuales tarifas de energía que rigen en el país.

REFERENCIAS

Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. Energy and Buildings, 209, 109709.

Arregui Henk, L. J. 2016. El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/futuro-techos-verdes-buenos-aires.pdf [Fecha de consulta:8/7/2024].

Breesch H., Janssens A. (2010). Performance evaluation of passive cooling in office buildings based on uncertainty and sensitivity analysis. Solar Energy. 84, 1453 -1467.

Bevilacqua P., Bruno R., Arcuri N. (2020). Green roofs in a Mediterranean climate: Energy performances based on in-situ experimental data. Renewable Energy. 152, 1414-1430.

Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. Applied Energy. 115, 411-428.

Berardi U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. Energy and Buildings. 121, 217-229.

Bre, F. (2018). Optimización del desempeño térmico y energético de viviendas en la región Litoral Argentina.

Cabrera D., Silva L. I., Medina J. C., García M. S. (2023). Construcción de indicadores de desempeño energético para estimar el consumo de energía en un nuevo Campus universitario. Actas de la XX reunión de trabajo en procesamiento de la información y control – RPIC2023. 20, 710-715

Castleton H.F., Stovin V., Beck S. B. M. Davison J.B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. Energy and Buildings. 42, 1582-1591.

Czemiel B. J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecological Engineering. 36, 351-360.

Fernández F. J., García M. S., Silva L. I. (2023). Desarrollo de un modelo computacional utilizado para evaluar la Eficiencia Energética de edificios, a través del análisis del comportamiento térmico de sus estructuras constructivas. Actas de la XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC 2023. 20, 151-156.

Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli. (2014). The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs - A Simulation Study. Energy Procedia. 62, 52-61.

Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Berardi U. (2016). The adoption of green roofs for the retrofitting of existing buildings in the Mediterranean climate. International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development. 7, 116-129.

García M. S., Silva L. I., Cabrera D., Fernández F. J. (2023). Modelado y Simulación de la Dinámica Térmica de un Edificio Educativo de Argentina. Actas de la XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control – RPIC 2023. 20, 724-729.

Giobellina B., Maristany A., Angiolini S., Medina S., Pomazán S., Celiz Y., Márquez F. (2016). Rendimiento térmico de cubiertas verdes sobre techo de chapa en la Ciudad de Córdoba – Argentina. Actas del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable. 1, 243-253.

Hassid S. (2011). Developments in the residential energy sector in Israel. Advances in Building Energy Research. 5, 71-9.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2022). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press. Disponible en: www.ipcc.ch/report.

Köhler M., Kaiser D. (2021). Green Roof Enhancement on Buildings of the University of Applied Sciences in Neubrandenburg (Germany) in Times of Climate Change. Atmosphere. 12, 382.

Lanham J.K. (2007). Thermal performance of green roofs in cold climates. 46.

Liberalesso T., Olivera C. C., Matos S. S., Manso M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. Land Use Policy. 96, 104693.

Marino, B. M., Muñoz, N., & Thomas, L. P. (2019). Análisis del comportamiento térmico de un edificio complejo del centro bonaerense a partir de simulaciones con energyplus. Energías Renovables y Medio Ambiente, 44, 29-38.

Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lim C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A., Sulaiman M.Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. 23,155-168.

Sailor D. J., (2008). A green roof model for building energy simulation programs. Energy Build 2008. 40, 1466 – 1478.

Sangita M. S., Sakharle D. (2022). Design of green roof for an energy efficient university campus. Maretials Today: proceedings. 65, 1546 – 1550.

Santamouris, M. (2016). Cooling of buildings. Past, present and future. Energy Build. 128, 617-638.

U. S. Department of Energy, (2013). Engineering Reference, Advance Surface Concepts, Green Roof Model (EcoRoof). 187-196.
Yi X., Tang L., Yeboah S. (2024). Investigations into impacts of fenestration and shading variation on ventilation and energy performance of an office in cooling and heating seasons. Solar Energy. 276, 112646.
Zhou Y., Clarke L., Eom J., Kyle P., Patel P., Kim S.H., Dirks J., Jensen E., Liu Y., Rice J., Schmidt L., Seiple T. (2014). Modeling the effect of climate change on US state-level buildings energy demands in an integrated assessment framework. Applied Energy 113, 1077-1088.

COMPARISON OF ENERGY CONSUMPTION FOR HVAC IN AN UNIVERSITARY BUILDING WITH AND WITHOUT GREEN ROOF– SIMULATION STUDY

ABSTRACT: Energy saving in buildings has become a key challenge to reduce greenhouse gas emissions, thereby contributing to climate change mitigation. Last decade, green roofs have been consolidated in different cities of the world, while in Argentina, it is gaining greater visibility and acceptance. This article analyzes the impact of green roof installation on energy consumption for heating and cooling in a building at the National University of Rafaela. Using the *EnergyPlus* simulation software, energy consumption is compared between two scenarios: one that includes a green roof and another without. The analysis is conducted for the months with extreme high and low external temperatures, as well as for the entire year, offering a comprehensive perspective on the effectiveness of green roofs in the region.

Keywords: green roof, simulation, EnergyPlus, energy efficiency, university campus, building.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 233-245, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

PLAN DE MUESTREO ESPACIAL PARA EL ESTUDIO DE LA POBREZA ENERGÉTICA: UNA APLICACIÓN EN EL GRAN SALTA

Mauro Montone[1], Rodrigo Durán, Miguel Condorí[1]
[1]Grupo de Eficiencia Energética y Desarrollo Socio-Productivo (GEEDESP) ─ Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO) ─ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Av. Bolivia 5150 C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387-4516592 e-mail: mauromontone1996@gmail.com

RESUMEN: En el presente trabajo se elabora un plan de muestreo espacial para hogares en potencial situación de pobreza energética. Se aplica la metodología al espacio urbano de los departamentos que componen el aglomerado Gran Salta, sobre la base de la información censal del año 2010 (última información censal georreferenciada). Para cumplir con este objetivo se establece una serie de pasos, secuenciales, que van desde la elaboración de un indicador como proxy de pobreza energética sobre la base de las variables censales hasta la evaluación de su comportamiento espacial y la selección de unidades espaciales mediante un algoritmo basado en distancias. El recorte final del marco de muestreo consideró una población total de 14442 hogares distribuidos en 381 radios censales del área bajo estudio. Como principales hallazgos de este trabajo resultan la confección de un indicador compuesto de vulnerabilidad de pobreza energética sobre variables de largo plazo, con una incidencia del 15,51%; la evaluación de autocorrelación espacial arroja un resultado del I de Morán de 0,56, lo que indica un valor positivo y moderado. El trabajo se presenta como un insumo para auxiliar la elaboración de encuestas en el marco de la investigación sobre pobreza energética en la región.

Palabras clave: muestreo espacial, pobreza energética, Gran Salta

INTRODUCCIÓN

El nivel de cobertura, calidad, asequibilidad y sostenibilidad de los servicios energéticos domésticos (calefacción, refrigeración, cocción, iluminación) se ha convertido en determinante del bienestar humano contemporáneo (Brand-Correa & Steinberger, 2017; Ibañez Martín et al., 2019). Las deficiencias en el acceso y prestación de estos desembocan en una serie de privaciones que vienen siendo estudiadas desde la definición de indicadores de pobreza de combustible o pobreza energética (Bouzarovski et al., 2016; González-Eguino, 2015). Siendo este último el término más extensamente utilizado a escala global para referir a la condición en la que un hogar se vuelve incapaz de hacer frente a los requerimientos energéticos social y materialmente necesarios para el desarrollo de una vida digna (Bouzarovski & Petrova, 2015). Las diferentes interpretaciones de esta idea general y su adecuación a los contextos en los que se aplica han dado lugar a la existencia de variaciones en torno a su definición y las métricas con las que se estima. Siendo el indicador más extensamente utilizado el de la Regla del 10% de la relación entre ingresos de un hogar y sus gastos energéticos (Boardman, 1991). Esta línea de investigación se ha desarrollado principalmente en el contexto de países europeos, con el liderazgo del Reino Unido (Liddell, 2012). Paulatinamente se ha expandido a otros países desarrollados y en desarrollo, considerándola como un problema de asequibilidad de los precios de la energía para los primeros (Boardman, 2009) y como un problema de acceso a fuentes energéticas en los segundos (Burguillo et al., 2022; Nussbaumer et al., 2012). Un número relativamente menor de investigaciones se han preocupado por la problemática en el contexto de América Latina y el Caribe, siendo la mayoría de los países que la integran considerados como de “desarrollo medio", con grandes extensiones

geográficas y una variabilidad climática que presenta prácticamente todos los climas en una sola región (García Ochoa, 2014; Urquiza et al., 2019).

Para el caso particular de Argentina se vienen publicado estimaciones sobre todo a partir de las modificaciones en el régimen de subsidios al consumo energético (Durán & Condori, 2021; Ibañez Martín et al., 2019; Poggiese, 2023) y el escenario de inestabilidad macroeconómica que atraviesa el país en los últimos años. Por su facilidad de aplicación y adecuación con las bases de datos disponibles, la métrica que más frecuentemente se utiliza es la Regla del 10% (Burguillo et al., 2022; Civitaresi et al., 2021; R. Durán & Condori, 2019; Puig, 2023), llegando a incluso proponerla el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS, 2021). Si bien se ha avanzado considerablemente en su estudio a nivel nacional y en la región latinoamericana, la disponibilidad y fiabilidad de estadísticas coherentes dentro-y-entre los países son el principal desafío para la investigación sobre la pobreza energética, sobre todo en aspectos vinculados con los usos finales de la energía y el confort térmico de las viviendas.

Para complementar y auxiliar las estimaciones apoyadas en estadísticas oficiales, diversos autores (Horta et al., 2019; Middlemiss, 2017; Pellicer-Sifres, 2018) abogan por la integración tanto de estudios cualitativos y/o mixtos como con la implementación de encuestas ad hoc (Barrella et al., 2023; R. Durán & Morero, 2021). Sobre este último tipo de estudios existen algunas experiencias satisfactorias en los últimos años, aunque rara vez utilizan una metodología de muestreo probabilístico (Kyprianou & Serghides, 2020; Viñuela et al., 2021), lo que no permite la posibilidad de estimaciones a nivel poblacional y, por lo tanto, no permite extender los resultados a la población. Este tipo de estudios también se hacen basándose en encuestadores institucionalizados que realizan relevamientos periódicos de una muestra representativa de toda una población (R. Durán & Morero, 2021; Mirza & Szirmai, 2010), lo que implica costos significativos para su replicabilidad.

Una alternativa que suele utilizarse en el ámbito de la demografía y las ciencias de la salud son los métodos de muestreo para encuestas complejas (Kumar, 2007; Lohr, 2021) en donde se define una población objetivo con un alto grado de especificidad y se integran diferentes componentes del diseño en el proceso de extracción de una muestra sobre poblaciones finitas. Además, ante los avances en las tecnologías de información geográfica se vienen incorporando métodos de estadística espacial en los estudios que tienen en cuenta la distribución geográfica de los datos, brindando estimaciones precisas con muestras relativamente más pequeñas (Borra, 2015). Esto cobra especial relevancia cuando se reflexiona sobre las implicaciones espaciales de la pobreza energética (Bouzarovski & Thomson, 2018; Lavecchia et al., 2024; Panda & Pradhan, 2024).

Teniendo presente ese marco de entrecruzamiento entre el espacio y la pobreza energética, el presente trabajo propone un método para la definición de muestras complejas sobre la población en riesgo de pobreza energética, utilizando herramientas de la estadística espacial y aplicado a los departamentos que componen el aglomerado Gran Salta como territorio específico de aplicación. De esta forma, el objetivo de la presente investigación es elaborar un plan de muestreo espacial para el estudio de hogares con potenciales privaciones energéticas en base a la última información censal georreferenciada disponible.

METODOLOGÍA

Un plan de muestreo queda especificado cuando se decide un método aleatorio de selección de las unidades y un procedimiento que combine los valores observados de una variable de interés para obtener un estimador del valor poblacional. Para este trabajo se elabora un muestreo espacial basado en el diseño, en una etapa, sin reposición, y con probabilidades desiguales de inclusión. Este tipo de enfoque se utiliza tradicionalmente para el tratamiento de las inferencias del muestreo sobre poblaciones finitas generalmente sobre la base de información censal (Lohr, 2021). Los planes de muestreo basados en el diseño admiten las técnicas tradicionales del muestreo probabilístico y no se requiere ninguna clase de supuestos acerca de un modelo que refleje la pauta de variabilidad de las unidades que se consideran. Asimismo, el muestreo espacial es un tipo de procedimiento en el que la muestra se selecciona en función de la ubicación de las unidades y/o sus características asociadas (Cressie, 2015). En este tipo de muestreo no se define un marco de las entidades de interés directamente, sino que se construye un marco de muestreo de la población finita de unidades geográficas identificables que las contienen (Kumar,

2007). Como se introdujo en la problematización, este plan de muestreo se propone como una herramienta que auxilie el proceso de elaboración de encuestas sobre hogares urbanos en situación de pobreza energética (o en riesgo de encontrarse en esta situación) para aglomerados o ciudades, considerando la distribución espacial de características de interés vinculadas con la problemática. En este caso particular, se consideran los departamentos que integran el aglomerado Gran Salta, con vistas a su replicabilidad en otras ciudades o aglomerados del país.

Lo anterior implica una serie desafíos complejos, como la construcción de una variable de interés para el muestreo que opere como proxy de pobreza energética, la medición de su incidencia en la elaboración de un marco de muestreo, la evaluación de la autocorrelación espacial de dicha variable y la selección de casos considerando aspectos espaciales de esa evaluación. La aplicación de esta metodología se constituye en una serie de pasos secuenciales que se describen a continuación junto con la descripción de las fuentes de datos. El alcance de este trabajo se limita a la extracción de las unidades espaciales que, en este caso, son los radios censales, quedando para futuros trabajos el establecimiento de un número mínimo de unidades de análisis (hogares) para completar el plan de muestreo de segundo orden.

Fuentes de datos utilizadas

Se utiliza como insumo a los microdatos del Censo Nacional de Personas, Hogares y Viviendas (CNPHV) del año 2010 en formato de archivo de texto delimitado por comas (csv) y a su respectiva cartografía censal en formato de capa vectorial o shapefile. Ambas bases de datos aportadas por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) de Argentina. La elección de esta edición del CNPHV y no del último ─realizado en 2022─ obedece a que los microdatos no están disponibles aún, así como tampoco lo está su cartografía censal.

Ambas bases de datos se filtran considerando solo los hogares urbanos y los departamentos que integran el aglomerado Gran Salta: Capital, Cerrillos y La Caldera.

Secuencia metodológica

- *Paso 1: elaboración del indicador compuesto como variable de interés*

De manera similar a la relación entre la metodología de Necesidades Básicas Insatisfechas y las líneas de pobreza (Arakaki, 2016), se define un indicador como proxy de la situación de pobreza energética, que será denominado como "indicador de vulnerabilidad de pobreza energética" (IVPE). Este indicador considera tres dimensiones: una primera dimensión basada en las características del jefe/a de hogar y la composición del hogar; una segunda dimensión basada en los materiales constructivos de la vivienda y una tercera dimensión basada en los servicios energéticos disponibles en el hogar. Se toma como referencia un trabajo anterior sobre un indicador de vulnerabilidad socio-energética evaluado sobre el CNPHV 2010 para todo el país pero realizado sobre el cuestionario ampliado (Durán & Condorí, 2017). Cabe aclarar que el cuestionario ampliado del censo es relevado sobre una muestra, por lo que no es prudente utilizarla como insumo para un marco de muestreo en un plan basado en el diseño. Además, el cuestionario ampliado agrega variables que no están en el cuestionario básico del censo, por lo que se adaptarán las dimensiones del indicador a las variables censales del cuestionario básico.

Una vez definidas las dimensiones se establece una línea de corte para cada dimensión, y otra línea de corte general en términos de valores agregados de las distintas dimensiones. Los indicadores y subindicadores asumen valores binarios 0-1 de manera que 1 reporta la presencia de una privación en esa dimensión y 0 refiere al caso contrario.

Tabla 1: Dimensiones el indicador de vulnerabilidad de pobreza energética.

Dimensión	Subindicador	Variables censales	Límite (privado si…)
Vulnerabilidad Socioeconómica (VSE)	Hogares que presenten condiciones de vulnerabilidad socioeconómica relacionada con las características del jefe de hogar y la composición de su hogar.	- "Relación o parentesco con el jefe(a) de hogar." - "Edad agrupada." - "Condición de actividad." - "Nivel educativo que cursa o cursó." - "Sexo."	El hogar presenta alguna/s de las siguientes condiciones: - Jefe/a de hogar desocupado/a cuyo máximo nivel educativo corresponde al primario completo - Jefe/a de hogar inactivo mayor de 65 años. - Jefatura femenina de hogar monoparental y con al menos un niño a cargo
Vivienda Térmicamente Ineficiente (VTI)	Hogares que presenten condiciones materiales deficientes, considerados como energéticamente ineficientes.	- "Material predominante de los pisos." - "Material predominante de la cubierta exterior del techo." - "Revestimiento interior o cielorraso del techo."	El hogar presenta alguna/s de las siguientes condiciones: - Piso de tierra, ladrillo fijo, carpeta o ladrillo suelto. - Techo de chapa en cualquiera de sus formas. - Techo sin revestimiento interior ni cielorraso.
Necesidades Energéticas Básicas (NEB)	Hogares que no cuenten con heladera y/o que recurran predominantemente a la biomasa como combustible para cocinar.	- "Heladera." - "Combustible usado principalmente para cocinar"	El hogar presenta alguna/s de las siguientes condiciones: - No posee heladera - Recurre a la biomasa como combustible predominante para cocinar.

Se crea una matriz condicional X = [xij] que representa la suma de privaciones para cada hogar i en la dimensión j = {VS, VTI, NEB}, donde cada dimensión j es ponderada de igual manera WVS = WVTI = WNEB. Al ser solamente tres, se considera a priori una línea de corte de privaciones en 2/3 dimensiones para estar en situación de vulnerabilidad de pobreza energética (IVPE). Esto también garantiza considerar conjuntamente la privación social y energética puesto que solo una dimensión es enteramente socioeconómica mientras que las otras dos consideran aspectos constructivos de la vivienda relacionados con la (in)eficiencia térmica y los servicios energéticos de cocción y refrigeración de alimentos.

Para los subindicadores que componen cada una de las dimensiones las ponderaciones se distribuyen de la misma manera (ej.: para la dimensión de VTI se pondera cada indicador como 1/3). Las líneas de corte se establecerán a posteriori, considerando los valores expuestos en los resultados. El resultado de este proceso es la tasa de incidencia del IVPE, es decir, la cantidad de hogares urbanos de los departamentos que componen el Gran Salta que se encuentran en la situación de vulnerabilidad social y energética que se ha definido. Si bien, también es posible estimar la intensidad del indicador (es decir, cuán vulnerables son los hogares vulnerables), esta excede los intereses de este trabajo. El IVPE se genera con el paquete dplyr (Wickham et al., 2023) de R, y se agrega a la base de datos como una variable más.

- *Paso 2: creación del marco de muestreo espacial*

En este caso, las unidades espaciales de primer orden son los radios censales, mínima unidad geoestadística considerada por el INDEC. Los radios censales son polígonos irregulares que agrupan a hogares en función de la distribución logística del territorio a la hora de planificar los censos. En este

paso se añade la variable IVPE que se generó de los microdatos, pero evaluada ya no a nivel de hogares sino a nivel de radio censal, esto es, la proporción de hogares que se identifican en situación de vulnerabilidad de pobreza energética para cada radio.
Se creará una nueva base de datos en donde las filas son los radios censales y las columnas las variables, evaluadas a nivel radio censal. Utilizando el software QGIS se establece una unión de tablas entre la capa vectorial relativa a la cartografía censal 2010 filtrada para los tres departamentos que componen el Gran Salta. Finalmente, quedará como resultado la capa vectorial con el indicador evaluado a nivel de radio censal como variable de interés. Esto constituye el marco de muestreo espacial del presente trabajo.

- *Paso 3: evaluación de la autocorrelación espacial de la variable de interés*

Sobre la base de la cartografía censal, con el indicador compuesto integrado, se utilizarán dos métodos del Análisis de Datos Espaciales ampliamente utilizados para evaluar el grado de autocorrelación espacial. Para todos ellos, se establece una matriz w de pesos espaciales de tipo "contigüidad Reina" (unidades espaciales que comparten contigüidad en los lados o vértice). El primero de ellos es el índice I de Morán, que se utiliza para verificar si las unidades se distribuyen aleatoriamente en el espacio teniendo en cuenta la variable bajo estudio y proporciona una medida resumen de la intensidad de la autocorrelación de las unidades. Se expresa en la Ec.1.

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i'=1}^{n} w_{ii'}} \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{i'=1}^{n} w_{ii'}(y_i - \overline{y})(y_{i'} - \overline{y})}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2} \forall i \neq i' \qquad (1)$$

donde:
n = número de número de unidades espaciales en una región *S*.
y_i = valor de la variable *y* para la i-ésima unidad en el punto de coordenadas s_i.
$\overline{y}$= es la media de la variable *y*.
$w_{ii'}$= es la ponderación geográfica entre la unidad espacial *i* y la unidad espacial *i'*.

Los resultados de la Ec.1 se complementan con el índice de asociación espacial local (LISA, por sus siglas en inglés) que evalúa la autocorrelación espacial para cada unidad i. El índice LISA arroja como resultado la conformación de 5 clusters: Alto-Alto (llamados puntos calientes o *hotspot*), Bajo-Bajo (puntos fríos o *coldspot*), Alto-Bajo, Bajo-Alto y, relación no significativa.

- *Paso 4: extracción de muestras mediante algoritmos basados en distancias*

Una vez evaluada la autocorrelación espacial, se utiliza el método de muestreo espacial "Spatially Correlated Poisson Sampling" (SCPS), cuya utilidad con variables censales y demográficas es satisfactoria (Pagura et al., 2021). Grafström (2012) propuso este método secuencial que ordena de forma aleatoria un listado de las unidades geográficas, decidiendo para cada unidad de la población si ingresa o no a la muestra a partir de las probabilidades de inclusión, las que van cambiando a medida que se incluye una nueva unidad en la muestra. Su aplicación puede resultar útil para trabajar con variables socioeconómicas y demográficas. Se opta por una probabilidad de inclusión proporcional al tamaño, considerando el tamaño de los radios censales no por su extensión sino por la cantidad de hogares que presenta cada radio. Específicamente, el método secuencial que se utiliza en este algoritmo es el de los pesos máximos, que consiste en seleccionar una primera unidad t de manera aleatoria y luego le da el máximo peso posible a la unidad k=t+1 más cercana y luego, le otorga el máximo peso posible a la segunda unidad más cercana, y así sucesivamente (Benedetti et al., 2015).

Se extraerán tres muestras de primer orden de tamaño n=100, n=50 y n=10 radios censales. Este procedimiento se lleva a cabo con el paquete "BalancedSampling" de R (Grafström et al., 2024).

- *Paso 5: estimación de la variable de interés en las muestras.*

Finalmente, sobre la base de la variable de interés construida, se calcula el estimador Horvitz-Thompson de la media, típicamente utilizado para los planes de muestreo de poblaciones finitas sin reemplazamiento y con probabilidades de inclusión diferentes (Lohr, 2021). Se expresa en la Ec.2.

$$\hat{\hat{Y}}_{HT} = \frac{\sum_{i \in S} \frac{y_i}{\pi_i}}{N} \qquad (2)$$

donde:
y_i = es el valor de la variable de interés para la i-ésima unidad de primer orden.
π_i = es la probabilidad de inclusión de la i-ésima unidad de primer orden.
S = es el conjunto de unidades de primer orden seleccionadas en la muestra.
N = es el tamaño de la población.

RESULTADOS

En primer lugar, se describe al recorte de las bases de datos con las que se trabaja. Los microdatos del CNPHV 2010 y su cartografía censal se filtraron según espacio urbano de los departamentos que componen el Gran Salta, constituyendo un total de 14442 hogares distribuidos en 481 radios censales. Se observa en la Figura 1 en aquellos radios coloreados de naranja.

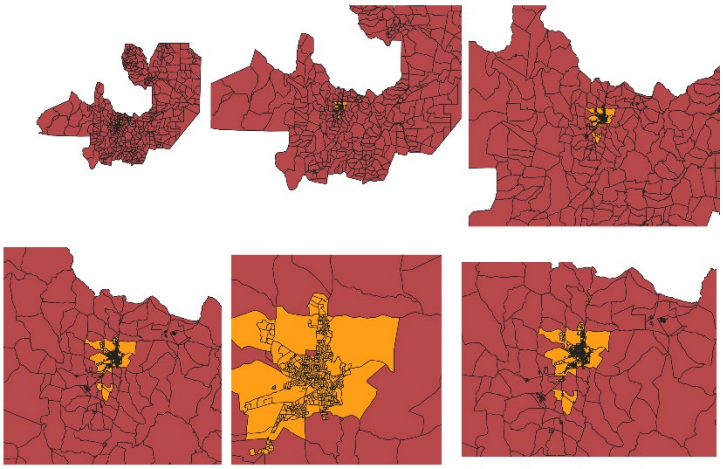


Figura 1: recorte de radios censales urbanos de los departamentos que integran el Gran Salta

Como se mencionó anteriormente, los radios censales son la unidad geoespacial mínima del INDEC y conforman polígonos irregulares que se establecen para tareas operativas y logísticas de los censos, por lo que no necesariamente coinciden con las características físicas (y urbanas) de su entorno. El recorte que se expone en la Figura 1 no coincide exactamente con la continuidad topológica del aglomerado urbano ni del área metropolitana, aunque corresponden a un espacio equivalente. A continuación, se desarrollan los resultados de los pasos secuenciales establecidos en la metodología.

Conformación del indicador compuesto y su cálculo a nivel radio censal

En primer lugar, se operacionalizaron los subindicadores a partir de las variables censales y se estimaron en la base, a los fines de calcular la incidencia relativa de cada dimensión. Para la dimensión de Vulnerabilidad Socioeconómica se identificó una incidencia del 25,45%, para la dimensión de Vivienda Térmicamente Ineficiente una incidencia del 38,9% y, finalmente, para la dimensión de Necesidades Energéticas Básicas una incidencia del 9,94%. Se calcularon proporciones de intensidad de la matriz condicional arrojando como resultado que un 43% del total de los hogares cumple con al menos una condición de alguna de las dimensiones, 13% cumple con dos condiciones y un 2% cumple con 3. En vista de esto y de los descriptivos obtenidos de la base en general, se establece una línea de corte general para el IVPE: debe cumplir al menos dos condiciones de la dimensión VTI y al menos una de VSE. No se considera una línea de corte de la dimensión de NEB por su relativamente baja incidencia.

De esta manera, se caracteriza una situación de privación que integra aspectos socioeconómicos típicamente abordados en los estudios de pobreza y vulnerabilidad junto con aspectos específicos vinculados a deficiencias en las prestaciones de los servicios energéticos domésticos. El hecho de que se utilicen variables censales para definir este indicador es relevante, puesto que sobre la base del censo

es que se puede establecer un marco de muestreo de los hogares de una población. Como resultado final se obtiene que la incidencia global del IVPE es de 15,51% de los hogares urbanos dentro del área comprendida por los departamentos de Salta, Cerrillos y La Caldera. Este indicador se agrega a la base de datos en archivo csv para luego unirse a la capa vectorial de la cartografía censal Así, queda conformado el marco muestral espacial.

Evaluación de autocorrelación espacial

Cuando se trabaja con el espacio es necesario tener en cuenta el fenómeno de la dependencia espacial, que se define como la relación funcional existente entre los valores que adopta una variable en una unidad de espacio y aquellos valores en unidades contiguas. Esto se expresa en la llamada primera ley de la geografía, en la cual se plantea que todo está relacionado con todo, pero las cosas más cercanas están más relacionadas que las cosas distantes (Tobler, 1970). Este fenómeno representa un problema respecto de la representatividad de los instrumentos muestrales de medición demográfica debido a que los datos autocorrelacionados violan la premisa de independencia de las observaciones en la mayor parte de los procedimientos estadísticos (Legendre, 1993).

Si bien este principio se observa de forma clara en la mayoría de las variables físico-naturales, en el análisis socioespacial (variables socioeconómicas, demográficas, culturales, entre otras) es recomendable medir la autocorrelación espacial en cada caso de estudio en particular. A partir de este marco se procede con el análisis y evaluación de la autocorrelación de la variable IVPE. Como se especificó en el apartado metodológico, mediante el uso del paquete *rgeoda* se calculan los valores de autocorrelación espacial de Morán y el análisis LISA de autocorrelación espacial local.

Según el criterio de contigüidad tipo Reina (considera todas las unidades que limiten con los lados y las aristas de los polígonos) el valor obtenido del índice de Morán es de 0,56 ($p< 0,001$), valor que indica una autocorrelación positiva moderada. Esto implica que la distribución espacial de los radios con mayor número de hogares en situación de IVPE=1 se encuentran relativamente próximos entre sí, al igual que los radios con menor número de hogares en esta situación. Si bien el valor del índice no es lo suficientemente alto para marcar una tendencia espacial fuerte, el valor moderado indica que al menos es prudente considerar los efectos de la redundancia por autocorrelación espacial a la hora de establecer el muestreo.

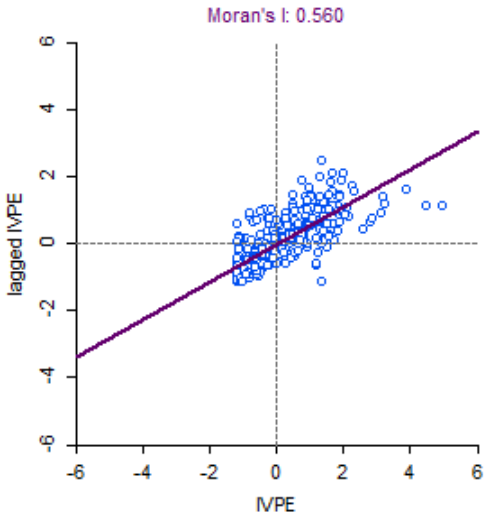


Figura 2: Índice de Morán de la variable construida IVPE para dptos. del Gran Salta.

En la Figura 2 se presenta el gráfico de dispersión de Morán, en donde se observa que la nube de puntos que aparece concentrada mayoritariamente en el cuadrante inferior izquierdo, aunque dispersos hacia la dirección del cuadrante superior derecho. La interpretación de este gráfico es la siguiente: si un cuadrante acumula una mayor cantidad de puntos en relación a los otros cuadrantes significa que existen radios censales con un porcentaje alto de hogares en situación de privación energética cerca de otros radios con valores porcentuales similares. En este caso se observa que para los cuadrantes inferior

derecho y superior izquierdo no parecen tener un nivel de autocorrelación espacial significativa. Estas tendencias se observan con mayor precisión en los mapas LISA de autocorrelación espacial local. Mediante la evaluación de los indicadores de autocorrelación local, se obtiene un mapa de significancia y un mapa de clúster. El mapa de significación muestra las unidades geográficas con un valor de IVPE que resultan significativos, indicando el grado de esa significación, comenzando con un $p<0,05$ y mostrando todas las categorías de significancia para el número dado de permutaciones (que por defecto son 999). El mapa de clústers, por su parte, indica el tipo de asociación espacial entre unidades espaciales limítrofes. Al considerar una matriz de pesos espaciales de contigüidad tipo Reina, considera todas las unidades que limiten con los lados y las aristas de los polígonos.

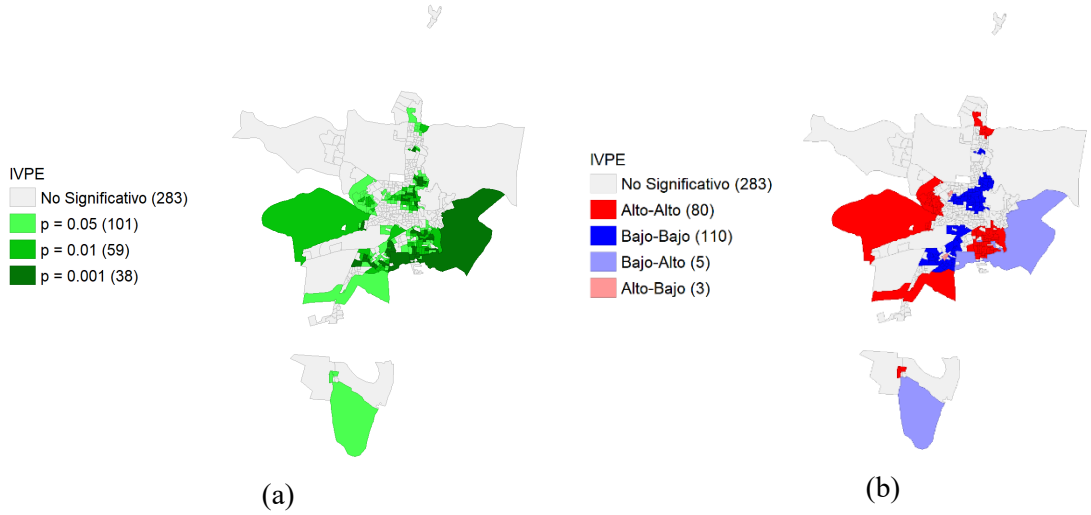


Figura 3: mapas LISA de significancia (a) y de clusters (b)

En 283 radios no se presentan valores de IVPE significativos, mientras que en el mapa de clusters se observa que 80 radios presentan una incidencia Alto-Alto, lo cual significa que existen radios con valores elevados positivos rodeados de valores similares, 110 radios presentan una incidencia Bajo-Bajo indicando una autocorrelación espacial negativa, se observan por el centro de la ciudad de Salta, congruente con análisis espaciales sobre variables socioeconómicas en donde los menores valores de privación suelen estar en el centro de las áreas urbanas configurando la relación de centro-periferia (Buzai & Montes Galbán, 2020). Los valores de disimilitud (Bajo-Alto y Alto-Bajo) suman entre los dos menos de diez unidades espaciales.

Se observa que la distribución espacial del indicador de vulnerabilidad de pobreza energética definido se comporta de manera esperable respecto de la lógica centro-periferia estudiada en la dimensión geográfica de la pobreza, aunque con un valor de autocorrelación espacial moderado. Se observa, también que los *hot-spots* del mapa LISA (b) de clústers se concentra sobre todo en las proximidades al este y al sur del centro de la ciudad, si bien aparentemente la superficie es menor que por ejemplo, las zonas rojas del este, esta concentra la mayor cantidad de radios censales con incidencia de IVPE. Como sucede con las estimaciones de pobreza por ingresos o pobreza multidimensional, los valores de menor incidencia del IVPE se encuentran en el centro urbano de la ciudad (en este caso, del departamento Capital de la provincia de Salta).

Extracción de la muestra espacialmente balanceada

Teniendo en cuenta que los valores del índice *I* de Morán fueron positivos y moderados, se procede a la extracción de la muestra espacial mediante el algoritmo SCPS que tiene en cuenta las distancias óptimas entre unidades. Se consignaron las tres muestras de primer orden de tamaño n=100, n=50 y n=10. En la Figura 3 se muestran los resultados de este procedimiento.

La muestra (a) contiene 31774 hogares, la muestra (b) unos 15713 hogares y la (c) unos 3430. En cuanto a la incidencia del IVPE para cada una de las muestras, evaluada a nivel de radio censal, es de 15,36% en la primera, de 13,42% en la segunda y, de 12,52% en la tercera.

Se observa también que la muestra (a) abarca una extensión territorial demasiado grande, aun cuando se trabajaran con una cantidad abordable de unidades de segundo orden (hogares) incluye a radios que por sí mismos tienen una gran extensión y que como se observa en los mapas LISA de la figura 3 no poseen valores significativos del IVPE. Las muestras (b) y (c) se ajustan más a los valores significativos de la variable de interés tanto bajos como altos, lo que ofrece una mayor variabilidad, que es deseable en el relevamiento de una muestra.

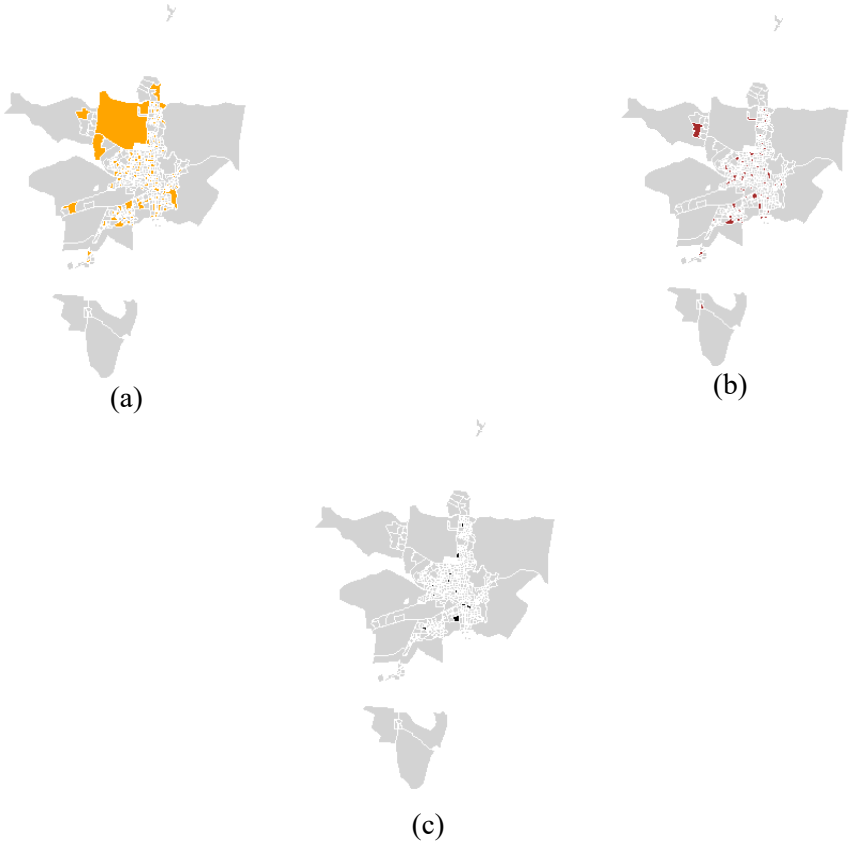


Figura 4: muestra espacial de radios censales de los departamentos del Gran Salta mediante SCPS. (a) n=100; (b) n=50, (c) n=10

Sobre la base de estas muestras de primer orden es que se puede establecer, consecutivamente, una de segundo orden que considere los hogares como entidades de interés, y una vez establecido el tamaño mínimo para el nivel de error deseable, distribuir esa cantidad en los radios seleccionados y ponderarlos de manera proporcional al tamaño. Finalmente, se estimaron los valores mediante el estimador de Horvitz-Thompson en una etapa, siguiendo el procedimiento de la Ec.2. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 2: estimador Horvitz-Thompson en una etapa del Indicador de Privaciones Energéticas Domésticas

Muestra	$\hat{\bar{Y}}_{HT}$(IVPE)
n=100	0,1453
n=50	0,1226
n=10	0,1179

Como es de esperarse en los planes de muestreo de poblaciones finitas y basados en el diseño, mientras más grande sea el tamaño de la muestra menor será el error y, por tanto, más cercano será el valor del

estadístico al valor del parámetro poblacional. El IVPE para la muestra de 100 radios censales tiene un valor expresado en porcentaje de 14,53%, el más cercano de las tres muestras al valor poblacional de 15,53%.

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un plan de muestreo espacial basado en el diseño y orientado al estudio de privaciones energéticas domésticas sobre el territorio censal del aglomerado urbano Gran Salta. El trabajo con variables censales de largo plazo, el análisis de su distribución espacial y un método probabilístico de selección de casos que tome en cuenta la dimensión geográfica de las unidades de muestreo resultan aportes novedosos en la investigación de fenómenos sociales en general y en la literatura sobre pobreza energética en particular. Este tipo de metodologías resultan de suma utilidad para el diseño de encuestas complejas, como las que abordan aspectos como el uso final de la energía por parte de los hogares, la calidad constructiva del parque de viviendas de una determinada región, la percepción de confort térmico que tienen las personas que la habitan, entre otros aspectos que suelen entrar en el alcance de la cobertura estadística de los institutos oficiales de países desarrollados y que para el contexto de países como Argentina o la región latinoamericana resultan costosos de conseguir.

Del análisis del comportamiento espacial del indicador se concluye que, aunque con un nivel de significancia moderado, se constituye una dinámica desigual entre el centro y la periferia del área urbana. Esto era esperable por cuanto los servicios de infraestructura de red como el gas o la electricidad (no contemplada en el censo, pero deducible de la tenencia de heladera), la concentración de las actividades económicas y comercio favorece más a los habitantes de los centros urbanos de las ciudades. Al mismo tiempo, cabe destacar que los datos con los que se trabajó en este artículo fueron relevados en un contexto macroeconómico considerablemente más favorable que el actual, por lo que sería esperable que la evaluación del mismo indicador con la edición del CNPHV 2022 y su respectiva cartografía censal arrojé resultados de mayor incidencia, del indicador compuesto y de las distintas dimensiones de privación.

Luego de evaluar el comportamiento espacial del indicador construido a nivel radio censal y corroborar la existencia de autocorrelación espacial se optó por un mecanismo de selección espacial que tenga en cuenta las distancias en las unidades. Aunque la precisión final del muestreo sería evaluada en un diseño en dos etapas, ya que aún la muestra de menor cantidad de radios tiene una cantidad de hogares demasiado grande para ser abordada. Para contribuciones futuras se espera avanzar hacia una muestra bietápica o poliétapica, que considere el procedimiento de selección de hogares utilizando métodos convencionales del muestreo probabilístico o bien que considere aspectos espaciales de la variable de interés en unidades espaciales más pequeñas como urbanizaciones o barrios. Asimismo, una vez avanzado este procedimiento se espera progresar en el relevamiento de datos primarios para poder realizar evaluaciones empíricas.

REFERENCIAS

Arakaki, A. (2016). Cuatro décadas de Necesidades Básicas Insatisfechas en Argentina. *Trabajo y sociedad*, *27*, 269-290.

Barrella, R., Romero, J. C., Laguillo, A., & Sevilla, E. (2023). Assessing the Impact of Shallow Renovation on Energy Poverty: A Primary Data Study. *Energies*, *16*(21), Article 21. https://doi.org/10.3390/en16217237

Benedetti, R., Piersimoni, F., & Postiglione, P. (2015). *Sampling Spatial Units for Agricultural Surveys*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46008-5

Boardman, B. (1991). *Fuel poverty: From cold homes to affordable warmth*. Belhaven Press. https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000794123994880

Boardman, B. (2009). *Fixing Fuel Poverty: Challenges and Solutions*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849774482

Borra, V. L. (2015). *Estadística espacial. Muestreo y modelización para la aplicación en estudios socioeconómicos.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Rosario]. http://hdl.handle.net/2133/11322

Bouzarovski, S., & Petrova, S. (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, *10*, 31-40. https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.06.007

Bouzarovski, S., & Thomson, H. (2018). Energy Vulnerability in the Grain of the City: Toward Neighborhood Typologies of Material Deprivation. *Annals of the American Association of Geographers*, *108*(3), 695-717. https://doi.org/10.1080/24694452.2017.1373624

Bouzarovski, S., Tirado Herrero, S., Petrova, S., & Ürge-Vorsatz, D. (2016). Unpacking the spaces and politics of energy poverty: Path-dependencies, deprivation and fuel switching in post-communist Hungary. *Local Environment*, *21*(9), 1151-1170. https://doi.org/10.1080/13549839.2015.1075480

Brand-Correa, L. I., & Steinberger, J. K. (2017). A Framework for Decoupling Human Need Satisfaction From Energy Use. *Ecological Economics*, *141*, 43-52. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.05.019

Burguillo, M., Barisone, M., & Juez-Martel, P. (2022). Which cooking and heating fuels are more likely to be used in energy-poor households? Exploring energy and fuel poverty in Argentina. *Energy Research & Social Science*, *87*, 102481. https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102481

Buzai, G. D., & Montes Galbán, E. J. (2020). *El mapa social de la ciudad de Córdoba (Argentina): Construcción cuantitativa e interpretación modelística*. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/168273

Civitaresi, H. M., Dondo Bühler, M. B., Sarmiento, J. I., Attaguile, M. D., Capuano, A. M., & Savarese, M. (2021). *Medición de pobreza y vulnerabilidad energética de los hogares.* http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/7254

Cressie, N. (2015). *Statistics for Spatial Data* (Revised Edition). John Wiley & Sons.

Durán, R., & Condori, M. (2019). Pobreza energética en la Argentina urbana. Validación de un indicador basado en la línea del 10% de los ingresos totales familiares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente - AVERMA*, *23*, 05.69-05.80.

Durán, R. J., & Condorí, M. Á. (2017). Desarrollo y estimación de un índice de vulnerabilidad socioenergética para departamentos de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, *21*. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/140360

Durán, R. J., & Condori, M. A. (2021). *Alcance de la tarifa social sobre los hogares en situación de pobreza energética de la Argentina urbana en el periodo 2016—2018*. https://doi.org/10.37838/unicen/est.29-075

Durán, R., & Morero, B. (2021). *Pobreza Energética en Santa Fe. Aportes para la construcción de un índice multidimensional.* [Technical Report]. Trama Tierra. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30796.54408

ENARGAS. (2021). *Pobreza Energética. Informes gráficos—Temáticas*. https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/informes-graficos/informes-graficos-categoria.php?tematica=40

García Ochoa, R. (2014). *Pobreza energética en América Latina* [Documento de proyecto]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/handle/11362/36661

González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *47*, 377-385. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.013

Horta, A., Gouveia, J. P., Schmidt, L., Sousa, J. C., Palma, P., & Simões, S. (2019). Energy poverty in Portugal: Combining vulnerability mapping with household interviews. *Energy and Buildings*, *203*, 109423. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109423

Ibañez Martín, M. M., Zabaloy, M. F., & Guzowski, C. (2019). Una primera exploración de la situación de pobreza energética en Argentina: ¿Es la pobreza energética un fenómeno independiente de las privaciones multidimensionales de la población? *Asociación Argentina de Economía Política*, 1-19.

Kumar, N. (2007). Spatial Sampling Design for a Demographic and Health Survey. *Population Research and Policy Review*, *26*(5), 581-599. https://doi.org/10.1007/s11113-007-9044-7

Kyprianou, I., & Serghides, D. (2020). Dealing with energy poverty in Cyprus – an overview. *International Journal of Sustainable Energy*, *39*(4), 308-320. https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1699560

Lavecchia, L., Miniaci, R., Valbonesi, P., & Venkateswaran, G. (2024). *Energy poverty risk: A spatial index based on energy efficiency* (Questioni di Economia e Finanza (Occasional Papers) 864). Bank

of Italy, Economic Research and International Relations Area. https://econpapers.repec.org/paper/bdiopques/qef_5f864_5f24.htm
Li, X., & Anselin, L. (2023). *rgeoda: R Library for Spatial Data Analysis* (Versión 0.0.10-4) [Software]. https://cran.r-project.org/web/packages/rgeoda/index.html
Liddell, C. (2012). Fuel poverty comes of age: Commemorating 21 years of research and policy. *Energy Policy*, *49*, 2-5. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.036
Lohr, S. L. (2021). *Sampling: Design and Analysis* (3.ª ed.). Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9780429298899
Middlemiss, L. (2017). A critical analysis of the new politics of fuel poverty in England. *Critical Social Policy*, *37*(3). https://doi.org/10.1177/0261018316674851
Mirza, B., & Szirmai, A. (2010). Towards a new measurement of energy poverty: A cross-community analysis of rural Pakistan. *MERIT Working Papers*, Article 2010-024. https://ideas.repec.org//p/unm/unumer/2010024.html
Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: Focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(1), 231-243. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.150
Panda, D., & Pradhan, R. P. (2024). Regional disparity in energy poverty: A spatial analysis of Odisha. *Regional Science Policy & Practice*, *16*(6), 100056. https://doi.org/10.1016/j.rspp.2024.100056
Pellicer-Sifres, V. (2018). Ampliando la comprensión de la pobreza energética desde el enfoque de capacidades: Hacia una mirada construida desde las personas afectadas. *Revista iberoamericana de estudios de desarrollo = Iberoamerican journal of development studies*, *7*(2), 138-163. https://doi.org/10.26754/ojs_ried/ijds.295
Poggiese, M. (2023). Segmentación de tarifas energéticas e incidencia distributiva en Argentina. Su vinculación con la pobreza energética. *Asociación Argentina de Economía Política*. https://aaep.org.ar/?p=7287
Puig, J. M. (2023). *Pobreza energética en Argentina* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. https://doi.org/10.35537/10915/162035
Thema, J., & Vondung, F. (2021). Expenditure-Based Indicators of Energy Poverty—An Analysis of Income and Expenditure Elasticities. *Energies*, *14*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/en14010008
Thomson, H., Bouzarovski, S., & Snell, C. (2017). Rethinking the measurement of energy poverty in Europe: A critical analysis of indicators and data. *Indoor and Built Environment*, *26*(7), 879-901. Scopus. https://doi.org/10.1177/1420326X17699260
Tirado Herrero, S. (2017). Energy poverty indicators: A critical review of methods. *Indoor and Built Environment*, *26*(7), 1018-1031. https://doi.org/10.1177/1420326X17718054
Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Calvo, R., Labraña, J., Oyarzún, T., & Valencia, F. (2019). Quality as a hidden dimension of energy poverty in middle-development countries. Literature review and case study from Chile. *Energy and Buildings*, *204*, 109463. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109463
Viñuela, J. M., Juan, G. S., Martini, I., & Chevez, P. (2021). Fundamentos y metodología para el análisis y evaluación de los hogares en condiciones de pobreza energética. *Sistema de envío y evaluación de artículos para las reuniones de trabajo de ASADES*, *25*, 315-326.
Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D., Software, P., & PBC. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* (Versión 1.1.4) [Software]. https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html

SPATIAL SAMPLING STRATEGY TO STUDY OF ENERGY POVERTY: AN APLICATION IN THE GRAN SALTA

ABSTRACT: This study develops a spatial sampling plan for households potentially experiencing energy poverty. The methodology is applied to the urban areas of the departments that make up the Gran Salta agglomeration, based on 2010 census data (the latest available georeferenced census information). To achieve this objective, a series of sequential steps is established, ranging from the development of an indicator as a proxy for energy poverty based on census variables to the evaluation of its spatial behavior and the selection of spatial units using a distance-based algorithm. The final sampling frame included a total population of 14,442 households distributed across 381 census tracts in the study area.

Key findings include the construction of a composite indicator of long-term energy poverty vulnerability, with an incidence of 15.51%. The spatial autocorrelation evaluation yielded a Moran's I value of 0.56, indicating a positive and moderate correlation. This work serves as a resource to support the design of surveys in research on energy poverty in the region.

Keywords: spatial sampling, energy poverty, Gran Salta

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 246-257, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

AVANCES EN PLATAFORMA DE MONITOREO PARA TELEGESTIÓN CON INDICADOR PR EN LA PLANTA FOTOVOLTAICA DE LA COOPERATIVA ELÉCTRICA DE ARMSTRONG

Castello Marcelo[1], Arraña Ignacio[1], Marino Edgardo[1], Salerno Juan[1], Oliva Maximiliano[1]
[1]Observatorio de Energía y Sustentabilidad - Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rosario
C.P. 2000 - Rosario
Tel. 0341 448-0102 - e-mail: cemarino63@gmail.com

RESUMEN: El presente artículo muestra los avances en la plataforma de telegestión desarrollada en código abierto, destinada al cálculo del Performance Ratio (PR) de una central fotovoltaica. El desarrollo de la plataforma constituye una de las etapas propuestas dentro del proyecto titulado "Desarrollo de un Sistema de Gestión de Planta Fotovoltaica de Baja Escala. Telemedición y Telegestión. Implementación en la Cooperativa de Armstrong - Código ENTCBRO0008447TC", el cual tiene como objetivo dotar de herramientas de gestión remota a las cooperativas eléctricas que han tomado el rol de generadoras de energía a partir de centrales fotovoltaicas. Se persigue con el mismo contribuir al fortalecimiento de las cooperativas eléctricas y propiciar un marco académico para la formación de futuros ingenieros en el ámbito de la operación de centrales de energías renovables y gestión inteligente de redes eléctricas. En el trabajo se presenta lo que se ha logrado en cada capa, quedando pendiente el cálculo del indicador PR -cuyo algoritmo ya se ha desarrollado- a partir de datos reales.

Palabras Claves: Generación distribuida, Cooperativas eléctricas, Telegestión, Performance ratio, Fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de reconvertir la matriz energética de la Argentina - basada mayoritariamente en la generación mediante fuentes térmicas-, a la vista, entre otras consecuencias, de los signos de calentamiento global, advertidos por reconocidos científicos e investigadores de todo el mundo, impulsa al cooperativismo a hacer un aporte en la promoción de energías obtenidas de fuentes renovables (Gallo, 2010).

En este contexto de transición energética, diversas cooperativas eléctricas argentinas, que en las últimas décadas se dedicaron a la distribución de electricidad actuando como intermediarios entre el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y los consumidores finales, se han convertido también en generadores de energía eléctrica renovable, particularmente fotovoltaica.

La Federación Argentina de Cooperativas de Electricidad y Otros Servicios Públicos Ltda. (FACE) desde el año 2007 lleva adelante el proyecto Generación Eléctrica de Cooperativas Integradas (GECI). El objetivo es desarrollar centrales de generación de energía eléctrica que posibiliten el abastecimiento de los importantes incrementos de demanda de energía eléctrica que experimentan las cooperativas asociadas, utilizando preferentemente recursos energéticos regionales, renovables y no contaminantes (Carrizo et al, 2014).

En este marco, en la provincia de Santa Fe, la Cooperativa de Provisión de Obras y Servicios Públicos Ltda. de Armstrong (CELAR) es una de las primeras que ha tomado este nuevo rol. Entre el año 2015 y 2018, el Proyecto de Redes Inteligentes con Energías Renovables (PRIER) financiado parcialmente por

la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, a través del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), subsidio el 80% de la inversión para instalar una central fotovoltaica de 275 kWp y 250 kW que en septiembre de 2017 se conectó en paralelo a la red para inyectar energía. En el proyecto PRIER, además de la CELAR, los actores involucrados fueron el Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES) de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rosario (UTN-FRRo) y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
En septiembre de 2023, seis años después de la puesta en operación de la central fotovoltaica, los ahorros económicos que se produjeron en la CELAR por la compra de energía evitada en el MEM, se reinvirtieron y se amplió la potencia instalada a 309,1 kWp y 275 kW. En la figura 1 se puede ver la planta ampliada.



Figura 1: Imagen aérea de la central fotovoltaica de Armstrong. A la derecha se observa la Central instalada originalmente, a la izquierda la segunda etapa, luego de la reinversión.

El nuevo rol de las cooperativas como generadoras de energía, incluye necesariamente la adopción de nuevos modelos de desarrollo más democráticos e inclusivos, y se entiende que la tecnología de telegestión propuesta es útil y necesaria, para asegurar la operación eficiente de los sistemas de generación.

Chemes y Garrido (2024) destacan estos nuevos modelos de generación distribuida con energías renovables (GDER) que tiene por objeto compartir la energía producida, ya sea con fines privados, para uso comunitario o solidario y de este modo categorizan energías con fines colaborativos o comunitarios. “La generación de energía se comparte, se reparte, se dona, se gestiona o se co-gestiona”.

En este contexto tecnológico y cultural, el indicador Performance Ratio (PR), definido por la norma IEC 61724 (2021), se presenta como una herramienta clave para evaluar y optimizar el desempeño de las plantas fotovoltaicas, especialmente como en este caso, de la de Armstrong. Determinar el PR de una instalación fotovoltaica es importante para la evaluación de proyectos porque ayuda a comprender qué ubicaciones proporcionarán las plantas más productivas, o bien, permite determinar si las condiciones en las que opera una planta existente son satisfactorias o requieren de acciones correctivas para aumentar su rendimiento (González et al, 2019).

Resulta claro que el manejo de estas herramientas debe contar con profesionales entrenados para su cabal aprovechamiento. Paralelamente y dentro de su marco de desarrollo académico, el OES propone avanzar en la especialización de los egresados de la Carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica en la FRRo, con la implementación de un bloque de tres asignaturas electivas específicas de la temática: “Fuentes Renovables de Energía”, “Movilidad Eléctrica” y “Redes Inteligentes”, un *trayecto académico* que estará a cargo de docentes investigadores que participan del proyecto de referencia de este trabajo y de otros relativos a la temática. La orientación y los contenidos de estas asignaturas serán nutridos por las experiencias adquiridas en el trabajo en los proyectos llevados adelante en Armstrong. La propuesta se implementará y formalizará en el presente año para comenzar a funcionar, una vez aprobada, en el próximo ciclo académico. De este modo, las instalaciones de la Cooperativa donde se desarrolla el trabajo, base de las experiencias surgidas en el proyecto, son fuente y a la vez destino, aula de campo y

laboratorio remoto para la formación de especificidades dentro de la Carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica.

METODOLOGÍA

El siguiente trabajo se desprende de la necesidad de dar respuesta a las hipótesis planteadas por el OES en el año 2022 con el proyecto "Desarrollo de un Sistema de Gestión de Planta Fotovoltaica de Baja Escala. Telemedición y Telegestión. Implementación en la Cooperativa de Armstrong" que se mencionan a continuación:

¿Es posible desarrollar herramientas no propietarias y de bajo costo que nos permitan a partir de mediciones en tiempo real, el telecontrol, la teleoperación y la mejora del rendimiento de plantas solares de potencias inferiores a 1 MW?

¿Es posible que estas herramientas puedan relacionarse y aplicarse en plantas que operan con sistemas comerciales multimarca?

La necesidad fue planteada a partir de observaciones propias que surgieron de la concreción, instalación y evaluación del proyecto PRIER (2015-2018) y de la necesidad de contar con herramientas de análisis, tratamiento y operación de la central fotovoltaica de Armstrong.

Para tal fin se desarrolló una plataforma de medición, recolección y tratamiento de datos de diseño propio, ajustando su funcionamiento y prestaciones a las necesidades de gestión de cualquier central fotovoltaica. El hecho de que la plataforma se haya desarrollado en código abierto permitirá que la herramienta de gestión pueda ser apropiada por cualquier otra cooperativa eléctrica del país. El modelo conceptual de la plataforma está basado en el modelo convencional de IoT (Internet of Things) con sus tres capas: Percepción – Transporte – Persistencia y Visualización. Actualmente el sistema se está poniendo a punto y fue dotado con funciones para obtener, transmitir, analizar, calcular, graficar y tomar decisiones de forma eficiente, confiable y remota.

En otras palabras, se desarrolló un sistema completo que permitirá con los futuros avances y el cumplimiento de las etapas propuestas, tomar decisiones técnicas que complementen la plataforma, logrando finalmente gestionar y operar una central de generación de energía solar de baja escala.

Este se presenta como un trabajo descriptivo y correlacional, para terminar como explicativo y aplicado. La metodología se basa en la aplicación de una plataforma y las interfaces asociadas, e incluye el desarrollo de:

- El Hardware específico para la captura de datos de potencia eléctrica generada, irradiancia solar recibida, temperatura ambiente y de módulos fotovoltaicos; y

- El Software que procesa los datos anteriores y realiza cálculos para generar, graficar curvas en tiempo real y mostrar el indicador de desempeño Performance Ratio (PR) según la norma IEC 61724-1 (2021).

Descripción conceptual de la plataforma

Como se mencionó anteriormente, la plataforma fue desarrollada desde la perspectiva conceptual del modelo de tres capas de IoT.

La capa de percepción es la responsable de la captura de los datos en el sitio donde se producen. Ya sean provenientes de un sensor de temperatura, de uno de radiación, o bien, del inversor o medidor de energía, esta capa es la que lee estos datos. Para lograrlo se emplean distintas tecnologías que van desde la implementación de microcontroladores con desarrollo de hardware y firmware dedicados, hasta scripts en lenguajes Python o Javascript que leen los datos producidos por los equipos mencionados.

Mediante un algoritmo de muestreo, se construye un registro resultante del procesamiento del dato muestreado. Este procesamiento incluye el cálculo de los valores máximo, mínimo, desvío estándar y promedio. El algoritmo usado se basa en el cumplimiento de los tiempos indicados en la tabla 1 "Sampling and recording interval requirements", donde se optó por los tiempos consignados en la clase A de medición "Class A High accuracy" de la norma IEC 61724-1:2021.

De esta manera es posible leer y procesar los datos sin importar la fuente que los produce, ya sea provenientes de equipos comerciales o equipamiento desarrollado por el OES.

La capa de transporte es la encargada de llevar el dato proveniente de la capa de percepción hacia el destino de almacenamiento, una base de datos. Para lograrlo, esta capa utiliza distintas tecnologías a saber: LoRaWAN, WiFi o Ethernet, su elección dependerá del lugar de emplazamiento y de la implementación en campo según el entorno y contexto (Castello, 2021). En general se vienen empleando varias de estas tecnologías para llevar el dato desde su generación hasta el destino final. En este trabajo se emplea Ethernet para el transporte dado que la planta posee esta red para la gestión de los inversores y medidores de energía. Se utilizó el protocolo MQTT (https://mqtt.org/) para el transporte de los datos provenientes de los sensores de campo. La justificación de esta elección radica en que este protocolo fue concebido para telemetría, es ampliamente utilizado en aplicaciones para IoT y es capaz de implementar capa de seguridad. La implementación de la seguridad en el transporte del dato es un requerimiento muy importante y fue planteado en la etapa de planificación. Para que el protocolo MQTT pueda incorporar la capa de seguridad, fue necesario crear los certificados TLS, tanto del lado servidor como del lado cliente. Para generar estos certificados se utilizaron las herramientas nativas del sistema operativo GNU/Linux, que es donde reside el servidor.

En la capa de persistencia de datos y visualización, la arquitectura utilizada consta de un servidor centralizado donde se aloja la herramienta de visualización con sus paneles y base de datos para el almacenamiento de las telemetrías y otros datos requeridos para la configuración del sistema. La herramienta utilizada es Thinsgboard CE (https://thingsboard.io). Esta herramienta está basada en software libre y la versión utilizada Comunity Edition (CE) es libre de licenciamientos y/o abonos mensuales para su utilización. Posee una dashboard altamente configurable mediate widgets e integra una base de datos Postgresql (https://www.postgresql.org/) también basada en software libre. Los widgets pueden mostrar valores numéricos en relojes (gauges) o gráficos en series temporales. Las variables se pueden montar en el mismo gráfico para hacer correlación entre las mismas y el usuario puede configurar el entorno de tiempo a visualizar. Esta herramienta también gestiona el envío de notificaciones de alarmas a la red Telegram.

En la Figura 2 se aprecia el diagrama en bloques de la arquitectura descripta, donde en la capa de percepción (campo) se encuentrasn los equipos comerciales o desarrollados por el OES. La capa de transporte, constituída por la infraestrucura de red de la planta con su conexión a Internet. Por último la capa de persistencia y visualización compuesta por un servidor con sistema operativo Debian GNU/Linux que implementa la herramienta Thingsboard CE.

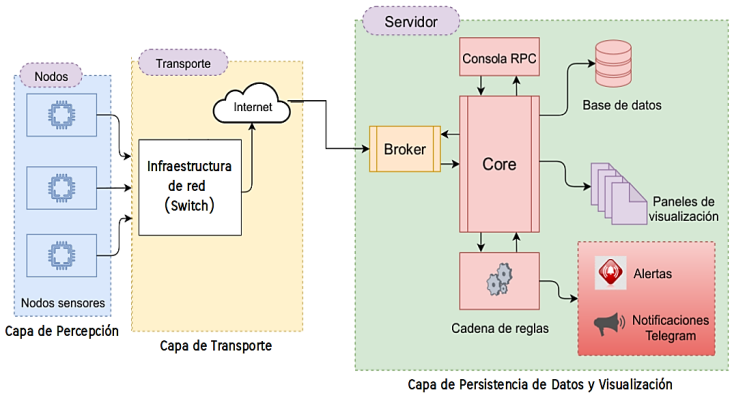


Figura 2: Diagrama de capas de la plataforma de medición

Indicador de desempeño: Performance Ratio (PR)

El PR es un indicador de calidad para plantas fotovoltaicas, captura el efecto general de las pérdidas del sistema fotovoltaico al convertir la radiación del sol en corriente alterna. Típicamente, las pérdidas son el resultado de factores tales como la degradación del módulo, la temperatura, la suciedad, las pérdidas del inversor, las pérdidas del transformador y el tiempo de inactividad del sistema y de la red. Cuanto más alto sea el PR, mayor será la eficiencia de energía de la planta (Asolmex y SolarPower Europe, 2018, p. 57).

Para el cálculo del PR la plataforma utiliza un script en Python basado en la expresión que se muestra en la Ec. (1) y que se ha obtenido de la norma IEC 61724-1 (2021).

$$PR_{25ºC} = (\sum_k P_{out,k} \times \tau_k)/(\sum_k \frac{(C_{k,25°C} \times P_0) \times G_{i,k} \times \tau_k}{G_{i,ref}}) \quad (1)$$

Donde:
$PR_{25ºC}$: performance ratio ajustado a 25 °C.
$P_{out,k}$: potencia de salida en corriente alterna, expresada en kW.
τ_k: duración del intervalo de registro, expresado en horas.
$C_{k,25°C}$: coeficiente de variación de potencia con la temperatura, expresado en $°C^{-1}$.
P_0: potencia fotovoltaica nominal, expresada en kW.
$G_{i,k}$: irradiancia en el plano de los paneles fotovoltaicos, expresado en W/m^2.
$G_{i,Rf}$: irradiancia de referencia, equivalente a 1000 W/m^2.

PRESENTACIÓN DE AVANCES Y RESULTADOS

Se presenta una primera etapa del desarrollo que examina la potencialidad de telegestionar una central fotovoltaica basándonos en la métrica del PR, a partir de la Ec. (1), tomando las lecturas de un piranómetro instalado en el plano de captación, un sensor de temperatura instalado en los módulos fotovoltaicos y de los datos de potencia eléctrica del medidor de energía de la central.

En la etapa de desarrollo actual la base de datos de la plataforma recibe señales en tiempo real de los sensores y dispositivos mencionados anteriormente, pero no todos están instalados en la central fotovoltaica de Armstrong. Esto es así ya que el sensor de radiación está montado al aire libre en el laboratorio del OES (ubicado en la ciudad de Rosario a 100 km de la central en estudio) a los fines de calibrarlo. Lo mismo ocurre con el sensor de temperatura que se instalará sobre los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, el medidor de energía eléctrica sí está instalado en la central fotovoltaica.

Además del necesario proceso de calibración de sensores, esta mecánica de trabajo se ha orientado a verificar el funcionamiento del software que calculará el PR en la plataforma. Una vez culminado este proceso y verificado el correcto funcionamiento de la plataforma, dichos sensores serán instalados en la central fotovoltaica y en las posiciones recomendadas por la norma IEC 61724-1 (2021).

Descripción y montaje de los sensores

A continuación, se listan las descripciones de los dispositivos y sensores mencionados anteriormente.

- Sensor de irradiancia para instalar en el plano de los paneles fotovoltaicos: Radiómetro Par fabricado por CNEA. Provisto por el grupo GERSolar (figura 3).

- Sensor de temperatura para módulo fotovoltaico: Modelo TC1047A, convertidor temperatura/tensión.

- Medidor de energía eléctrica: Marca Janitza. Modelo UMG 604-PRO (figura 4).

El sensor de irradiancia en el plano de los paneles se instalará en el plano de las cadenas fotovoltaicas respetando el ángulo de inclinación y azimut de los módulos fotovoltaicos.



Figura 3: Piranómetro utilizado para la medición de radiación en el plano de los paneles. Tipo Radiómetro PAR de CNEA.

Para el montaje del sensor de temperatura se tendrá en cuenta el impacto negativo que puede generar el uso de un pegamento no recomendado y que podría llegar a generar errores de medición en el largo plazo. En el presente caso se tiene pensado usar un sellador a base de caucho sintético con alto poder adhesivo y secado con consistencia de goma dura, pero que mantiene su flexibilidad. El material es resistente a la contracción y dilatación, a la intemperie, al envejecimiento y a los corrosivos. Respecto a la ubicación, se colocará en la celda central de uno de los módulos fotovoltaicos. El sensor estará alojado en el interior de una cápsula de aluminio de cara plana y rellena de material térmico/conductor.



Figura 4: Medidor de energía eléctrica Marca Janitza ya instalado en la central fotovoltaica.

El sistema recolecta los datos de los sensores y dispositivos a través de la red local de la planta de generación (“red de campo”).

Como la plataforma fue diseñada para trabajar con dispositivos multimarca, el sistema de telegestión permitirá ser replicado en cualquier central fotovoltaica que implemente dispositivos similares.

Descripción de la plataforma de visualización

En el planteamiento de este caso y para el uso de la red de campo, se implementó capa física ethernet y luego para dirigirlo hacia el servidor de persistencia y visualización, protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) que incluye capa de seguridad TLS (Transport Layer Security).

Llamando a cada punto de ingreso de datos de los sensores como “nodo” se definieron los requerimientos de hardware para estos nodos, que básicamente están conformados por un microcontrolador, un elemento sensor y la electrónica asociada para su funcionamiento.

En base a conceptualizaciones de software libre para el servidor de persistencia y visualización se implementa sistema operativo GNU/Linux distribución Debian.

La visualización se implementa con la dashboard Thingsboard versión Community Edition que es la versión libre de licenciamientos y contiene todas las funcionalidades necesarias para esta plataforma de monitoreo.

Paneles de visualización de la dashboard

A continuación, se muestran los paneles gráficos o widgets que integran la dashboard que permitirá monitorear la central fotovoltaica a un usuario autenticado. Dichos paneles muestran las curvas que se obtienen del procesamiento de los datos de los distintos sensores que van a integrar la capa física de la plataforma. Como se mencionó anteriormente, estas imágenes muestran datos de sensores ubicados en el laboratorio del OES y la propia central en Armstrong.

La figura 5 corresponde al widget de la irradiancia en el plano de los paneles. En el mismo se observa dicha variable para un período de selección de 6 días seguidos. Se vuelve a mencionar que actualmente este sensor está tomando mediciones de radiación en el laboratorio del OES de la Ciudad de Rosario, a los fines de calibración.

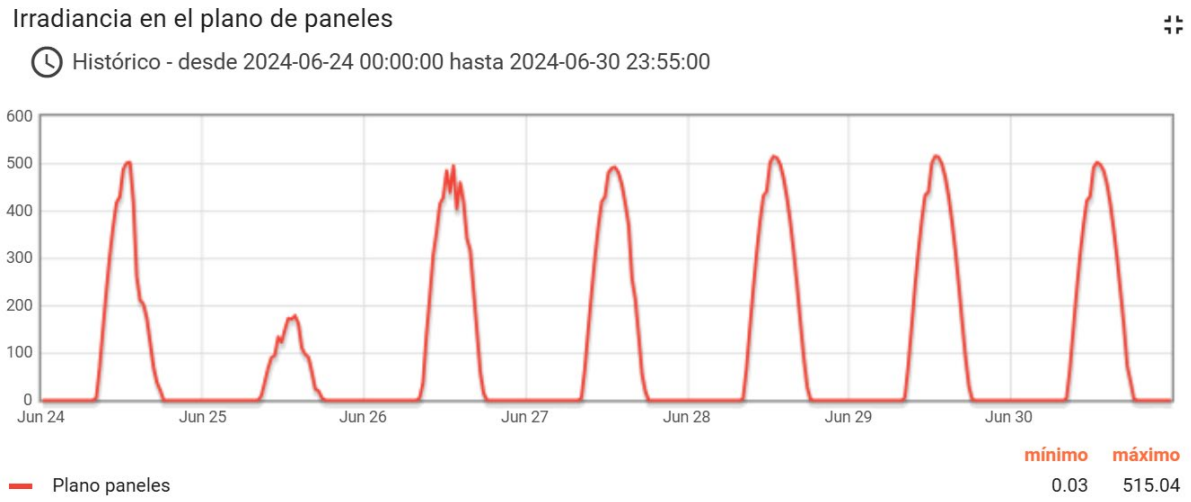


Figura 5: Irradiancia en el plano de los paneles fotovoltaicos.

La plataforma actualmente también recoge datos de un piranómetro instalado en el plano horizontal, que, a diferencia del sensor anterior, ya está instalado en la central. Si bien el dato no se utiliza para el cálculo de PR, forma parte de las variables meteorológicas típicas de una central fotovoltaica (figura 6).

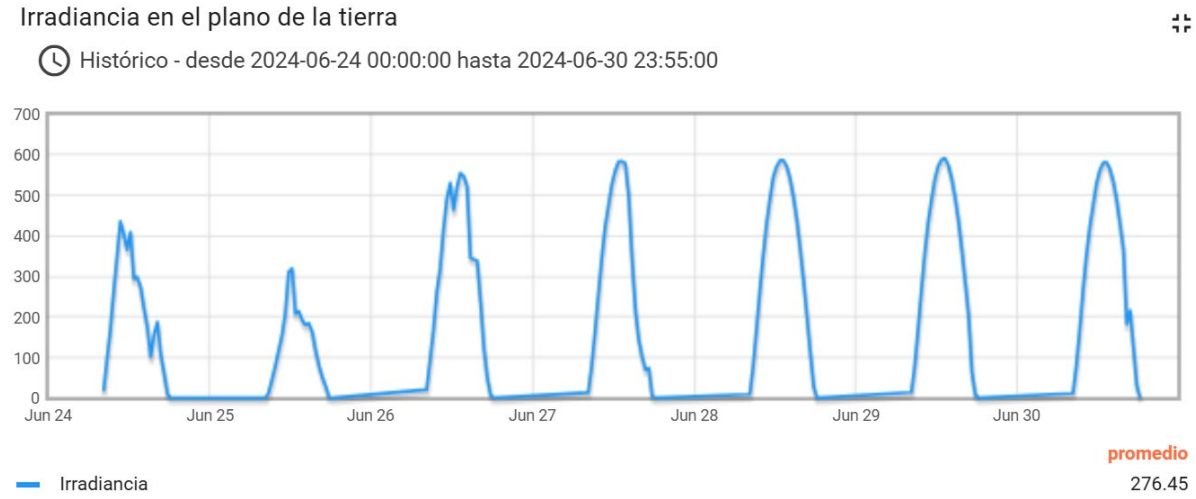


Figura 6: Irradiancia horizontal en la planta fotovoltaica.

La figura 7 muestra los datos recogidos del sensor de temperatura que será instalado en el dorso de los paneles fotovoltaicos de la central.

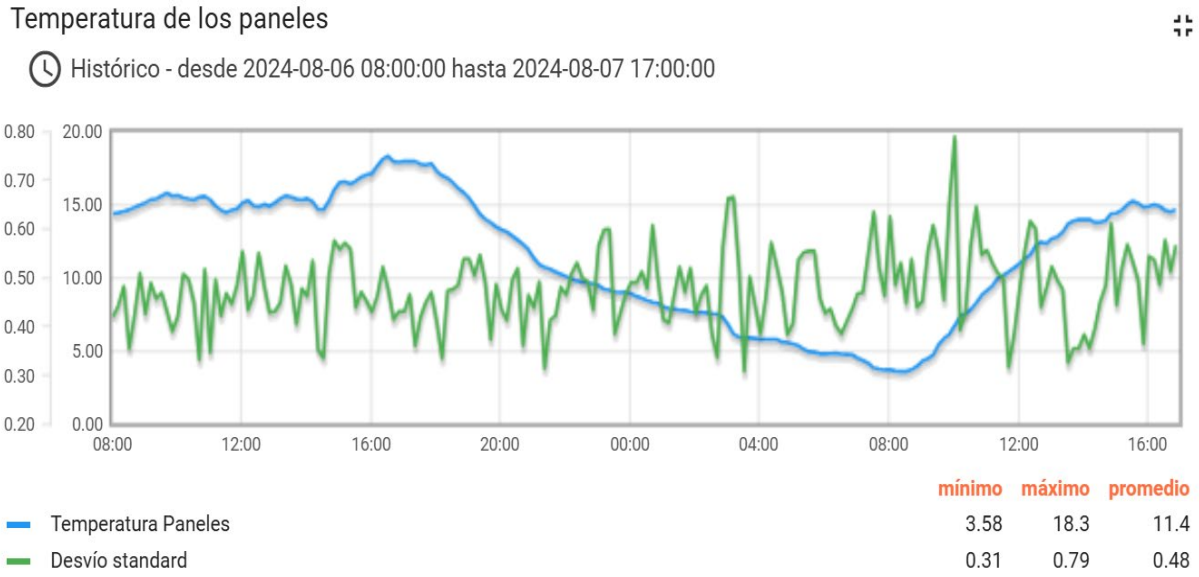


Figura 7: Widget de temperatura de los paneles fotovoltaicos y su desvío estándar.

En la figura 8 se observan los datos de potencia total y energía inyectada a red por la central, que se obtienen al interrogar el medidor de energía con la plataforma de telegestión. Los datos graficados se refieren a un día completo y parte del día siguiente.

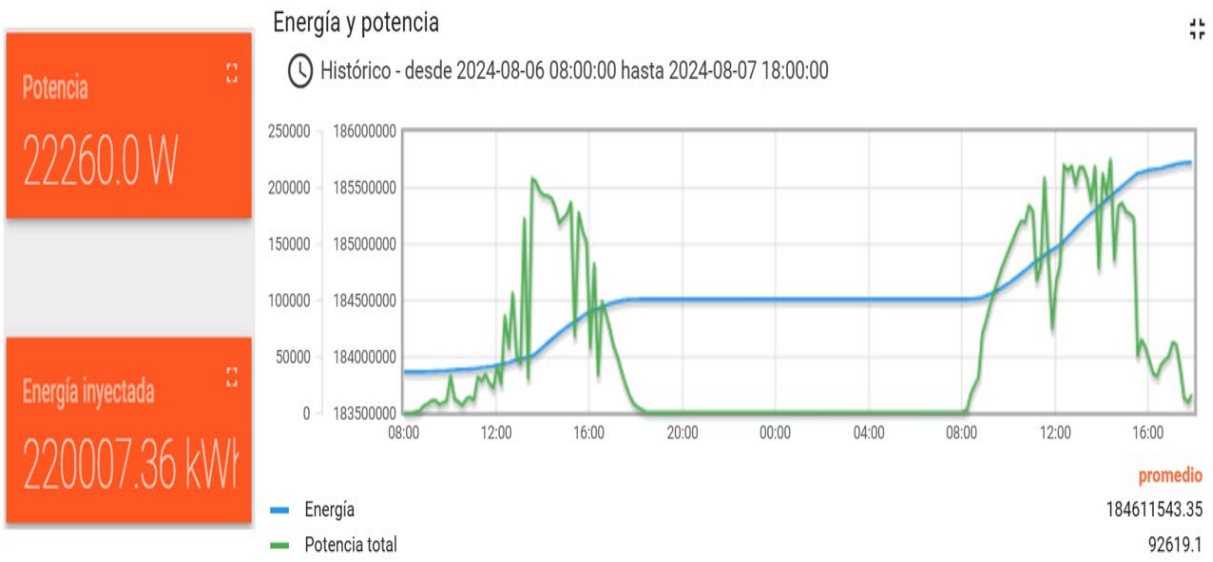


Figura 8: Potencia y energía inyectada a la red.

La figura 9, muestra de la dashboard la curva de potencia eléctrica para una serie de 8 días seguidos y en correspondencia la energía generada acumulada. En la parte inferior central se observa la última telemetría que nos permite corroborar la condición online de los sensores conectados.

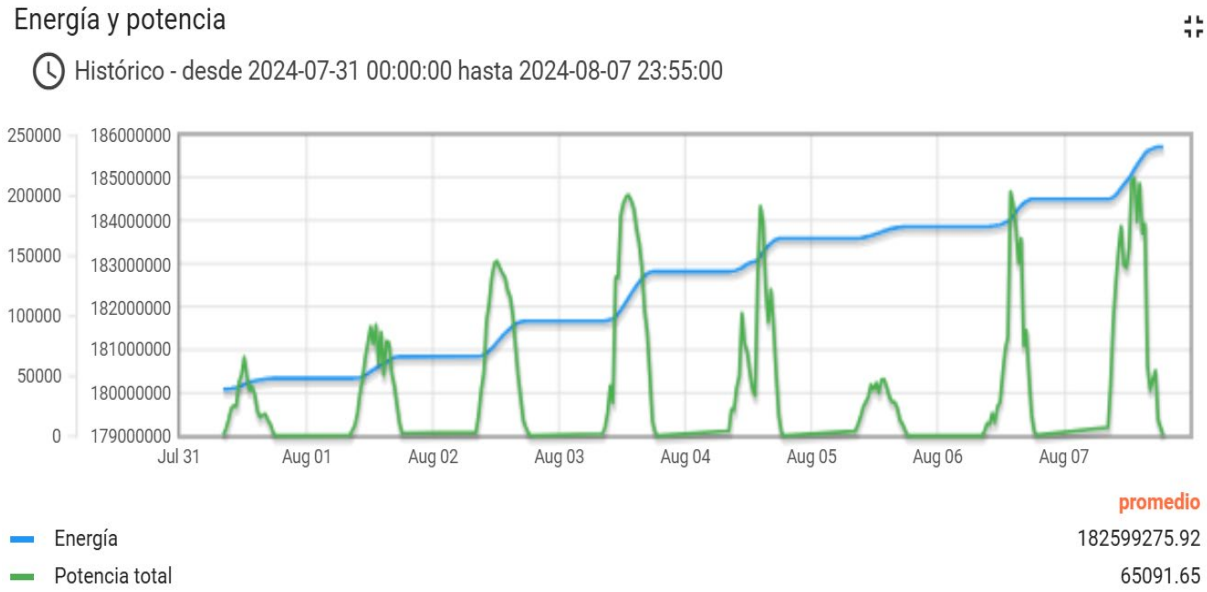


Figura 9: Visualización de potencia, energía acumulada y última telemetría.

La figura 10 se observa un panel o terminal de comunicación y se refiere al widget de una terminal que se comunica con el dispositivo final. Este dispositivo es básicamente el microcontrolador con toda la electrónica desarrollada que permite leer los sensores de temperatura y los sensores de radiación. Como se ve en la figura, su nombre es radade775801. El número 7758 se corresponde con el conversor analógico digital utilizado (AD7758) y el 01, es la numeración empleada para diferenciarlo de futuros conversores que puedan ser necesarios.

La terminal lleva el nombre RPC (Remote Procedure Call) y permite la conexión remota desde cualquier punto del planeta.

En el widget podemos escribir distintos comandos, en el caso de la figura se ejecutó un “read” y por ser el dispositivo de comunicación bidireccional, lee y devuelve datos de los sensores conectados, irradiancia (RadPan: 89.9347), temperatura de los paneles (TempPan: 8.929688) y temperatura ambiente (TempAmb: 8.660156).

El concepto de comando y por ser la terminal RPC, nos permite llegar a un procedimiento remoto que está en el microprocesador y conjuntamente con la electrónica asociada, ejecuta la orden y devuelve los datos instantáneos de los sensores.

En general los comandos se encuadran dentro de órdenes relacionadas con configuraciones, calibraciones o visualizaciones. Por ejemplo, se pueden cambiar nombres de los dispositivos o equipos (configuración), se pueden corregir offset de los sensores (calibración) o ver cantidad de eventos como ser reinicios (visualización). Este widget es particularmente utilizado por los usuarios administradores.



Figura 10: Terminal de llamado a Procedimiento Remoto (RPC).

Ejemplo: Caso de aplicación presentado

Como puede verse en la figura 11, los datos de campo obtenidos de los sistemas embebidos o del equipamiento de la planta se refieren a irradiancia, temperatura ambiente, temperatura de módulo fotovoltaico y potencia inyectada. Estos datos son dirigidos al servidor utilizando las tecnologías de comunicación descritas, donde se produce el almacenamiento en la base de datos. Un programa desarrollado en lenguaje Python accede a esta base de datos y aplica el algoritmo de cálculo de PR. Este programa devuelve el valor calculado y lo almacena en la misma base de datos. De esta manera el valor de PR queda disponible para su utilización, ya sea para realizar una serie temporal o mostrar el último dato calculado junto con su marca de tiempo. Cabe destacar que tanto los datos capturados como los calculados están disponibles en la base de datos para su exportación para futuros análisis, correlaciones con otras variables o procesamiento.

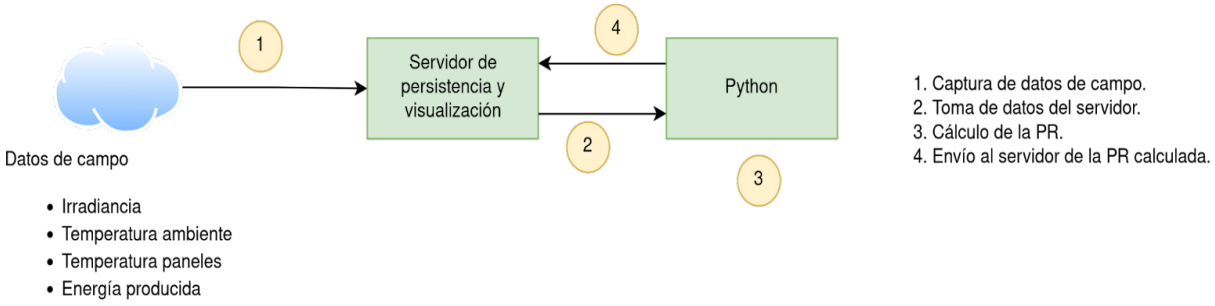


Figura 11: Diagrama para el cálculo de PR.

Mensajería de alertas

Una vez que la plataforma entre en funcionamiento se fijará el valor de PR esperado para la central y ante eventos aleatorios que saquen del comportamiento normal a la planta, la plataforma utilizará su complemento para gestionar y generar señales de alertas/alarmas. Esta aplicación, si bien utiliza la red Telegram para su difusión y comunicación con usuarios autenticados, tiene un gran componente de desarrollo propio, ya fue probada en otras aplicaciones y tiene muy buena aceptación por parte de esos usuarios.

CONCLUSIONES

Como se mencionó anteriormente se presenta en este trabajo y como avance de este desarrollo:

1. La capa física.
2. Los protocolos que permiten la vinculación de las interfaces y de la plataforma con las distintas tecnologías de multimarca comerciales, que componen la mayoría de las plantas solares del país.
3. El sistema de comunicación que transmite datos en tiempo real.
4. La plataforma de gestión, que analiza y presenta información y curvas en tiempo real.
5. La posibilidad de analizar cualquier periodo de medición y cálculo.
6. La generación de alertas/alarmas que permitirá accionar para mejorar el rendimiento.

Queda pendiente la incorporación a la plataforma de los datos tomados en tiempo real, con todos los sensores instalados en la central estudiada, para el cálculo del indicador PR. Esta tarea se realizará a la brevedad, ya que los sensores se encuentran en la etapa final de validación para su montaje en el sitio

de emplazamiento de la planta. El PR, junto a otras variables, permitirá seguir de manera instantánea el desempeño del parque fotovoltaico.

La implementación de sistemas de telegestión en centrales de energía solar para cooperativas eléctricas en Argentina promete mejorar significativamente su eficiencia operativa y económica. Este proyecto contribuirá a la sostenibilidad de las distribuidoras, y además, a partir del trayecto de aprendizaje que se propone, nacido del trabajo en este y otros proyectos, también proporcionará un marco académico robusto para la formación de futuros ingenieros en el ámbito de las energías renovables y la gestión inteligente de redes eléctricas.

Además, el rol de las cooperativas como generadoras de energía eléctrica permite traer a la escala local la discusión de políticas energéticas en el actual contexto de cambio climático y transición energética.

También se apunta que del análisis y debate de los integrantes y desarrolladores del Grupo OES, en un intercambio con referentes del consejo directivo de la Cooperativa de Armstrong, se determinó la necesidad de contar con un datalogger propio que dé respuestas específicas a la gestión de energía de una planta solar.

Esta discusión fue consensuada en el Grupo de investigación dando como resultado la propuesta y escritura de un nuevo proyecto titulado: "Diseño y desarrollo de un datalogger destinado al monitoreo de plantas fotovoltaicas", con fecha de inicio 01/04/2025 y finalización 01/04/2028. El Proyecto ha sido categorizado como PID EQUIPOS CONSOLIDADOS (PID TC) y se ha aprobado en su primera instancia en el Consejo Directivo de la Facultad Regional Rosario.

AGRADECIMIENTOS: Nuestro más sincero agradecimiento al directorio de la Cooperativa de Provisión de Obras y Servicios Públicos Ltda. de Armstrong y a su personal por permitirnos seguir incursionando técnica y tecnológicamente en las instalaciones de la central fotovoltaica y a los integrantes de GERsolar, especialmente a Raúl Righini por permitirnos trabajar en estudios previos con datos del piranómetro instalado en la planta y facilitarnos el piranómetro PAR fabricado por CNEA.

REFERENCIAS

Castello, M. (2021) Sistema de monitoreo de temperaturas en tiempo real para refrigeradores críticos de salud [Tesis de especialización en Internet de las Cosas, Fiuba, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires].

Carrizo, Silvina Cecilia; Jacinto, Guillermina Paula; Clementi, Luciana Vanesa; Un siglo de desafíos, realizaciones y proyectos para las cooperativas eléctricas en la Provincia de Buenos Aires; Universidad Nacional de Quilmes; Mundo Urbano; 43; 4-2014; 1-16.

Chemes, J., Garrido, S. (23-26 de julio de 2024). Transición energética y modelos colaborativos de generación distribuida con energías renovables. Relevamiento y análisis de comunidades energéticas en Argentina. Discurso principal. XV Jornada Latino-Americana de Estudios da Ciéncia e Tecnología. ESOCITE.LA - Campinas Brasil 2024.

Gallo, M. (2010). Energías renovables, el compromiso cooperativo. Revista Idelcoop - Año 2010 - Volumen 37 - N° 200. 308–322.

González, S. A. et al, Cálculo de la relación de rendimiento de una planta fotovoltaica mediante distintas metodologías. Caso de estudio en la Ciudad de Mar del Plata. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 23, pp 03.29-03.41. 2019.

International Electrotechnical Comission (IEC), Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring. Performances des systemes photovoltaïques - Partie 1: Surveillance. IEC 61724-1:2021.

PROGRESS ON TELEMANAGEMENT MONITORING PLATFORM WITH PR INDICATOR AT ARMSTRONG ELECTRIC COOPERATIVE PHOTOVOLTAIC PLANT

ABSTRACT: This article shows the progress of the telemanagement platform developed in open-source, aimed at calculating the Performance Ratio (PR) of a photovoltaic power plant. The development of the platform is one of the stages proposed within the project entitled "Development of a Small-Scale

Photovoltaic Plant Management System. Telemeasurement and Remote Management. Implementation in the Armstrong Cooperative - Code ENTCBRO0008447TC", which aims to provide remote management tools to electric cooperatives that have taken on the role of power generators from photovoltaic plants. The aim is to contribute to the strengthening of electric cooperatives and to provide an academic framework for the training of future engineers in the field of operation of renewable energy plants and intelligent management of electric grids. The work presents what has been achieved in each layer, pending the calculation of the PR indicator -whose algorithm has already been developed- from real data.

Keywords: Distributed generation, Electric cooperatives, Telemanagement, Performance ratio, Photovoltaics.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 258-266, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A PARTIR DE BIOGÁS PARA GESTIÓN DE RESIDUOS Y EMISIONES EN LA INDUSTRIA GANADERA ARGENTINA

Mariela Colombo[1], Ramiro Rodriguez[1,2], Ernesto Coutsiers[1,3]
[1]Calden Consultoría SRL – Av. Pedro Mariani 478, Villa Allende (5105), Córdoba
www.caldenconsultoria.com Tel. +549223-620271, email: mcolombo@caldenconsultoria.com
[2]Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299 (5000), Córdoba www.fcefyn.unc.edu.ar +543515353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar
[3]Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150 (4408), Salta
www.exactas.unsa.edu.ar +543874255408, ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar

RESUMEN: Este artículo explora el potencial de producción de hidrógeno a partir de biogás generado por residuos ganaderos en Argentina, con un enfoque particular en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, donde la actividad ganadera es más intensa. Se analiza cómo los sistemas de *feedlots*, al concentrar grandes cantidades de animales en espacios reducidos, generan un volumen significativo de residuos orgánicos que, a través de biodigestores, pueden ser transformados en biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono, puede ser convertido en hidrógeno mediante tecnologías de reformado como el *Dry Reforming*, lo que no solo mejora la eficiencia energética del proceso, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Este enfoque ofrece una doble ventaja: gestionar de manera sostenible los residuos ganaderos y contribuir a la descarbonización del sector energético. Los resultados de este estudio sugieren que la producción de hidrógeno a partir de biogás no solo es técnicamente viable, sino que también tiene un gran potencial para apoyar la transición energética en Argentina, particularmente en las regiones con una fuerte presencia de la industria ganadera.

Palabras clave: Biogás, Hidrógeno verde, Gestión de residuos ganaderos, Huella de carbono.

INTRODUCCIÓN

La producción de hidrógeno a partir de fuentes renovables ha surgido como una alternativa prometedora a los combustibles fósiles, debido a las crecientes preocupaciones ambientales relacionadas con el cambio climático y la necesidad de diversificar las fuentes de energía. Aunque la producción de hidrógeno mediante electrólisis y energías renovables ha ganado popularidad tanto en el entorno académico como en el mercado, este estudio se centra en el uso del biogás, producido a partir de residuos orgánicos, como una materia prima viable y sostenible para la producción de hidrógeno de bajas emisiones.

Argentina cuenta con un vasto sector ganadero; de hecho, a fines del 2022 había más ganado bovino (54.2 millones de cabezas, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2023) que habitantes en la nación (45.9 millones, Censo 2022). El sector ganadero es un pilar fundamental en la economía del país y en la vida cotidiana de la población, siendo Argentina uno de los países con mayor consumo de carne per cápita (BCR, 2023). En las últimas décadas, Argentina ha visto un notable crecimiento en la implementación de sistemas de engorde a corral, o *feedlots*, como método para la finalización del ganado bovino, especialmente en la región sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Este modelo intensivo ha permitido aumentar la eficiencia en la producción de carne, optimizando el uso de la tierra y mejorando los tiempos de engorde del ganado. Pero este crecimiento también ha traído preocupaciones significativas en términos ambientales. Los *feedlots* concentran grandes cantidades de animales en áreas reducidas, lo que genera altas concentraciones de excrementos, tanto sólidos como

líquidos. Esto ha resultado en un desbalance en el ciclo de nutrientes del suelo y ha aumentado la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales, debido a la liberación de nitrógeno, fósforo, metales pesados y otros contaminantes. A pesar de que existen regulaciones y metodologías para mitigar estos impactos, la gestión adecuada de estos residuos sigue siendo un desafío crítico para minimizar los riesgos de contaminación y preservar los recursos hídricos en la región (García et al., 2015; Alsina, del Carmen Muñoz, 2023; Glessi et al., 2012).

La gestión y valorización de los residuos orgánicos generados por los animales es esencial para reducir la huella de carbono de la industria ganadera y mitigar los efectos del cambio climático. El estiércol de ganado, en particular, es una fuente abundante y subutilizada de biomasa que puede ser transformada en biogás mediante digestión anaeróbica. El biogás se compone principalmente de metano (CH_4: 60-70%vol) y dióxido de carbono (CO_2: 30-40%vol), junto con pequeñas cantidades de otros componentes como sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) y agua (H_2O) (Pham Minh et al., 2018).

El biogás, aunque valioso como combustible renovable para la generación de energía térmica y eléctrica, también puede ser reformado para producir hidrógeno verde o renovable. Diversos estudios han demostrado que la producción de hidrógeno a partir de biogás es técnicamente factible y puede optimizarse mediante tecnologías de reforma como la reforma con vapor, la reforma autotérmica y la reforma seca o *Dry Reforming*, entre otras (Hajizadeh et al., 2022; Pham Minh et al., 2018; Kumar et al., 2022). Esta última tecnología, en particular, permite no sólo convertir el biogás en hidrógeno, sino también capturar y reutilizar el dióxido de carbono generado en el proceso, contribuyendo así a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este estudio analiza el potencial de producción de hidrógeno a partir de biogás generado por residuos ganaderos de *feedlots* en Argentina. Además, explora los beneficios ambientales y las oportunidades de desarrollo económico que esta iniciativa podría ofrecer.

Los resultados de este estudio podrían proporcionar una evaluación inicial para el análisis de tecnologías de producción de hidrógeno a partir de biogás en países con sectores ganaderos robustos como Argentina, ofreciendo una solución sostenible para la generación de energía y la gestión de residuos.

MÉTODOS

Potencial de producción de biogás

En 2012 se creó el Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa – UTF/ARG/020/ARG (PROBIOMASA), iniciativa llevada adelante por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y el Ministerio de Desarrollo Productivo, con asistencia técnica y administrativa de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Este proyecto ha generado una gran cantidad de información valiosa como la cuantificación de la biomasa disponible para la generación de energía utilizando la metodología WISDOM, desarrollada por la FAO. La última actualización de dicha cuantificación, realizada inicialmente en 2009, se realizó en el 2020 incluyendo el potencial de energía a partir de fuentes de biomasa húmeda proveniente de actividades ganaderas intensivas, como *feedlots*. El potencial de producción de biogás, por provincia, para *feedlots* según la actualización del 2020 se presenta en la Tabla 1 (FAO, 2020). Como se puede observar, las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe lideran el listado, cubriendo el 76% del potencial total del país.

Tabla 1: Potencial de producción de biogás por provincia de Argentina para feedlots, ordenados de mayor a menor. Fuente: FAO, 2020.

Provincia	**Potencial producción biogás *Feedlots* [x1000 m^3/año]**
Buenos Aires	119.320,0
Córdoba	68.781,8
Santa Fe	66.216,4
Entre Ríos	15.743,6
Salta	14.656,4
Santiago del Estero	13.167,3
San Luis	7.589,1
Tucumán	5.369,1
La Pampa	4.490,9
La Rioja	4.116,4
Misiones	3.630,9
Río Negro	2.118,2
Mendoza	1.920,0
Chaco	1.778,2
Chubut	1.678,2
Catamarca	1.074,5
Jujuy	1.000,0
Neuquén	914,5
Santa Cruz	770,9
Corrientes	423,6
San Juan	394,5
Tierra del Fuego	154,5
Formosa	0,0
Total	**335.309,1**

Definitivamente el potencial de producción de biogás en la región central de Argentina es elevado. Considerando sólo *feedlots*, 335,3 millones de m^3 de biogás por año representarían entre 577 y 738 GWh/año (Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina, 2019), equivalente al consumo eléctrico anual de aproximadamente 200.000 usuarios de Argentina, si se considera un consumo promedio por usuario de 3.4 MWh/año (GFA Consulting Group, 2021).

En el 2021 SENASA caracterizó la distribución y la composición de los establecimientos de engorde a corral, e identificó que el 59,53% de los establecimientos son pequeños, con menos de 1.000 bovinos (SENASA, 2021). A partir de este relevamiento, se puede obtener que el tamaño promedio de los establecimientos es de 400 cabezas aproximadamente. Considerando una producción anual de estiércol fresco de 8708 kg por animal y una producción de biogás de 0,0315 m^3 por kg de estiércol fresco (PROBIOMASA, 2021), este tipo de establecimientos podría producir 109.721 m^3 biogás al año, como se describe en la Tabla 2:

Tabla 2: Potencial de producción de biogás establecimientos pequeños de feedlots. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	**Valor**	**Unidad**
Cantidad de animales	400	-
Producción de estiércol fresco total	3.483.200	kg estiércol/año
Producción de biogás total	109.720,8	m^3 biogás/año

A partir de las estimaciones de potencial de biogás, se analizó el potencial de producción de hidrógeno, y el impacto en la huella de carbono que el proceso tendría en los establecimientos de *feedlot*.

Producción de hidrógeno a partir de biogás

La producción de biogás a partir de residuos ganaderos, como el estiércol de los animales, se lleva a cabo en un biodigestor. Este equipo es un sistema cerrado y hermético diseñado para la degradación de materia orgánica por microorganismos como bacterias y hongos, en un ambiente sin oxígeno (anaeróbico). Además de la producción de biogás, el biodigestor produce un lodo acuoso, rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que se puede emplear como fertilizante orgánico (García Páez).

Aunque el biogás es un combustible renovable, su uso convencional en la generación de calor, electricidad y/o vapor genera emisiones de CO_2. Además, la presencia de CO_2 en el biogás reduce su poder calorífico, lo que disminuye la eficiencia energética de los métodos tradicionales de aprovechamiento del biogás. La conversión del biogás en productos limpios y de alto valor, como el hidrógeno, aumenta la eficiencia de los sistemas y reduce o elimina las emisiones de gases de efectos invernadero (Hajizadeh et al., 2022).

En este estudio se evalúa el potencial de producción de hidrógeno renovable a partir de la combinación de la producción de biogás a través de digestión anaeróbica, con un proceso de reformado del gas para producción de hidrógeno, capturando la mayor cantidad de emisiones posible. Existen distintas tecnologías de *reforming* disponibles, como *Steam Reforming (SR)*, *Partial Oxidation Reforming (POR)*, *Autho-thermal Reforming (ATR)*, *Dry Reforming (DR)* y *Dry Oxidation Reforming (DOR)*. En general, todos estos métodos tienen en común que se parte de un hidrocarburo, que puede ser gas natural (CH_4), biogás u otro, y se produce una reacción en presencia de un catalizador produciendo H_2 y CO/CO_2. Sin embargo, el DR es el método más adecuado para su aplicación directa con biogás, ya que no se requiere de una separación del CO_2 antes de la reacción y permite recircular el CO_2 generado, reduciendo las emisiones (Kumar et al., 2022).

En la Figura 1 se presenta un esquema simplificado de la producción de hidrógeno a partir de biogás, utilizando DR. Una de las principales reacciones que se da en el reactor de DR es la conversión del CH_4 y CO_2 en syngas, compuesto principalmente de H_2 y CO. El syngas es enviado al *Water Gas Shift Reactor (WGSR),* etapa fundamental para enriquecer el contenido de H_2 en el producto. En esta etapa, el CO presente en el syngas reacciona con vapor de agua (H_2O) para producir H_2 y CO_2. Finalmente, se utiliza una instancia de separación para separar el H_2 del CO_2, siendo este último recirculado a la etapa de DR y a la etapa de WGSR para mejorar las eficiencias de los procesos (Hajizadeh et al., 2022).

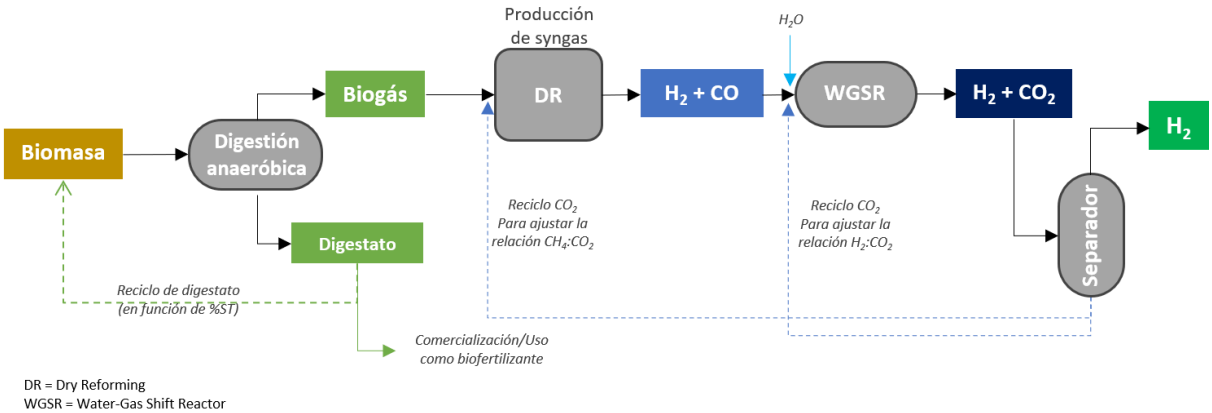


Figura 1: Esquema simplificado del proceso de producción de hidrógeno a partir de Dry Reforming de biogás. Fuente: Elaboración propia a partir de Hajizadeh et al., 2022.

Hajizadeh et al. (2022) realizó múltiples simulaciones para evaluar la performance y optimización del proceso detallado e identificaron un rendimiento de 8,11 kg/h de H_2 a partir de 150 m^3/d de estiércol de vaca alimentando a un biodigestor, o de 48,07 kg/h de biogás alimentando al proceso de DR. Por su parte, Hajjaji et al. (2016) también realizaron simulaciones para identificar las condiciones

termodinámicas óptimas para el proceso, e identificaron un potencial de producción de hidrógeno de 11,53 kg/h H_2 a partir de 97,17 kg/h de biogás. En ambos casos se considera una composición promedio del biogás (CH4: 60-65%, CO2: 40-35%).

Huella de carbono en la industria ganadera

Según la FAO (2023), la ganadería representa el 12% de las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por actividades humanas, con el potencial de seguir incrementando su impacto en el clima y medio ambiente si la demanda de carne en el mundo sigue incrementando. A su vez, se identifica que el ganado bovino es la principal fuente de emisiones, representando el 62% de las emisiones totales del sector, y la producción de carne el producto con mayor intensidad de carbono (67% de las emisiones totales), FAO (2023).

En Argentina, el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019) identificó que el 21,6% de las emisiones totales provienen de la ganadería. La actividad ganadera tiene distintas fuentes de emisiones (Demarchi, 2023):

- Fermentación entérica: principal fuente de emisiones de CH_4, a través de un proceso biológico que ocurre en el rumen y/o en el intestino grueso de los animales.
- Gestión del estiércol: genera principalmente CH_4 y N_2O, dependiendo del tratamiento y destino que se les da a las excretas.
- Gestión de las pasturas: emisiones producidas a partir del uso de fertilizantes o estiércol en los suelos los cuales incorporan N_2, que al degradarse emite N_2O.
- Uso de combustibles fósiles y consumo de energía: emisiones de CO_2 asociados a los requerimientos energéticos de la cadena de producción ganadera.

Si bien la principal fuente de emisiones proviene de la fermentación entérica, en segundo lugar, se encuentra la gestión del estiércol generando el mayor impacto los sistemas anaeróbicos abiertos, como las lagunas de tratamientos de efluentes. En este contexto, la implementación de sistemas de digestión anaeróbica surge como una alternativa interesante para la gestión de residuos, ya que permite obtener: biogás, fertilizante natural, mejora las condiciones sanitarias del establecimiento y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

A partir de las guías para la generación de inventarios nacionales de emisiones del IPCC (2006), el factor de emisiones asociado *sólo* a la gestión del estiércol de ganado bovino para América Latina se encuentra entre 1-2 kg CH_4/cabeza-año. Es importante tener presente que el metano tiene un potencial de calentamiento global (*GWP*, por sus siglas en inglés) 28 a 36 veces mayor que el dióxido de carbono.

La producción de biogás también permitiría compensar las emisiones asociadas al uso de combustibles fósiles y otros consumos de energía, en caso de utilizar el biogás para dichos requerimientos. La combustión del biogás permite la oxidación del CH_4, generando CO_2, a una tasa de 83.6 kg CO_{2eq}/GJ, para una composición con 65% de CH_4 y 35% CO_2 (Paolini et al., 2018).

A partir de estos valores, se analiza el potencial de reducción de emisiones del proceso de generación de hidrógeno a partir del reformado de biogás.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencial de producción de hidrógeno

A partir del potencial de producción de biogás a partir del estiércol recolectado en *feedlots*, y del rendimiento del proceso de DR para la producción de hidrogeno, se calculó el potencial de producción de hidrogeno total y para un establecimiento tipo.

En la Tabla 3 se muestra el potencial promedio de producción de H_2 para Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. A su vez, en dicha tabla se incluye la capacidad de electrolisis equivalente, que sería necesaria para producir la misma cantidad de hidrógeno, considerando una eficiencia del electrolizador de 55 kWh/kg H_2 y una operación continua, de 24 horas al día.

Tabla 3: Potencial de producción de hidrógeno a partir de biogás en provincias seleccionadas, y capacidad de electrólisis equivalente para misma capacidad de producción. Fuente: Elaboración propia.

Provincia	Producción total H_2 promedio [ton/año]	Capacidad de electrólisis equivalente [MW]
Buenos Aires	30.581,46	192,01
Córdoba	24.049,38	150,99
Santa Fe	21.681,82	136,13
Total	**76.312,66**	**479,13**

La Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno de Argentina (Secretaría de Asuntos Estratégicos de la Presidencia de la Nación, 2023) proyecta una demanda interna de hidrógeno de bajas emisiones de 20.0000 toneladas anuales a 2030, y 300.000 toneladas anuales adicionales para el mercado internacional. Si bien la Estrategia contempla como principales tecnologías de producción de H_2 de bajas emisiones la electrolisis y el reformado de metano con vapor con captura de carbono (SMR + CCUS, por sus siglas en inglés), el aprovechamiento del biogás podría representar un aporte significativo a las metas nacionales. Adicionalmente, las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe presentan una localización estratégica para el desarrollo de la economía de hidrogeno, con una gran conectividad y cercanía a los principales puertos del país y centros industriales, potenciales *hubs* de H_2.

Si se analiza el caso de un establecimiento de *feedlot* tipo, con 400 cabezas de ganado y una producción de biogás de 109 mil m^3 de biogás al año, el potencial de producción de H_2 es de 21 toneladas anuales.

Si comparamos la capacidad energética del potencial de biogás que se generaría en el establecimiento, con el del potencial de hidrógeno, se puede observar que la conversión a hidrógeno no implica una pérdida de capacidad energética (Tabla 4). De hecho, para generación de electricidad, la combustión del biogás permite obtener 1,5-1,9 kWh/kg (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina, 2019), mientras que el hidrógeno podría producir unos 20 kWh/kg en una celda de combustible, si se considera una eficiencia de conversión 60%. Para los potenciales de biogás e hidrógeno calculados para un establecimiento tipo, se puede observar como a partir del H_2 se podría generar mayor electricidad la cual, a su vez, no generaría emisiones como si lo genera la combustión del biogás. Otro beneficio adicional de la conversión del biogás al H_2, es que esta molécula también puede utilizarse para la producción de múltiples combustibles valiosos, como amoníaco e hidrocarburos sintéticos.

Tabla 4: Análisis capacidad energética biogás e hidrógeno, para establecimiento de feedlot de 400 cabezas. Fuente: Elaboración propia.

Capacidad energética	Biogás	Hidrógeno	Unidad
Poder calorífico	6,5	3,3 *(promedio)*	kWh/m^3
Capacidad energética potencial	713.185,2	761.914,1	kWh/año
Generación de electricidad potencial	213.955,6	419.094,7	kWh/año

Reducción en la huella de carbono

Hajizadeh et al. (2022) identificó que el proceso de producción de hidrógeno a partir de biogás, con un proceso de DR permitía reducir las emisiones, con respecto al uso de biogás para generación de energía por combustión. Para una producción de 8.11 kg/h de H_2 a partir de 48.07 kg/h de biogás las emisiones totales del proceso son de CO_{2eq} son 35.73 kg/h.

En la Tabla 5 se analizan los distintos escenarios de emisiones, para un establecimiento ganadero de feedlot de 400 animales:

Tabla 5: Emisiones asociadas al uso de biogás y a la producción de hidrógeno por DR. Fuente: Elaboración propia.

Emisiones por actividad	**Valor**	**Unidad**
Generación de electricidad con biogás	215-240	tonCO_2/año
Producción de H_2 a partir de DR	92	tonCO_{2eq}/año

El proceso de producción de hidrógeno, si bien permite capturar gran parte del CO_2 presenta consumos de energía en intercambiadores, reactores y compresores que reducen la eficiencia térmica y energética del proceso. Sin embargo, si se compara el uso directo del biogás para generación de electricidad, con respecto a la conversión de H_2 y su posterior uso para generación de electricidad se lograría una reducción del 60% de las toneladas de dióxido de carbono emitidas. En este proceso, al integrar la digestión anaeróbica con la generación de hidrógeno, también podrían reducirse las emisiones generadas por la gestión de estiércol asociado a establecimientos ganaderos.

La generación de 92,3 ton CO_{2eq}/año, para una producción de 21 ton H_2/año, en un establecimiento de *feedlot* tipo, representa una intensidad de carbono de 4,4 kgCO_{2eq} por kg H_2 producido. Esto es significativamente menor a las emisiones asociadas a la principal cadena de producción de hidrógeno actual, que es a partir de gas natural por refomado de vapor, presentando una intensidad de carbono de 7.5 a 13 kgCO_{2eq}/kgH_2 (Incer-Valverde et al., 2023).

Dado el importante aporte del sector ganadero al inventario nacional de gases de efecto invernadero, y el compromiso asumido por el país de reducir sus emisiones a 2030 (UNFCCC, 2021) todas las estrategias que permitan valorizar energéticamente los residuos y reducir las emisiones netas serían de gran beneficio a nivel nacional. Aunque se ha identificado un gran potencial para la producción de hidrógeno mediante este método, no se espera que esta tecnología reemplace la producción de hidrógeno de bajas emisiones por electrólisis o SMR + CCUS. Sin embargo, es una alternativa interesante a considerar en regiones con una fuerte industria ganadera, como lo es la región central de Argentina.

CONCLUSIONES

La producción de hidrógeno a partir de biogás generado por residuos ganaderos en *feedlots* presenta un notable potencial en Argentina, particularmente en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. Esta tecnología no solo ofrece una solución sostenible para la gestión de residuos, sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono de la industria ganadera al aprovechar los residuos, que mal gestionados pueden generar un gran impacto ambiental. La conversión del biogás en hidrógeno, especialmente mediante tecnologías de reformado como el *Dry Reforming*, mejora la eficiencia energética y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, posicionando a esta iniciativa como una estrategia clave para la transición energética en regiones con una fuerte actividad ganadera. Además, la integración de esta tecnología con la infraestructura existente y su cercanía a los principales centros industriales y puertos del país refuerza su viabilidad y relevancia en el contexto de la estrategia nacional para el desarrollo de la economía del hidrógeno. Así, la implementación de este enfoque no solo impulsa la sostenibilidad del sector ganadero, sino que también contribuye al cumplimiento de los objetivos nacionales en materia de reducción de emisiones y descarbonización.

Como siguientes pasos, se deberá analizar la cadena de valor completa asociada a la producción de hidrógeno a partir de biogás y establecer el costo nivelado del hidrógeno, para entender su competitividad con respecto a las otras alternativas tecnológicas de producción.

REFERENCIAS

Alsina M. V., del Carmen Muñoz G. M. (2023). Análisis de las normativas de engorde a corral o feedlot de la región pampeana desde la mirada de la teoría de sistemas. Ejes de Economía y Sociedad Vol. 7 Núm. 12.

Bollini Braga L. et al. (2013). Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28, pp. 166-173.

Bolsa de Comercio de Rosario (BCR) [en línea] La ganadería argentina creció en exportaciones, producción y empleo en 2022. Dirección URL: <

https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/la-ganaderia-2#:~:text=El%20sector%20ganadero%2C%20clave%20para,de%20cada%2020%20empleos%20argentinos> [consulta: 30 de julio de 2024]
Censo 2022, República Argentina [en línea] Resultados definitivos del Censo 2022. Dirección URL: <https://censo.gob.ar/index.php/datos_definitivos_total_pais/> [consulta: 10 de julio de 2024]
Demarchi J. D., (2023). Huella de carbono de la ganadería de carne argentina: Situación actual y perspectiva de futuro. Nexo Agropecuario 11(2).
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2020). Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N°19.
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2023). Pathway towards lower emissions. A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options for livestock agrifood systems.
García A. R. et al. (2015). Observaciones, desafíos y oportunidades en el manejo de efluentes de feedlot en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Ecología Austral 25, pp. 255-262.
García Páez V. Manual de biogás: Conceptos básicos, beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático.
GFA Consulting Group (2021). Sector Residencial: Principales consumos en la región AMBA. Proyecto Eficiencia Energética en Argentina.
Glessi W. M. et al. (2012). Impacto ambiental de los contaminantes provenientes de aguas residuales de feed-lot sobre aguas subterráneas. Avances en Ciencias e Ingenieras 3(4), pp. 81-87.
Hajizadeh et al. (2022). Hydrogen production from biomass through integration of anaerobic digestion and biogas dry reforming. Applied Energy 309.
Hajjaji N. et al. (2016). Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming. International Journal of Hydrogen Energy 41(14), pp. 6064-6075.
Incer-Valverde J. et al. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. Energy Conversión and Management 291.
IPCC (2006). Chapter 10: Emissions from livestock and manure management.
Kumar R. et al. (2022). Overview of hydrogen production from biogas reforming: Technological advancement. International Journal of Hydrogen Energy 47, pp. 34831-34855.
Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Colección de Documentos Técnicos N°12.
Paolini V. et al. (2018). Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 53(10), pp. 899-906.
Pham Minh D. et al. (2018). Chapter 4 - Hydrogen production from biogas reforming: An overview of Steam Reforming, Dry Reforming and Tri-Reforming of Methane. Hydrogen Supply Chain, pp. 111-166.
PROBIOMASA [en línea] Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa. Dirección URL: <http://www.probiomasa.gob.ar/site2021/institucional.php> [consulta: 01 de julio de 2024]
Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación [en línea] El rodeo bovino se incrementó 1,6% y alcanzó 54.242.595 cabezas en 2022. Dirección URL: < https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-rodeo-bovino-se-incremento-16-y-alcanzo-54242595-cabezas-en-2022#:~:text=La%20Secretar%C3%ADa%20de%20Agricultura%2C%20Ganader%C3%ADa,Animal%20(SIGSA)%20del%20Senasa> [consulta: 10 de julio de 2024]
Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.
Secretaría de Asuntos Estratégicos de la Nación (2023). Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno.
SENASA (2021). Caracterización de establecimientos de engorde a corral septiembre 2021.
UNFCCC (2021) [en línea] Actualización de la meta de emisiones netas de Argentina al 2030. Dirección URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-05/Actualizacio%CC%81n%20meta%20de%20emisiones%202030.pdf> [consulta: 01de agosto de 2024]

POTENTIAL OF HYDROGEN PRODUCTION FROM BIOGAS: ENHANCING WASTE MANAGEMENT AND CARBON FOOTPRINT IN ARGENTINA'S LIVESTOCK INDUSTRY

ABSTRACT This article explores the potential for hydrogen production from biogas generated by livestock waste in Argentina, with a particular focus on the provinces of Buenos Aires, Córdoba, and Santa Fe, where livestock activity is the most intense. The study examines how feedlot systems, by concentrating large numbers of animals in confined spaces, produce a significant volume of organic waste that can be transformed into biogas through biodigesters. Biogas, primarily composed of methane and carbon dioxide, can be converted into hydrogen using reforming technologies such as Dry Reforming, which not only improves the energy efficiency of the process but also reduces greenhouse gas emissions. This approach offers a dual benefit: sustainably managing livestock waste while contributing to the decarbonization of the energy sector. The results of this study suggest that hydrogen production from biogas is not only technically feasible but also holds significant potential to support Argentina's energy transition, particularly in regions with a strong livestock industry presence.

Keywords: Biogas, Green Hydrogen, Cattle waste management, Carbon footprint

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 267-278, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

LADRILLOS REUTILIZANDO RESIDUO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) EN BAJAS PROPORCIONES. ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Lucía A. Villalba[1], Herminia M. Alías[2], Pablo E. Martina[3]
[1] Becaria de investigación. Secretaría General de Ciencia y Técnica (SGCyT). Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). e-mail: lua.arqestudio@gmail.com
[2] Directora de beca de investigación. Docente e Investigadora. Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU). UNNE. Instituto para el Desarrollo de la Eficiencia Energética en Arquitectura (IDEEA). heralias@arq.unne.edu.ar
[3] Codirector de beca de investigación. Docente e Investigador. Facultad de Ingeniería (FI). UNNE. Grupo de Investigación de Energías Renovables (GIDER). pablo@ing.unne.edu.ar

RESUMEN: Se exponen avances de un trabajo que tiene el objetivo de desarrollar prototipos de ladrillos para viviendas reutilizando el residuo de PET post consumo en el Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR). Tras una sistematización de propiedades y beneficios asociados al uso del residuo de PET en la construcción, se realizaron: análisis de antecedentes, estudio de casos de reutilización del PET en la arquitectura, visitas a puntos de recolección de PET en la ciudad. Se definió un panorama de la situación local en cuanto al volumen del residuo y a sus posibilidades de reutilización. Luego se decidió realizar el estudio y primeros ensayos (de resistencia a compresión, según norma IRAM 11561-4, y de conductividad térmica mediante el aparato de placa caliente, según norma IRAM 11559:1995) de tres prototipos de ladrillos. Al tener los prototipos construidos un menor porcentaje de PET, según los primeros resultados obtenidos, no representan ventajas desde el punto de vista térmico ni mecánico, respecto a otros materiales que utilizan PET en su constitución, ni tampoco respecto a los ladrillos cerámicos comunes de uso habitual en muros de edificios en la región. Las ventajas detectadas residen en la reutilización de un residuo muy abundante regionalmente.

Palabras clave: AMGR, reutilización, residuos plásticos, bloques modulares.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se inserta en una investigación en curso que tiene el objetivo de proponer alternativas y lineamientos para la reutilización de residuos de Tereftalato de Polietileno (PET) para elementos constructivos modulares en el Área Metropolitana del Gran Resistencia. En ella se proponen materiales alternativos para la construcción a partir de la reutilización del PET, en la búsqueda de soluciones frente al impacto ambiental que este provoca como residuo vertido al ambiente, considerando que el consumo del PET aumenta año a año. El tiempo de descomposición del mismo es de 100 años en adelante, según en qué condiciones se encuentre. Su principal destino son vertederos de basura (Paz, 2016).

En la actualidad la tasa de reciclado es de 30%. Es decir que el 70% restante, enterrado o no, contamina el ambiente (Paz, 2016). En Argentina, cada habitante produce 1,15 kilogramos de residuos sólidos urbanos por día. Cada dos segundos, Argentina produce una tonelada de basura (MAyDS, 2020).

A partir de la situación planteada surge la propuesta de esta investigación, basada en la intención de reusar un residuo sólido de origen doméstico-industrial como las botellas de PET, que son 100% reciclables y no usan el Bisfenol A (compuesto tóxico) como aditivo. La propuesta consiste inicialmente en el desarrollo de lineamientos de alternativas tecnológicas para la reutilización de residuos de PET (botellas), para la conformación de elementos constructivos modulares para viviendas en la región

nordeste de Argentina (NEA), considerando que el PET puede aportar beneficios no solo ambientales (si se parte de la recuperación de las botellas desechadas como residuos) sino también en cuanto a desempeño térmico, mecánico y acústico, si se lo usa bajo determinadas alternativas tecnológicas.

Como características principales, el PET es una resina sintética termoplástica, y como tal, es reciclable. El primer paso para el reciclado es la separación por tipo de resina. Una fracción clasificada con mayor pureza significa mayor rendimiento y precio por tonelada. Para ello, la Sociedad de la Industria de Plásticos desarrolló en 1988 el Código de Identificación de Resinas. Se convino que los productos elaborados tengan un símbolo de aceptación universal que indique de qué tipo de material se trata (Figura 1). Las flechas que forman el triángulo son señal de que el producto plástico puede ser reciclado. Los números y letras identifican a cada tipo de plástico. Si el acrónimo lleva una "R" delante, significa que el producto lleva materiales plásticos reciclados (Paz, 2016).



Figura 1: Código de identificación universal de resinas plásticas. Fuente: Paz, (2016).

Sistematización de propiedades:
El PET tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino. En general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado y, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos (Biéc et al, 2020). Sus características principales, son (Paz, 2016): Alta resistencia. No se estira. Puede formar fibras y películas fuertes y flexibles; Transparencia. Admisión de colorantes. Brillo; Resistencia química. No es afectado por ácidos ni gases atmosféricos; Resistencia térmica al calor (80 – 120°C) debido al alto punto de fusión (244 – 254°C); Baja absorción de agua; Procesable para soplado, inyección y extrusión; Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas; Aprobado para el uso con contacto alimenticio; Reciclable; Liviano (densidad: 1,34 – 1,39 g/cm^3).

Tras considerar las propiedades y potencialidades asociadas al uso del residuo de PET en la construcción, se realizaron visitas a puntos de recolección de PET en el Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), provincia del Chaco, para delinear una situación local en el marco de la economía circular. Luego se elaboraron, artesanalmente, los primeros prototipos y se realizaron sus primeros respetivos ensayos.

Análisis de antecedentes
1. Antecedente internacional: Se destaca el *¨Estudio de las características físico - mecánicas de ladrillos elaborados con plástico reciclado en el municipio de Acacías*¨ (Restrepo, Cagüeño y Santamaría, 2007), en Colombia, en el que se describe el ladrillo con una composición: 70% de polietileno tereftalato PET y 30% de polietileno de alta densidad PEAD, presentándose las siguientes características y resultados (Tabla 1 y 2):

Tabla 1: Pesos y densidades de los Ladrillos 70% PET y 30% PEAD.

LADRILLOS	ANCHO	LONG.	ALTO	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD
	(cm)	*(cm)*	*(cm)*	*(cm^3)*	*(gr)*	*(gr/cm^3)*

PROMEDIO	11,05	22,10	5,10	1245,45	1081,2	0,87

Tabla 2: Resultados de los ensayos de los Ladrillos 70% PET y 30% PEAD.

LADRILLOS	CARGA MAX.DE ROTURA	TENSION DE ROTURA	ABSORCION DE AGUA
	(KN)	(MPa)	%
PROMEDIO	132,3	23,4	0,29

- Conductividad térmica: Los elementos constructivos obtenidos proveen muy buen aislamiento térmico, superior al de otros ladrillos tradicionales.
- Resistencia al fuego: Por su alta composición de PET tienen buena resistencia al fuego, por ser un material combustible de muy baja propagación de llama.
- Módulo de rotura: Soportan una presión promedio de 831.312,88 Pa, lo que lo hace un ladrillo altamente resistente a la rotura.
- El ladrillo de plástico reciclado estándar tiene alto grado de resistencia a la compresión: de 239 Kg/cm^2 = 23,4 Mpa

2. Antecedente nacional: Proyecto en la provincia de Córdoba junto del Centro Experimental de la Vivienda Económica y la Asociación del a Vivienda Económica (CEVE-AVE) y CONICET, referido al *"Emprendimiento de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados"* (Gaggino, Kreiker, Mattioli y Argüello, 2015). El proceso de fabricación de este ladrillo se realiza teniendo como materia principal al plástico PET, empleando 1 kg del mismo en cada ladrillo, con lo que se estima un 50% de PET, utilizando como ligante al cemento portland común (cuantía de 224,5 kg/m^3), al que se le agrega un aditivo químico en el agua de mezclado (consistente en polímeros acrílicos en suspensión), que mejora la adhesividad de las partículas plásticas con el cemento. Se realiza una síntesis de los resultados (Tabla 3).

Tabla 3: Síntesis de resultados de los ensayos de los Ladrillos 50% PET y cemento.

LADRILLOS	DENSIDAD	CONDUCTIVIDAD TERMICA	RCIA. A LA COMPRESION	ABSORCION DE AGUA
	(gr/cm^3)	(W/mK)	(MPa)	%
PROMEDIO	1,15	0,15	2	19,1

Propiedades técnicas de los ladrillos

- Resistencia acústica: 41 db, en un muro de 0,15 m. de espesor revocado de ambos lados.
- Resistencia al envejecimiento: Son resistentes a la acción de rayos ultravioleta y humedad.
- Resistencia al fuego: Material combustible de muy baja propagación de llama.
- Adherencia de revoques: 0,25 Mpa.
- Resistencia al corte y aserramiento: Son fáciles de cortar y aserrar.

3. Antecedente en el NEA**:** Se consideró el trabajo realizado en la Facultad de Ingeniería de la UNNE sobre *"Módulo de Fabricación automática de ladrillos PET" (*Castro, Palacios y Conci, 2021), en el que se realizó el diseño y el cálculo de una trituradora con cuchillas para plásticos, acompañado de un informe comparativo de distintos productos a fin de darle al PET una finalidad óptima. Las dimensiones propuestas del ladrillo a producir serían las convencionales (5,5 cm x 12,5 cm x 26,2 cm), con forma de paralelepípedo de base rectangular. Para mejorar

la adherencia, los mismos poseen en las superficies de los lados mayores dos posibles tipos de rugosidades: estrías longitudinales o círculos rehundidos. El peso promedio por unidad es del orden de 1,4 Kg. Los ladrillos elaborados con plásticos reciclados son livianos por el bajo peso específico de la materia prima (dependiendo, por supuesto, del porcentaje de uso del plástico).

METODOLOGIA

Se realizaron las siguientes actividades:

Análisis de la cantidad de residuo PET en el AMGR

El conjunto de municipios que comprende el AMGR actualmente concentra poco más de un tercio del total de la población de la provincia del Chaco: 385.726 habitantes según el Censo Nacional de 2010 (Alberto et al, 2018). Si se considera que la generación de residuo sólido urbano (RSU) per cápita es igual a 0,777 kg/hab/día (INDEC, 2010), multiplicado por la cantidad de personas da un total de 300 tn por día aproximadamente, lo que por mes daría 9000 tn de RSU en el AMGR. Para ampliar la información respecto a la situación y características del residuo de PET en el AMGR (tipo, volumen, etc.), se trabajó en la identificación de puntos de recolección, de tratamiento de residuos locales y de sectores que pudieran dedicarse específicamente al reciclaje y reutilización de PET. En ese sentido, se realizaron visitas y entrevistas a:

- "Inplastico" (2022) de la ciudad de Resistencia (Chaco): se estima que recolecta un aproximado de 100 toneladas de plástico por mes de HDPE, LDPE, entre otros.
- "Sembrando conciencia" (2022) también de la ciudad de Resistencia, recauda 1 tonelada de PET por mes aproximadamente, de la cual el 30% se vende, el 50% se dona a "madera plástica Ecoqiru" y el resto se dona a la municipalidad.
- "Ecoqiru" (2022) es una empresa chaqueña localizada en la ciudad de Margarita Belén (Chaco) que se dedica a la fabricación de lo que denominan "maderas plásticas". Actualmente cuentan con más de 2 toneladas de PET recaudadas mediante donaciones.

Se puede estimar así que el plástico reciclado en el AMGR (102 Tn mensuales aprox.) sólo representa el 1,13% del total de RSU existente en el área. A su vez, considerando un informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2021), según el cual el plástico representa el 85% aproximadamente de los residuos que llegan al mar, se puede inferir que en tierra podría ocurrir lo mismo, o incluso en mayor medida. En la figura 2 se expone una comparación de la cantidad de RSU en el AMGR, su porcentaje de plástico y la cantidad que es reciclada.

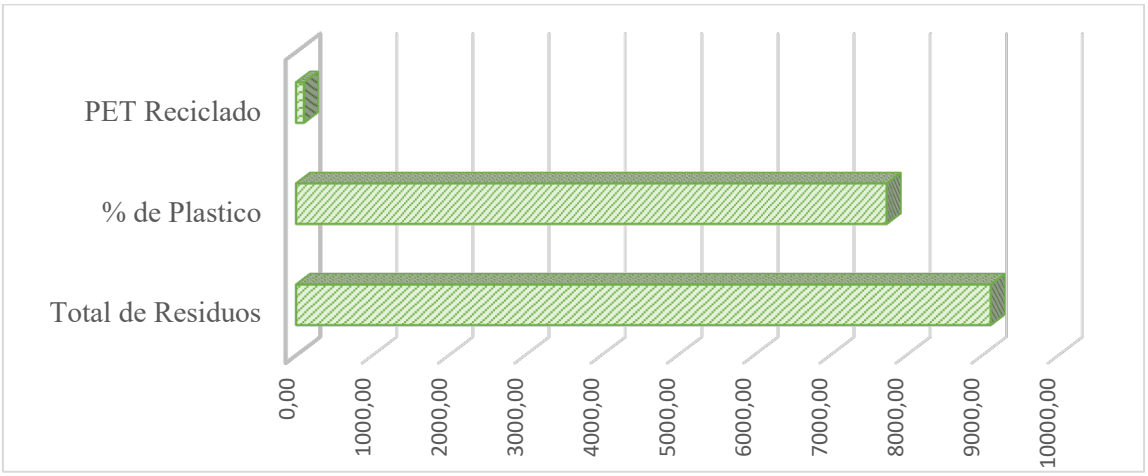


Figura 2. Residuos sólidos mensuales en el AMGR. Fuente: elaboración propia.

Elaboración de los primeros prototipos artesanales

En vista de las indagaciones y consideraciones expuestas, se decide encarar el estudio del primer prototipo en el Departamento de Mecánica, Electricidad y Electrónica y Termodinámica de la FI-UNNE,

utilizando para construirlo un molde de 13,5cm por 15cm, por 6cm de espesor (Figura 3), siendo este el equivalente a medio ladrillo, para realizar a posteriori los ensayos necesarios.

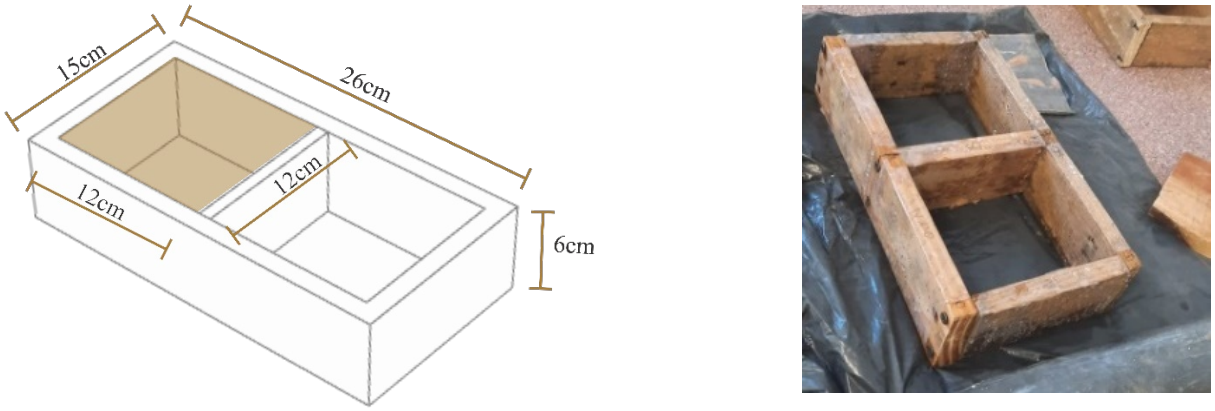


Figura 3. Molde para realizar los ensayos. Fuente: elaboración propia.

Para realizar la mezcla, se realizó el triturado manual de botellas PET cortando estas en tiras y luego en secciones más pequeñas, cuadradas, de aproximadamente 5 mm. de lado, por el espesor del plástico (0,1 a 0,2 mm.). A continuación, se procedió a tamizar y pesar el cemento, la arena y la tierra. Una vez obtenidos los componentes se realizó la mezcla con diferentes dosajes para cada prototipo (Figura 4 a).



Figura 4. Mezcla y prototipos realizados. Fuente: fotografías propias.

Para el dosaje del primer prototipo (P1), que se muestra en la Figura 4 b, se consideraron los siguientes materiales por peso: 350gr. de Cemento, 700gr. de Arena y 30gr de PET (equivalente al 3% del mortero), más 350ml de Agua. El bloque finalizado, una vez dejado reposar una semana, pesó 1106,17gr.

Para el segundo dosaje (P2), se agregó mayor porcentaje de PET, quedando la mezcla con una proporción en peso de: 400gr. de Cemento, 800gr. de Arena y 120gr de PET (equivalente al 10% de la mezcla), más 350ml de Agua. El bloque finalizado pesó 1252,21gr.

Por último (Figura 4 c), se realizó un tercer prototipo (P3) con la combinación de tierra, arena y PET. En este prototipo los pesos de materiales utilizados fueron: 470gr de tierra, 235gr de Arena, 70gr de PET (equivalente al 10% de la mezcla) y 300ml de Agua, resultando un peso final, luego del secado, de 900gr.

Las mezclas de cemento para los prototipos se prepararon manualmente. El mezclado se inició incorporando el agregado fino (arena) y el PET junto con un tercio del agua de mezclado. Ellos se mezclaron por 45 segundos para saturar los agregados. Luego se añadió el cemento y se continuó el mezclado manual durante 5 a 7 minutos, añadiendo lentamente el agua restante. Con la mezcla preparada se llenaron los moldes, que se movieron reiteradas veces en horizontal sobre su superficie de apoyo, a efectos de lograr el compactado. Posteriormente se cubrieron con plásticos y permanecieron en reposo durante 5 días a una temperatura de 20 °C ± 3°C, después de los cuales los prototipos se desmoldaron y se les realizó un curado seco durante 30 días, que consistió en dejarlos al aire libre a una temperatura

de 20±4 °C y una humedad relativa entre 40-60%. El ensayo de resistencia a la compresión se realizó a los 60 días de haberse realizado los prototipos.

Estos primeros resultados de pesos finales de los prototipos elaborados se exponen en una tabla síntesis (Tabla 4), con sus pesos y densidades correspondientes.

Tabla 4: Pesos y densidades de los prototipos realizados.

PROTOTIPO	ANCHO	LONGITUD	ALTURA	VOLUMEN	PESO	DENSIDAD
N°	*(cm)*	*(cm)*	*(cm)*	*(cm^3)*	*(gr)*	*(gr/cm^3)*
P1	11,3	12,0	5,40	732,24	1106,17	1,51
P2	11,4	12,0	4,70	642,96	1252,17	1,95
P3	10,6	11,6	4,00	491,84	900	1,83

Realización de los primeros ensayos

1. Ensayos de resistencia mecánica y absorción de agua

Una vez realizados los tres prototipos, equivalentes a medio ladrillo común aproximadamente (11,10cm x 11,86cm x 4,70cm), se procedió a realizar con ellos los ensayos de resistencia mecánica y la determinación de absorción de agua, en el Laboratorio de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNNE, en abril de 2023.

La maquinaria utilizada para los ensayos de compresión fue la prensa hidráulica (Figura 5), según la Norma IRAM 11561-4 para ensayos de compresión en bloques de hormigón. Esta prensa se compone de dos cilindros que se conectan entre sí. El sistema funciona generando presión sobre la placa, lo que genera presión sobre el líquido hidráulico. Esta presión se distribuye posteriormente dentro del cilindro y empuja el pistón, generando presión, a partir de la cual se obtuvieron los resultados expuestos (Tabla 5).



Figura 5. Prensa hidráulica. Fuente: fotografías propias.

La velocidad de deformación, durante la aplicación de la carga, fue de 0,4 Mpa*seg para bloques de hormigón.

2. Ensayo de conductividad térmica

Se construyeron las probetas para el ensayo de conductividad térmica mediante el aparato de placa caliente, según Norma IRAM 11559:1995, realizando para ello moldes de 30cm x 30cm x 2cm de espesor, en el Depto. de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNNE, en abril de 2023.

La dosificación de estas dos probetas correspondió al equivalente del primer prototipo (Figura 6), por lo que el dosaje de cada probeta fue: cemento = 1200gr, arena = 2400gr, agua = 900gr, PET = 108gr (3% de cemento + arena). Una vez fraguadas ambas probetas se realizó en una de ellas un calado de tres ranuras en cada cara, de aproximadamente 3mm de profundidad y ancho, y 150mm de largo. Ello se realizó para permitir la colocación 6 sensores RTD (Resistance Temperatura Detector) de platino tipo Pt100, 3 en la cara caliente (se toma un promedio) y 3 en la fría (se toma un promedio).

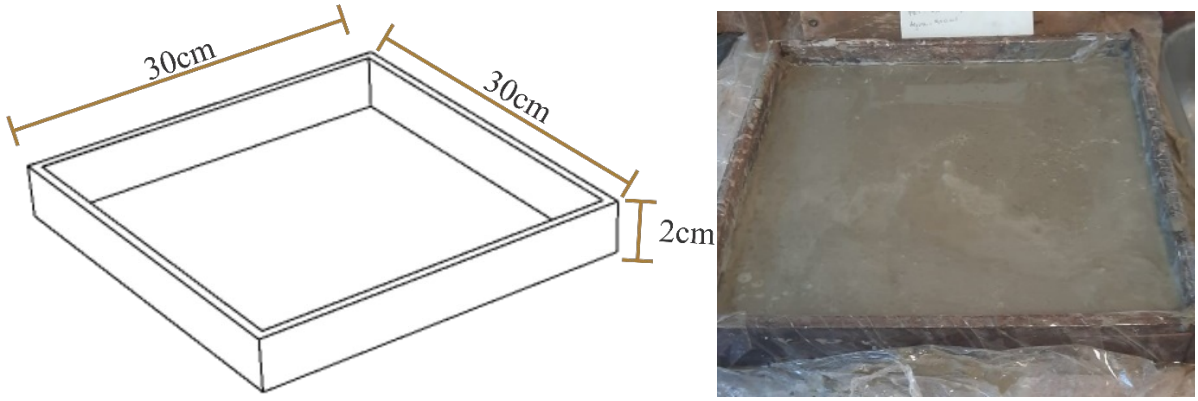


Figura 6. Probetas realizadas. Fuente: elaboración propia.

Finalizadas las dos probetas (agosto de 2023), se inició el procedimiento para la determinación de la resistencia térmica en régimen estacionario. El método utilizado es aquél en el cual, a través del "*equipo de placa caliente"* se entrega calor a la placa caliente mientras se hace circular agua por la placa fría, trasmitiéndose el calor a través de la probeta del material ensayado ubicado entre ambas placas. La figura 7 ilustra estas diferentes partes del dispositivo. Para la conformación de la placa caliente se utilizó una resistencia eléctrica que constituyó una única fuente caliente central y para colaborar a la distribución del calor en toda la cara caliente de la probeta se utilizó una plancha de cobre. Para la conformación de la placa fría se utilizaron dos fuentes frías formadas por serpentines de aluminio de espesor =38mm cada uno con agua en circulación ubicados en los 2 extremos exteriores (2 fuentes frías). Boca de salida y entrada de agua: diámetro = 10mm con agua en circulación, ubicados en los 2 extremos exteriores. El caudal de agua utilizada en la fuente fría fue de 1,65 lt/min en cada serpentín, es decir 3,30 lt/min en total. Para evitar pérdidas o ganancias de calor durante el proceso de ensayo, se conformó una envolvente para la probeta y ambas placas, construida en poliestireno expandido de 2 cm. de espesor (Figura 8).

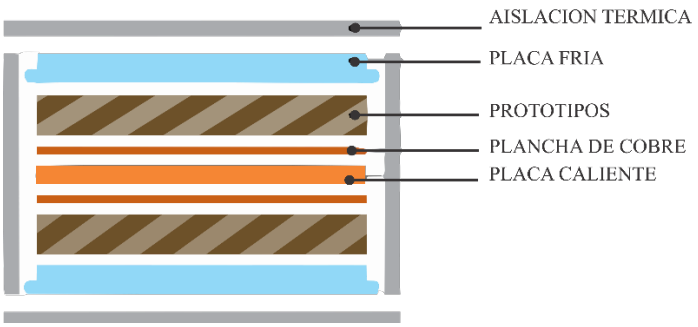


Figura 7: Esquema funcional del equipo de Placa Caliente. Fuente: elaboración propia.

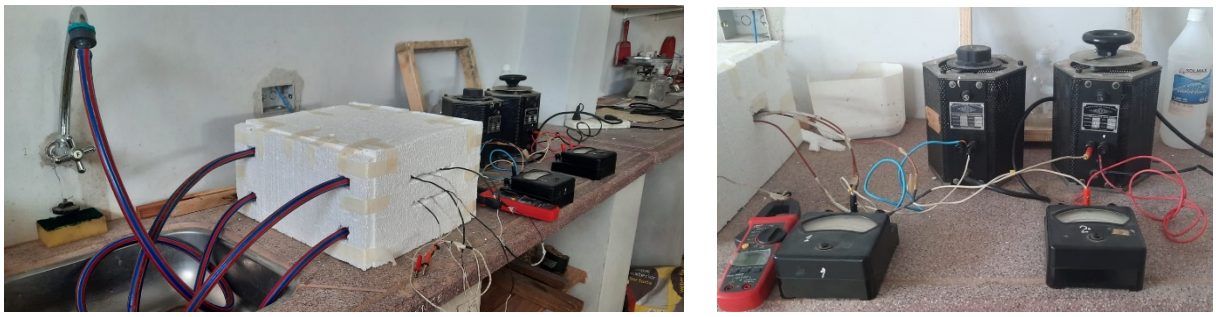


Figura 8: Equipo de Placa Caliente. Fuente: fotografías propias.

RESULTADOS

Resistencia mecánica y absorción de agua

Los resultados obtenidos de los tres prototipos se exponen en las tablas 5 y 6.

Tabla 5: Compresión en Bloques de Hormigón según Normas IRAM 11561-4.

MUESTRA	ANCHO	LONG.	ALTURA	SECCION	CARGA DE ROTURA	TENSION DE ROTURA
N°	(cm)	(cm)	(cm)	(cm^2)	(KN)	(MPa)
P1	11,3	12,0	5,40	135,6	116,62	8,60
P2	11,4	12,0	4,70	136,8	129,36	9,46
P3	10,6	11,6	4,00	123,0	19,60	1,59

Donde:
P1= Primer Prototipo
P2= Segundo Prototipo
P3= Tercer Prototipo

Tabla 6: Determinación de absorción de agua.

MUESTRA	**ABSORCION**
N°	(%)
P1	0,83
P2	0,96
P3	(*)

(*) No se pudo realizar el ensayo de absorción por degradación del material. Se trataba del prototipo realizado con tierra, arena y 10% de PET, que se desgranó al inicio del ensayo a compresión.

Conductividad térmica

A partir de las mediciones realizadas una vez que las placas alcanzaron el régimen estacionario se pudieron obtener datos de temperatura final de equilibrio de placa caliente (*tpc*) igual a 44,38 ºC y temperatura final de equilibrio de la placa fría (*tpf*) igual a 29,11 ºC. Esto determinó una variación de temperatura entre ambas placas (*dt*) equivalente a 15,27ºC. Asimismo, se registró una potencia eléctrica, colocando un amperímetro y un voltímetro en el circuito interno y externo, el producto de ambos resultados (Ampere x Voltios) da la potencia entregada. La cual es en la placa caliente, en su parte externa (*pce*) de 64,486 watt y en su parte interna (*pci*) de 77,336 watt. Con estos valores pudo determinarse la conductividad térmica del ladrillo entero a partir de la siguiente fórmula (1):

$$\lambda = \frac{e * (pce + pci)}{(2 * \Delta t * sup)}$$

$$\lambda = \frac{0{,}02 * (64{,}486 + 77{,}336)}{(2 * 15{,}27 * 0{,}09)} = 1{,}032 \text{ J / s m K} \quad (1)$$

Dónde:
λ = Coeficiente de Conductividad Térmica Total de Probeta obtenida de ensayo, en joule/seg*m*ºC
e = Espesor Total de Probeta de Ensayo, en metros
pce = Potencia eléctrica entregada a la placa caliente en su parte externa, en Watt
pci = Potencia eléctrica entregada a la placa caliente en su parte interna, en Watt
Δt = Diferencia de Temperatura entre Placa Caliente y Fría, en ºC

La conductividad térmica real del material obtenida de manera experimental a partir del método del "*equipo de placa caliente*" es de **1,032 W / m K**, que resulta un valor levemente inferior al del mortero de cemento (1,13 W / m K) y superior al de un ladrillo cerámico macizo común de fabricación artesanal (0,81 W / m K), según norma IRAM 11601 (1996) lo que determina que el prototipo ensayado no aportaría ventajas considerables desde el punto de vista térmico, al menos en la proporción de PET utilizada.

DISCUSIÓN

Una vez obtenidos los resultados de los prototipos se realizó una comparación con las propiedades descriptas de los ladrillos con PET mencionados en los antecedentes (Ver Tablas 1, 2 y 3), realizados en Colombia, que cuentan con 70% PET y 30% PEAD (Restrepo, Cagüeño y Santamaría, 2007) y los realizados en Córdoba con 50% PET y cemento (Gaggino, Kreiker, Mattioli y Argüello, 2015). También se realizó la comparación con los ladrillos comunes cerámicos macizos, usados tradicionalmente.

Para esto, se consideraron las propiedades de los ladrillos cerámicos macizos, que deben cumplir con la Norma IRAM 12566-1 y tener una resistencia característica a la compresión mínima, basada en su área bruta de: *f' u = 5,0 MPa* (CIRSOC 501E, 2023). Dichos ladrillos poseen una conductividad térmica de 0,81 w/m K y un porcentaje de absorción de agua de: 21,6 % (Gaggino, Kreiker, Mattioli y Argüello, 2015).

Los resultados obtenidos se exponen, a modo comparativo, en la Tabla 7, para valorizar los desempeños de los prototipos realizados en este trabajo. Es necesario destacar que las dimensiones promedio de los prototipos ensayados corresponden a medio ladrillo común, aproximadamente (11,10cm x 11,86cm x 4,70cm), mientras que los considerados en los antecedentes tienen las dimensiones de un ladrillo común entero (5,5 cm x 12,5 cm x 26 cm).

A partir de las comparaciones se puede observar que los prototipos cuentan con una densidad similar a los ladrillos cerámicos, mientras que presentan una densidad mayor a los ladrillos con PET realizados en los antecedentes Internacionales, como Nacionales. Como también cuentan en promedio con un peso superior a los antecedentes y menor al ladrillo cerámico.

En cuanto a la conductividad térmica, se verifican altos valores comparando con los antecedentes y los ladrillos cerámicos, debido a la baja proporción de PET en mezcla. Pero se puedo valorar como el ladrillo con PET Nacional, que contiene mayor porcentaje de PET, resulta mucho más aislante por su baja conductividad térmica.

La resistencia a la compresión del primer y segundo prototipo resulta mayor que el ladrillo de PET Nacional y los ladrillos cerámicos. Sin embargo, se destaca el Ladrillo de PET Internacional que es realizado con 100% de plástico, con una resistencia tres veces mayor.

Por último, la absorción de agua de los prototipos es significativamente menor que los ladrillos cerámicos utilizados tradicionalmente.

Tabla 7: Comparación de resultados de los ensayos.

	ENSAYOS	PESO	DENSIDAD	CONDUCTIVIDAD TERMICA	RCIA. A COMPRESION	ABSORCION DE AGUA
U		*(gr)*	*(gr/cm³)*	(w/ m.k)	(MPa)	%
PROTOTIPOS	**P1**	**1106,17**	**1,51**	**1,032**	**8,60**	**0,83**
	P2	**1252,17**	**1,95**	**-**	**9,46**	**0,96**
	P3	**900**	**1,83**	**-**	**1,59**	**-**
ANTECEDENTES	70%PET 30%PEAD	1081,2	0,87	-	23,4	0,29
	50% PET y Cto.	-	1,15	0,15	2	19,1
	LC	3100	1,80	0,81	5,0	21,6

Donde:
P1= Primer Prototipo
P2= Segundo Prototipo
P3= Tercer Prototipo
70% PET y 30% PEAD = Ladrillo con 70% PET y 30% PEAD, Colombia.
50% PET y Cto. = Ladrillo con 50% PET y cemento, Córdoba, Argentina.
LC. = Ladrillo cerámico

CONCLUSIONES

El reúso o reciclado de un residuo sólido muy abundante en el AMGR (y en la región en general), como el PET, para la conformación de elementos constructivos modulares para la construcción de viviendas (como alternativa al uso de otras materias primas de "primera mano" habituales), representaría una opción tecnológica factible y ventajosa desde el punto de vista ambiental, por posibilitar una alternativa de destino final del material de residuo, en lugar de su vertido al ambiente.

Frente a la limitación de no contar con la maquinaria necesaria para el triturado del PET, con la consecuencia de haber tenido que realizar el triturado de forma manual, no fue posible lograr una gran producción de PET triturado, en el tiempo disponible, lo que también incidió en los porcentajes de PET usados en los prototipos (del 10% máximo).

De cualquier modo, existen amplios antecedentes nacionales e internacionales de ladrillos ejecutados con porcentajes de PET superiores al 30%, por lo que las indagaciones realizadas en este trabajo, al exponer los desempeños frente a porcentajes menores de uso del PET, al no contar con tantos antecedentes, introducen un aporte a partir de los resultados obtenidos. Ellos evidentemente no representan ventajas comparativas desde el punto de vista térmico y mecánico, en comparación a otros materiales de uso habitual en la ejecución de muros y cerramientos de edificios en la región.

El ensayo de conductividad térmica obtenido (1,032 W/ mK) arrojó un valor que no resulta ventajoso comparando con los ladrillos cerámicos comunes macizos (0,81 W/ mK). No obstante, se advierte que el ladrillo con 50% PET y cemento (Gaggino, Kreiker, Mattioli y Argüello, 2015), resulta mucho más aislante por su baja conductividad térmica (0,15 W/ mK).

Desde el punto de vista de la resistencia a la compresión del primer y segundo prototipo, que están realizados con cemento (8,60 Mpa y 9,46 Mpa), logran una resistencia mayor que los ladrillos cerámicos macizos (5 Mpa), por lo que podrían ser utilizados con total confiabilidad en cerramientos, con estructura independiente antisísmica (si el caso lo requiere). El tercer prototipo, que utilizó tierra en lugar de cemento, registró una carga de rotura a compresión muy baja (1,59 Mpa), no siendo apto para cerramientos.

Eventualmente, la conformación de un prototipo que utilice mayores proporciones de PET en su dosaje podría derivar en un menor valor de conductividad térmica, aunque correspondería en ese caso correlacionar y valorar el resultado con el valor que se obtenga de resistencia mecánica.

Como desarrollo futuro de la investigación se prevé considerar la reutilización de otros plásticos de descarte, así como de otros dosajes de los mismos (superiores a los ya ensayados). En estos casos, se considerarán especialmente las posibilidades de adherencia de los plásticos a los otros materiales ligantes de la mezcla. También se considera la posibilidad de analizar otros formatos de elementos constructivos modulares (diferentes al bloque mampuesto habitual), de factible aplicación en otros componentes constructivos (diferentes de las paredes o cerramientos verticales).

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Federico Solari, Jefe del Laboratorio del Departamento de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (FI – UNNE), por la disponibilidad y amplia colaboración prestada para la realización de los ensayos a compresión de los prototipos.

Al Ing. Franco Milich y a la Lic. Raquel Aeberhard, del Departamento de Termodinámica de la FI – UNNE, por el asesoramiento y la amplia colaboración brindada para la realización de los ensayos de conductividad térmica.

REFERENCIAS

Alberto, J.; Mignone, A.; Arce, G.; López, S. (2018). *Dinámica y Desarrollo Urbano del Área Metropolitana del Gran Resistencia: Organización espacial en las primeras décadas del s. XXI. UNNE*. Resistencia. Chaco. Disponible en: https://gaea.org.ar/contribuciones/CONTRIBUCIONES_2018/CC2018ALBERTOMIGNONEARCELOPEZ.pdf

Biéc, M.; Curzel, H.; Martorelli L.; López E.; Piedrafita G.; Fioretti C. (2020). *Aprovechamiento Del PET Como Estrategia De Mejor amiento Socio Ambiental*. Equipo de Extensión e Investigación Energía Desarrollo Sustentable y Alimentación (EDESA) Villa Regina -Río Negro. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/138508/Aprovechamiento_del_PET_como_estrategia_de_mejoramiento_socio_ambiental.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castro, D., Palacios, S. y Conci, P. (2021). *Módulo de Fabricación automática de ladrillos PET.* Facultad de Ingeniería de la UNNE. Chaco, Argentina.

Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles [CIRSOC] 501 E (2023). *Reglamento Empírico para Construcciones de Mampostería de Bajo Compromiso Estructural.* Buenos Aires: autor. Disponible en: https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/04-Reglamentos-en-discusion-publica-nacional/CIRSOC501E-Reglamento.pdf

Gaggino, R., Kreiker, J., Mattioli, D. y Argüello, R. (2015) Emprendimiento de fabricación de ladrillos con plástico reciclado involucrando actores públicos y privados. CONICET y CEVE-AVE. Córdoba. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/56370

Instituto Argentino de Normalización y Certificación [IRAM] (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.* (Nº de publicación IRAM 11601). Argentina: autor.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INDEC] (2010). *Provincia de Chaco – Argentina*. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/provincia_de_chaco_0.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable [MAyDS] (2020). *Un Aconcagua de basura*. Agencia de noticias centro de comunicación – UBA. Disponible en: http://anccom.sociales.uba.ar/2020/10/09/un-aconcagua-de-basura/

Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2021). *Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente*. ONU. Programa para el medio ambiente. Disponible en: https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por plasticos#:~:text=El%20informe%20destaca%20que%20el,y%2037%20millones%20de%20toneladas .

Paz, M. (2016) *Reciclado de PET a partir de botellas post consumo*. Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5567/PAZ%2C%20MARIA%20 %20PI%20Reciclado%20de%20PET%20a%20partir%20de%20botellas%20post%20consumo. p f?sequence=1&isAllowed=y

Restrepo, S., Cagüeño, A., y Santamaría, F. (2007). Estudio de las características físico - mecánicas de ladrillos elaborados con plástico reciclado en el municipio de Acacías. Universidad de la Salle facultad de ingeniería civil, Bogotá. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1283&context=ing_civil

Reyes Palapa, C. (2013). *El PET como sistema alternativo para la construcción de muros en la vivienda.* Universidad Autónoma Metropolitana, México. Disponible en: https://core.ac.uk/download/pdf/128738089.pdf

BRICK PROTOTYPES REUSING POLYETHYLENE TEREPHTHALATE RESIDUE (PET) IN LOW PROPORTIONS. FIRST ESSAYS AND RESULTS

ABSTRACT: The progress of a project aimed at developing prototypes of bricks for housing by reusing post-consumer PET waste in the Greater Resistencia Metropolitan Area (AMGR) is presented. After a systematization of the properties and benefits associated with the use of PET waste in construction, the following were carried out: background analysis, case studies of PET reuse in architecture, visits to PET collection points in the city. An overview of the local situation was defined in terms of the volume of waste and its possibilities for reuse. Then it was decided to carry out the study and first tests (of compressive strength, according to IRAM standard 11561-4, and of thermal conductivity using the hot plate apparatus, according to IRAM standard 11559:1995) of three brick prototypes. Since the prototypes are made from a lower percentage of PET, according to the first results obtained, they do not represent thermal or mechanical advantages compared to other materials that use PET in their composition, nor compared to common ceramic bricks commonly used in building walls in the region. The advantages detected reside in the reuse of a waste material that is very abundant in the region.

Keywords: AMGR, reuse, plastic waste, modular blocks.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 279-287, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVOS MAESTRO/ESCLAVOS MODBUS RTU PARA EL MONITOREO DE REDES DE SENSORES MEDIANTE LORAWAN

Roberto F. Farfán[1], Carlos A. Cadena[2], Cesar Prieb[3], Héctor Rizo[1]
[1]Universidad Nacional de Salta, Facultas de Ingeniería
[2]Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, INENCO (CONICET)
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LABSOL
e-mail: farfan.roberto.f@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se presenta el desarrollo de dispositivos electrónicos que se diseñan para monitorear una red de sensores, utilizando el protocolo de comunicación Modbus RTU y una red inalámbrica LoRaWAN. Los dispositivos desarrollados se denominan, medidor de magnitudes meteorológicas y medidor de energía, ambos desarrollados para que respondan a una comunicación Modbus RTU. El maestro de la red se encarga de pedir información a los esclavos y subir la información de los sensores a los servidores LoRaWAN de The Things Network. Para visualizar la información del servidor se utiliza el software Node-RED, el que se encarga de bajar los datos y almacenar los mismos en una base de datos. El sistema desarrollado se concibe con la finalidad de proporcionar información en una Smart Grid. Los ensayos realizados muestran la flexibilidad y calidad de los equipos que se emplearon.

Palabras clave: Modbus RTU, LoRaWAN,IoT y Smart Grid.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las redes eléctricas están evolucionando a un sistema que involucramás tecnología, generación descentralizada y un uso más eficiente de la energía. Las Smart Grids (SG) o redes eléctricas inteligentes, se definen como una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de los usuarios conectados en ella, ya sea que estén generando electricidad, consumiendo o realizando ambas acciones. Este enfoque tiene como objetivo proporcionar un suministro de electricidad seguro, económico y sostenible. Las SG incorporan sistemas que generan energía a través de fuentes renovables, conocidos como recursos energéticos distribuidos (DER), que inyectan energía en la red de distribución. La implementación de estos DER puede complicar el control de la red eléctrica, especialmente si su influencia es significativa, ya que puede dar lugar a inestabilidades (Dimitriou et al., 2012). Por tal motivo es relevante el uso de tecnología para el monitoreo de la red eléctrica.

A nivel mundial existen numerosos proyectos que se están desarrollando en referencias a la implementación de las Smart Grids (SG). Un estudio publicado por el Banco Mundial (Gaba, 2017) menciona que las redes inteligentes tienen una estructura compleja con relación a su infraestructura y funcionamiento, dado que el sistema se compone de un gran número de elementos interconectados. Una forma simplificada de visualizar una SG es dividir la misma en cuatro capas: infraestructura, telecomunicación, datos y aplicaciones (Gaba, 2017) .En Argentina se observan diferentes iniciativas relacionadas con las capas mencionadas, como la incorporación de las energías renovables (Energía Estratégica, 2016; Energía Estratégica, 2017; Energía Estratégica, 2023; Energía Estratégica, 2024), incorporación de tecnología para modernizarla red eléctrica (Energía Estratégica, 2017; Energía Estratégica, 2024) e implementación de SG concretas (Energía Estratégica, 2015; Infobae, 2018).

Si bien se observan importantes avances en algunos proyectos, en este trabajo serealiza un desarrollo que pone el foco en las tecnologías de comunicación que podrían incorporarse a una SG. A nivel mundial existen diferentes proyectos que incorporan tecnología a la red eléctrica, con importantes inversiones y con el objetivo de descarbonizar la economía, por medio de la innovación digital como herramienta para una exitosa transición energética. Entre los proyectos que se están implementando se encuentran: Proyecto Star (Iberdrola, 2023), Proyecto Price (Redeia, 2015), Proyecto Bidelek (ClusterEnergia, 2016), Proyecto Monica (e distribución, 2024), entre otros.

Para este trabajo, se desarrolló e implementaron dispositivos que responden a una comunicación Modbus RTU para el monitoreo de redes de sensores mediante LoRaWAN, para utilizarse en SG.

METODOLOGÍA

El sistema implementado

En la Figura 1 se observa un esquema del sistema implementado para los ensayos de los esclavos Modbus RTU.

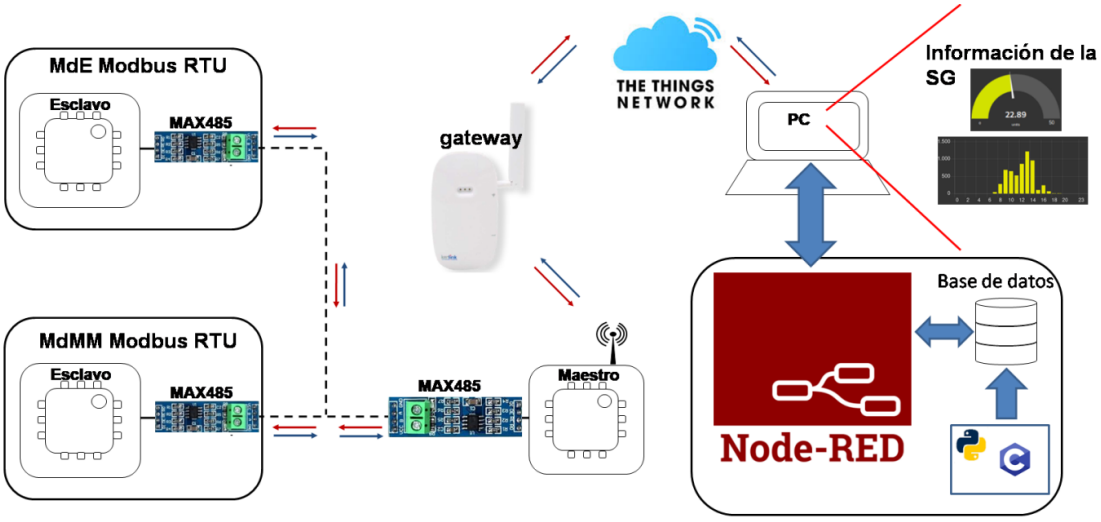


Figura 1: Esquema general del sistema desarrollado.

En el trabajo se desarrollaron dos dispositivos electrónicos: un medidor de magnitudes meteorológicas (MdMM) y un medidor de energía (MdE), diseñados para que respondan a una comunicación Modbus RTU. Los dispositivos esclavos se conectan a un maestro que trabaja como puente entre la red Modbus y la comunicación inalámbrica LoRa. Los datos por medio del Gateway se suben a la plataforma de internet de las cosas (IoT) TheThings Network (TTN), diseñada para implementar redes inalámbricas con tecnología LoRa. Para bajar la información de TTN, se empleó una aplicación diseñada por medio de Node-RED.

Microcontroladores utilizados en el desarrollo del sistema

En este trabajo se utilizaron diferentes microcontroladores; una placa de desarrollo denominada LOPY utilizada como maestro de la red Modbus RTU y un conjunto de microchips PIC1F877A utilizados como esclavos.

La placa de desarrollo denominada LOPY está formada por un microcontrolador ESP32 de la empresa Espressif e incorpora el hardware necesario para conectarse y hacer uso de la tecnología LoRa,Wi-Fi o Bluetooth. Esta placa internamente conecta el ESP32 a un módulo LoRa SX1272 de la empresa Semtech, de esta forma el microcontrolador incorpora comunicación inalámbrica de largo alcance, con alta inmunidad al ruido y mínimo consumo de corriente. En la Figura 3 se observan las características de la placa mencionada.

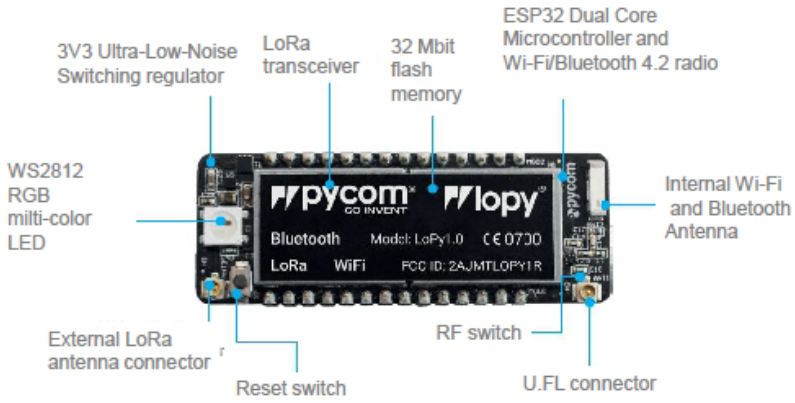


Figura 2: Placa de desarrollo LOPY.

Para el desarrollo de los esclavos se utilizó el PIC16F877A de la empresa Microchip, cuyo diagrama se observa en la Figura 3.

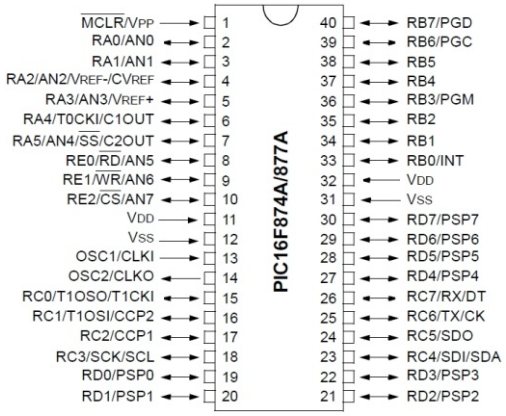


Figura 3: Microcontrolador PIC16F877A.

Este microcontrolador de 8bits cuenta con 256 bytes de memoria EEPROM, un conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits conectado a 8 entradas multiplexadas, dos comparadores/PWM, puerto serie síncrono de 3 hilos SPI, bus de 2 hilos I2C y el bus transmisor receptor asincrónico-síncrono universal (USART). Para el PIC16F877A se desarrollaron placas de circuito impresos (PCB) con el objeto de realizar una conexión eléctrica segura entre el microcontrolador y los sensores implementados.

Tecnología para el transporte de datos, el protocolo de comunicación Modbus

Modbus es un protocolo de comunicación que está formado por una arquitectura maestro/esclavo (RTU) o cliente/servidor (TCP/IP). El estándar se diseñó en 1979 para controladores lógicos programables (PLCs) de la empresa Modicon. Este protocolo de comunicación se consolidó en la industria y actualmente se considera un estándar de facto, que permite que millones de dispositivos diseñados para la automatización se comuniquen (modbus.org, 2017).

En una red Modbus como la que se observa en la Figura 4, el nodo maestro emite comandos explícitos a los nodos esclavos, estos últimos procesan la información y realizan la acción requerida. Los nodos esclavos normalmente no transmiten datos sin una solicitud del nodo maestro, y no se comunican con otros esclavos (modbus.org, 2017). A nivel físico, en una red Modbus RTU se puede utilizar diferentes interfaces; RS485 o RS232. La interfaz de dos cables TIA/EIA-485 (RS485) es la más común. En este trabajo se utiliza una placa de desarrollo LOPY para que opere como maestro de la red Modbus RTU.

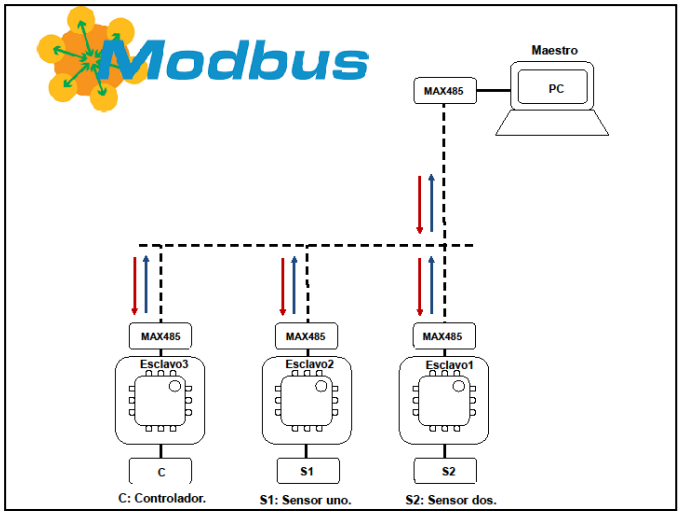


Figura 4: Esquema de una red Modbus RTU.

Características de una red LoRaWAN

Las frecuencias de las señales inalámbricas en una comunicación LoRa se encuentran dentro de la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética para el área industrial, científica y medica. LoRaWAN especifica cómo gestionar el uso de los canales, el ancho de banda y el cifrado de los datos. Respecto a las frecuencias, LoRaWAN las organiza en sub-bandas y canales, las cuales seencuentran definidas según la región. De acuerdo a los parámetros regionales asignados, la banda utilizada en la Argentina es AU915_928. Esto implica que las frecuencias para transmitir información se encuentran dentro de la banda de 915 MHz a 928 MHz.

En una red LoRaWAN, el nodo codifica la información de los sensores y la envían a los gateway, como se observa en la Figura 5. Estos gateway suben la información por medio de internet a los servidores, donde se procesa la información y se decodifica nuevamente. Una vez terminado este proceso, los datos pueden bajarse a las aplicaciones del sistema.

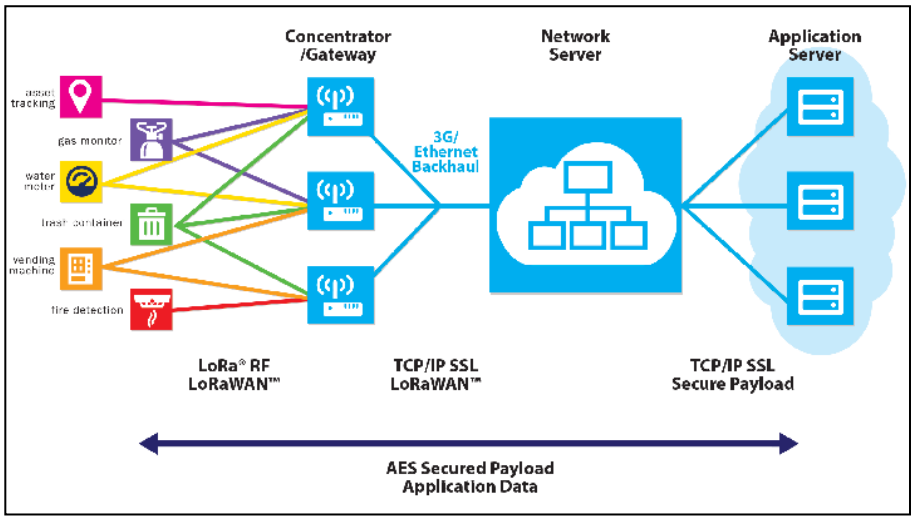


Figura 5: Esquema de una red LoRaWAN.

Node red

Es una herramienta de programación visual que permite comunicar hardware y servicios, de una forma rápida y sencilla. El sistema corre en un navegador web y en él se puede añadir, eliminar y conectar nodos. Los nodos seutilizan para realizar tareas específicas dentro de una aplicación. De acuerdo a las

características mencionadas, Node-RED se utilizó para el desarrollo del software encargado de bajar los datos del servidor TTN, procesar información y realizar gráficos con la información recolectada.

IMPLEMENTACIÓN

Medidor de magnitudes meteorológicas Modbus RTU

En este trabajo se utilizó un PIC16F877A para que registre magnitudes meteorológicas y responda como esclavo a una comunicación Modbus RTU. El dispositivo puede configurarse con las siguientes características: medir temperatura y humedad relativa por medio del sensor SHT10, medir temperatura por medio de una PT100 o medir irradiancia por medio de una celda fotovoltaica. En la Figura 6 se observa un esquema del dispositivo.

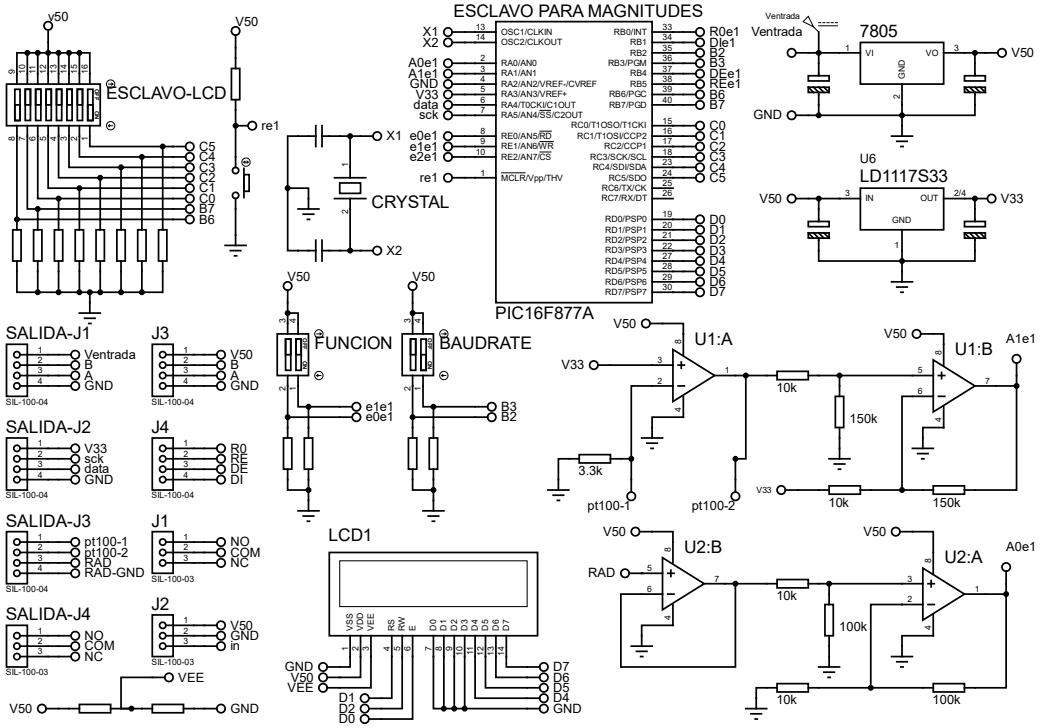


Figura 6: Circuito electrónico del MdMM Modbus RTU.

Los circuitos analógicos de la Figura 6 se utilizan para adaptar las señales de la celda fotovoltaica y la PT100, al ADC del microcontrolador. El firmware del microcontrolador se desarrolló para que el esclavo utilice la función holding “register” del protocolo Modbus, para almacenar la información de los sensores. En el registro 0 se obtiene versión del firmware, en el 1 el baud-rate, en el 2 el número de esclavo, en el 3 el registro de la humedad, en el cuatro el registro de la temperatura, en el cinco el registro de la irradiancia y en el seis el registro de la PT100.

Por otro lado, por medio del dip switch FUNCION se selecciona la tarea que debe realizar el MdMM, si utiliza el sensor SHT10, la celda fotovoltaica o la PT100. Para este diseño también se utilizó un dip switch denominado BADURATE, para seleccionar la velocidad de comunicación. Como se observa en la Figura 6, el circuito cuenta con un dip switch de 8 posicionesdenominado ESCLAVO-LCD. Estas llaves se utilizan para seleccionar la dirección del esclavo dentro de la red Modbus y elegir una función que indica siel dispositivo utilizará o no, un LCD de 2x16. Las primeras 7 posiciones permiten elegir una dirección del esclavo y la última, habilita la lectura de las magnitudes físicas en el LCD. Es importante remarcar que esta última función puede anularse y que los valores que devuelve el esclavo en la comunicación Modbus, son los obtenidosde los diferentes ADC, los que finalmente se manipulan en los servicios de backend.

Medidor de energía Modbus RTU

Para este trabajo se modificó un MdE comercial de bajo costo, para que responda como esclavo en una red Modbus RTU. Los cambios consisten en adaptar unPIC16F877A al MdE MC10, para que tome las señales vinculadas a la potencia, tensión y corriente de una carga, y envíe dichos parámetros cuando un dispositivo maestro lo requiera. A pesar de que el MC10 se diseñó para registrar consumos en un rango acotado, su implementación brinda una idea acabada del funcionamiento de los MdE Modbus RTU. En la Figura 7 se observa un esquema del circuito electrónico que se adaptó al MC10 para convertirlo en un MdE Modbus RTU.

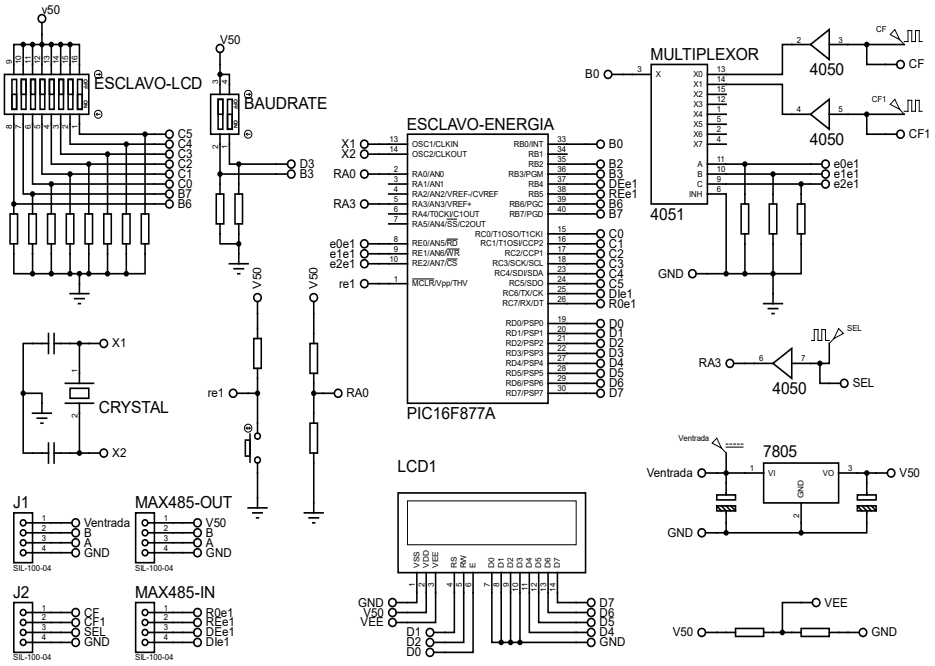


Figura 7: Circuito electrónico para el MdEModbus RTU.

El MdE MC10 contiene un circuito integrado denominado BL0937. Este chip entrega dos señales, cuya frecuencia es proporcional a la tensión eficaz, corriente eficaz y potencia activa de una carga. El microcontrolador 16f877A se acopla al MC10 para que determine las frecuencias de estas señales y determine las magnitudes mencionadas. Las magnitudes se guardanen registros internos del microcontrolador junto a la energía y el factor depotencia, variables que se determinan de manera indirecta. Para la comunicación Modbus RTU se utilizó un modulo Max485 y dos dip switch de 8 y 2 posiciones, como se observa en la Figura 7. El primero utiliza 7 conectores para seleccionar el número de esclavo que se le asigna al MdE dentro de la red Modbus y el último, para indicar siel PIC16F877A utiliza el LCD de 2x16 o no. El dip switch de 2 conectores permiteseleccionar la velocidad de comunicación. El MdE Modbus RTU se diseñó para que utilice la función “holding register” y responda a las consultas realizadas por el maestro de la red. En estos registros seguarda la potencia en vatios (W) multiplicada por diez, la tensión eficaz en volt (V) multiplicada por diez, la corriente en ampere (A) multiplicada por cien y la energía, en los registros desde el 3 al 7 respectivamente, estos dos últimos corresponden a la energía.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el propósito de realizar una prueba final de integración y funcionamiento para los esclavos dentro del sistema propuesto, se realizan los ensayos “endtoend”. En la prueba se utilizan todos los dispositivos descriptos en la Figura 1. El software Node-RED se encarga de recuperar los datos del servidor. Esta configuración permite que la informaciónbaje a una PC donde corre Node-RED y se

almacene en una base de datos, pararealizar gráficos con información proveniente de la red de sensores que podría contener una SG.
La información que proviene de los ensayos end to end se observa en la aplicación diseñada para procesar y mostrar información de la SG. La aplicación posee una pantalla, tal como se observa en la Figura 8.

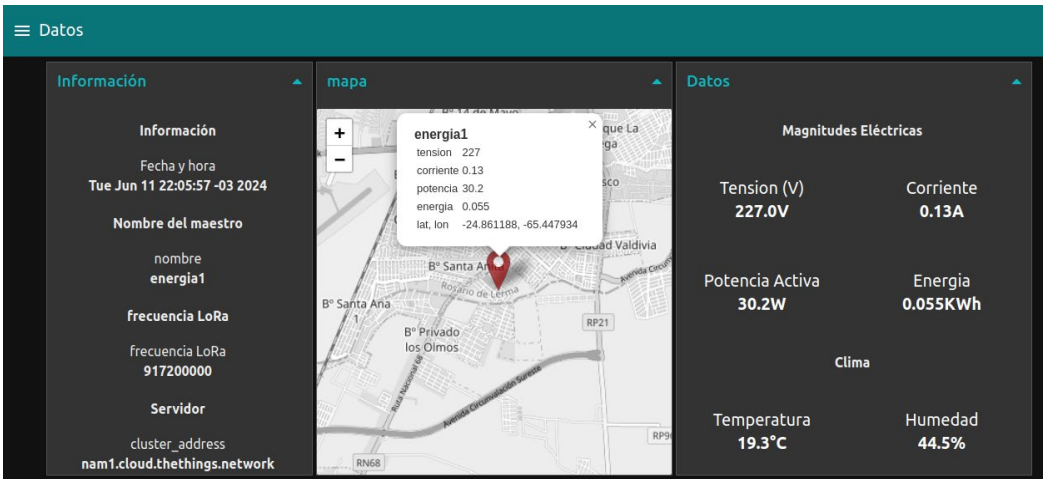


Figura 8: Pantalla principal del sistema de monitoreo y gestión de energía.

La pantalla se divide en tres partes: información, mapa ydatos. En “información” se observan datos relacionados con la red LoRaWAN, como el servidor al que se conecta el maestro, la frecuencia que se utiliza en la comunicación inalámbrica, la fecha y hora. En el mapa se despliega un planisferio donde seencuentra la ubicación de los diferentes maestros distribuidos en la red eléctrica. En datos se imprimen las medidas actuales que el maestro sube a los servidores.

En el trabajo también se desarrollaron PCBs para los esclavos de la red Modbus RTU, comose observa en la Figura 9.

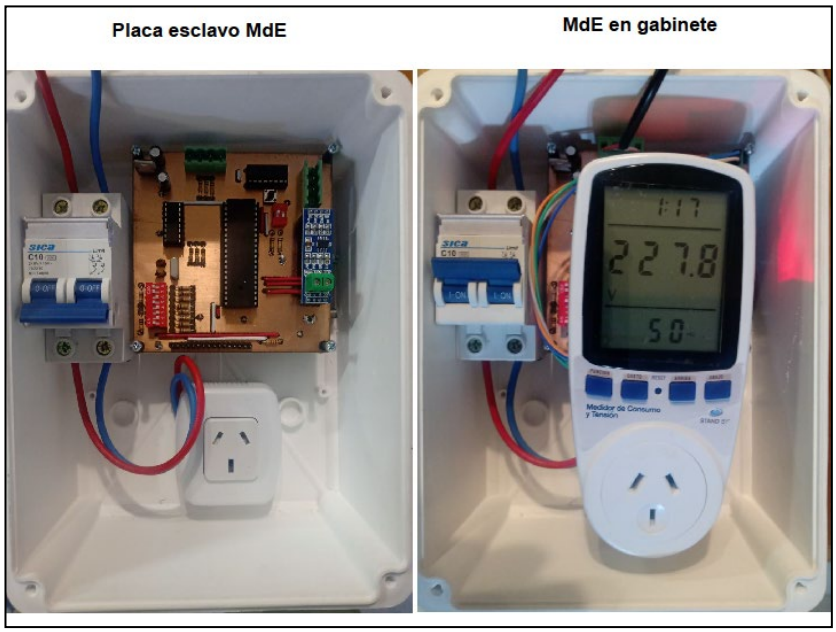


Figura 9: Gabinete con placas desarrolladas para el MdE Modbus RTU.

Para los PCBs se diseñaron pistas, que junto a la implementación de los planos de tierra permiteque los circuitos no sean susceptibles a interferencias o ruido eléctrico. Para su construcción se utilizaron

placas de cobre de 10 cm x 10 cm. Duranteel desarrollo del trabajo, los PCBs se modificaron con el objetivode plantearmejoras.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron e implementaron dispositivos que permiten el monitoreo de energía y magnitudes meteorológicas mediante LoRaWAN. La comunicación entre los dispositivos del sistema responde a una arquitecturamaestro/esclavo. Por tal motivo se desarrollaron circuitos que operan como esclavosen una red Modbus RTU y pueden medir: temperatura y humedad pormedio del sensor SHT10, irradiancia por medio de una celda fotovoltaica y temperaturapor medio de una PT100. También se adaptaron medidores de energía comerciales para que respondan al mismo protocolo de comunicación y registren:tensión eficaz, corriente eficaz, potencia activa, factor de potencia y energía. Si bien los MdE pueden medir en un rango acotado de potencia, su implementación brinda una idea acabada en cuanto al funcionamiento de medidores querespondan a una comunicación Modbus RTU. Para el maestro se utilizó una placa de desarrollo LOPY, que le otorga al microcontroladorconexión a una red LoRaWAN. Este microcontrolador se comunicacon los esclavos por medio del protocolo Modbus RTU y sube la información de la red a los servidores de The Things Network. La arquitectura del sistema permite que la red Modbus pueda ampliarse al incorporar esclavos que respondan a nuevos requerimientos por parte de los usuarios. En el trabajo se utilizaron los recursos del servidor The Things Network, ya que se manipulo con herramientas de la plataforma la información que llega desde los gateways. Para los servicios de backend se implementó Node-RED. Con este software se recuperaron los datos de los servidores de The Things Network y se almacenaron en una base de datos.

REFERENCIAS

Dimitriou P. Faschang M. Mosshammer R. Stifter M. Andren F. Kupzog F. (2012). Co Simulation of Power and Communication Networks for Low VoltageSmart Grid Control. In Proceedings of the 1st D-A-CH Energieinformatik.

Gaba K.M. Madrigal M. Uluski R. (2017). Practical Guidance for Defining a SmartGrid Modernization Strategy The Case of Distribution. Th eWorld Bank Group. ISBN: 978-1-4648-1055-8.

Energia Estrategica [en línea] Generacion distribuida: Neuquén instala más de 5.000medidores inteligentes. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/neuqueninstala-mas-5-000-medidores-inteligentes-la-provincia/> [consulta: 1 junio de 2024]. Nov. de 2017.

Energia Estrategica [en línea] GoodWe y Sistemas Energeticos avanzan en Argentina en una asociación estrategica. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/goodwe-y-sistemas-energeticosavanzan-en-argentina-en-una-asociacion-estrategica/> [consulta: 1 junio de 2024]. Mar. de 2024.

Energia Estrategica [en línea] Secretaria de Energía de Argentina convocara manifestaciones de interes para almacenamiento. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/secretaria-de-energia-de-argentinaconvocara-manifestaciones-de-interes-para-almacenamiento/>[consulta: 1 junio de 2024]. Oct. de2023.

Energia Estrategica [en línea]Schneider Electric y sus proyectos de energia renovable en Argentina. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/schneider-electric-y-susproyectos-de-energia-renovable-en-argentina/> [consulta: 1 junio de 2024]. Jul. de 2016.

Energia Estrategica [en línea]San Juan ensaya experiencias de inyeccion de energía renovable a la red domiciliaria.Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/san-juan-ensaya-experienciasinyeccion-energia-renovable-la-red-electrica-domiciliaria/> [consulta: 1 junio de 2024]. Feb. de 2017.

Energia Estrategica [en línea]Proyecto piloto en Argentina con la primera aplicacion del software Venios.NET. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/proyectopiloto-en-argentina-con-la-primera-aplicacion-del-software-venios-net/>[consulta: 1 junio de 2024]. Abr. de 2024.

Energia Estrategica [en línea]Salta se prepara para comenzar con las licitaciones delproyecto de redes inteligentes.Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/salta-se-prepara-para-comenzarcon-las-licitaciones-del-proyecto-de-redes-inteligentes/>[consulta: 1 junio de 2024]. Mar. de 2015.

Infobae [en línea] Cómo funciona la primera red eléctrica inteligente de Argentina?Dirección URL: <https://www.infobae.com/def/desarrollo/2018/07/14/como-funcionala-primera-red-electrica-inteligente-de-argentina/> [consulta: 1 junio de 2024]. Jul. de 2018.
Iberdrola [en línea]Proyecto Star. Dirección URL: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestraactividad/smart-grids/proyecto-star> [consulta: 1 junio de 2024].
Redeia [en línea]Proyecto Price. Dirección URL: <https://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-price>[consulta: 1 junio de 2024].
Cluster Energia [en línea] Proyecto Bidelek Sareak. Dirección URL: <https://www.clusterenergia.com/proyecto-bidelek-sareak> [consulta: 1 junio de 2024].
e distribución [en línea]Proyecto MONICA.Dirección URL: <https://www.edistribucion.com/es/innovacion-nuevas-tecnologias/proyecto-monica-red-distribucion.html> [consulta: 1 junio de 2024].
modbus.org [enlínea]MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATIONV1.1b3. Dirección URL:<https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf>[consulta: 1 junio de 2024]

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODBUS RTU MASTER/SLAVE DEVICES FOR MONITORING SENSOR NETWORKS USING

ABSTRACT This paper presents the development of electronic devices designed to monitor a sensor network, using the Modbus RTU communication protocol and a LoRaWAN wireless network to collect information. The devices developed are called meteorological magnitude meter and energy meter, both developed to respond to Modbus RTU communication. The network master is responsible for requesting information from the slaves and uploading the information from the sensors to the LoRaWAN servers of The Things Network. To view the information from the server, the Node-RED software is used, which is responsible for downloading the data and storing it in a database. The developed system is conceived with the purpose of providing information in a Smart Grid.

Keywords: Modbus RTU, LoRaWAN, IoT and Smart Grid.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 288-296, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANALISIS COMPARATIVO DE LA IRRADIACION GLOBAL EN PLANO HORIZONTAL A PARTIR DE LAS BASES DE DATOS DE REANÁLISIS EN LA REGIÓN DEL NOA (2000-2023)

Cristóbal I. Silvero[1,2], Franco D. Medina[1,2], Bruno S. Zossi[1,2], Gustavo A. Mansilla[1,2], Ana G. Elias[1,2]

[1]*INFINOA (CONICET-UNT), 4000 Tucumán, Argentina*
[2]*Laboratorio de Ionosfera, Atmosfera Neutra y Magnetosfera - LIANM (FACET, UNT), Av. Independencia 1800, 4000 Tucumán, Argentina*

e-mail: cristobalivansilvero@gmail.com.ar

RESUMEN: El estudio de los parámetros climáticos, como el caso de la irradiación global en plano horizontal en superficie, es de vital importancia en el análisis de la disponibilidad energética para poder dimensionar las tecnologías necesarias para el aprovechamiento de energía. En numerosas regiones, como el caso del Noroeste Argentino, región de estudio de este trabajo, no se dispone de una cobertura adecuada de estaciones meteorológicas para trabajar con valores medidos, por lo tanto, las bases de datos de reanálisis son una alternativa prometedora. En este trabajo se analiza la irradiación global en plano horizontal promedio en superficie en el período 2000-2023 en la región del NOA utilizando los datos de los reanálisis NCEP/NCAR R1, ERA5 y MERRA-V2. Se analizaron las series de promedios mensuales y se compararon las distintas bases de datos para cada mes y el valor medio anual. Para el análisis comparativo se estimaron tres parámetros estadísticos: el coeficiente de correlación de Pearson (r), el error absoluto medio (MAE) y el error relativo medio (MRE). Los tres reanálisis presentan una variabilidad espacial similar, sin embargo, en términos de valores absolutos, ERA5 y MERRA V2 son comparables, mientras que NCEP/NCAR R1 presenta una sobrestimación sistemática que alcanza un 30% respecto de ERA5 tomado como referencia.

Palabras clave: Irradiación global en plano horizontal, NCEP/NCAR R1, MERRA V2, ERA5, NOA.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de manera automatizada y directa de datos experimentales de irradiación global en plano horizontal en superficie es aun escasa para algunas regiones de Argentina, como es el caso de la región del NOA. El estudio de la variabilidad tanto temporal como espacial de la irradiación global en plano horizontal en superficie es de suma importancia en el análisis de la viabilidad del aprovechamiento energético de energía solar como fuente de energía renovable en una dada localidad o región, y en el análisis dimensional de la tecnología necesaria para su uso. Este parámetro es importante además en modelos climáticos (Hollmann et al., 2013; Trenberth et al., 2013).

En este trabajo, se determinan valores promedio del período 2000-2023 de la irradiancia solar en superficie en la región del NOA utilizando tres diferentes bases de datos de reanálisis: NCEP/NCAR R1 (Kalnay et al,1996), MERRA V2 (Tahir et al., 2021), y ERA5. Los datos del reanálisis, en general, se han utilizado en numerosos estudios de caracterización y variabilidad de diversos parámetros, sobre todo en regiones donde las mediciones de superficie, a pesar de ser más precisas, tienen una cobertura espacial y temporal limitada, como es el nuestro (Morales-Moraga et al., 2019, Peng et al., 2019).

Si bien los análisis de comparación debieran hacerse utilizando como referencia datos obtenidos a partir de mediciones experimentales, ante la falta de datos en la región, sumado a la dificultad de disponer de manera libre de los pocos datos que existen, consideramos de interés hacer este análisis tomando como

referencia uno de las bases de datos de reanálisis: ERA5. Esto se basa en una comparación parcial que se realizó con datos de dos años de una estación del NOA, y cuyos resultados preliminares se mencionan más adelante, y también en base a resultados de otros autores que realizaron estudios de precisión y performance de diferentes bases de reanálisis, incluyendo las seleccionadas en este estudio. Mencionamos a continuación algunos de ellos.

Urraca et al. (2018) comparan las reanálisis ERA5 y COSMO-REA6 (reanálisis de alta resolución basado en COSMO-Consortium for Small-scale Modeling) en la estimación de irradiancia superficial, en el período 2010-2014, evaluándolos con datos de 41 estaciones del BSRN (Baseline Surface Radiation Network) y productos satelitales. ERA5 presenta un sesgo positivo moderado a nivel global y en Europa, reduciendo el sesgo en un 50%-75% en comparación con ERA-Interim y MERRA-2, y es comparable con los productos satelitales en estaciones continentales. Concluyen además que, a pesar de sus limitaciones, ERA5 es una alternativa válida en regiones donde no hay datos satelitales disponibles.

Tahir et al. (2020, 2021) evalúan la precisión de la radiación solar estimada por diferentes conjuntos de datos de reanálisis en comparación con mediciones terrestres en Pakistán. Demuestran un mejor rendimiento de ERA5 sobre JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis) NCEP/NCAR R1, NCEP-DOE (Department Of Energy) R2, MERRA, MERRA v2 y ERA-Interim (la versión anterior a ERA5). Encuentran que las versiones más recientes de los reanálisis mejoran notablemente respecto de las versiones anteriores, indicando que los productos de reanálisis actualizados han sido significativamente mejorados, y que en particular ERA5, en el caso de Pakistan, puede usarse para estimaciones del recurso solar.

Wang et al. (2021) evaluaron el desempeño de los datos de radiación provenientes de ERA5, MERRA-V2, JRA-55 y CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System), en la región de Gobi, China. Sus resultados muestran que los datos de ERA5 superan a los a otros reanálisis, demostrando la mayor aplicabilidad para estimar el flujo de radiación en la región analizada.

Doddy Clarke et al. (2021) compararon tres conjuntos de datos de reanálisis: ERA5, MERRA-V2 y MÉRA (un reanálisis de alta resolución regional), con observaciones en siete estaciones meteorológicas en Irlanda, evaluando variables clave para el sector de energía renovable, como el viento y la radiación solar. Encuentran que en general, ERA5 supera a los otros dos reanálisis en precisión.

Jiao et al. (2022) comparan la radiación solar superficial estimada por ERA5 y CMIP6 con observaciones in situ de más de 2000 estaciones provenientes de bases de datos de radiación medida, mostrando que ERA5 es más consistente con las mediciones en las variaciones temporales, la tendencia a largo plazo y la reducción de incertidumbres a escalas globales y continentales.

Desde luego que también hay estudios resaltando la mala performance de los grillados de datos, como Salazar et al. (2020), quienes enfatizan la importancia de la validación con registros de mediciones. Mbasa et al. (2021), como otro ejemplo, encuentran que los datos satelitales tienen mejor performance en la región de Sudáfrica que los reanálisis ERA5 y MERRA-V2.

DATOS

Los datos utilizados corresponden a las variables de cada uno de los tres reanálisis seleccionados: NCEP/NCAR R1, MERRA V2 y ERA5, que corresponden al valor de irradiancia solar medida por en radiómetro en superficie. Se describe a continuación cada una de estas variables. La Tabla 1 resume la información en base a cada reanálisis.

Tabla 1. Reanálisis utilizados, algunas características y variable seleccionada.

Reanálisis	Enlace	Resolución del grillado (lat-lon)	N° puntos	Variable
NCE/NCAR R1	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html.	1.8°×1.8°	30	dswrf
ERA5	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-era5-single-levels-daily-statistics?tab=download.	0.25°×0.25°	1681	ssrd
MERRA-V2	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2.	0.5°× 0.625°	357	SWGNT

Los datos de flujo de radiación solar directa en superficie, dwsrf (downward solar radiation flux) del reanálisis NCEP/NCAR R1, en (W/m^2), provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSL, Boulder, Colorado, se obtuvieron del sitio https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html. El dswrf indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra. El reticulado tiene una resolución de 1.8° en latitud × 1.8° en longitud considerando la región del NOA comprendida entre los 20°S y 30°S en latitud, y 70°O y 60°O en longitud. Esto resulta en una grilla de 5 puntos en latitud x 6 en longitud (=30 puntos), para el período 2000- 2023. Estos límites comprenden en realidad una región extendida que definimos en función de los valores de retícula disponibles en la base de datos de este reanálisis. Los datos obtenidos corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar.

Los datos del ERA5 usados corresponden a la radiación solar en superficie hacia abajo, ssrd (Surface solar radiation downwards), en (J/m^2), a lo largo del período 2000-2023, disponibles en https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-era5-single-levels-daily-statistics?tab=download. El ssrd indica la radiación solar de onda corta que llega a una superficie horizontal en la superficie de la Tierra y se refiere la suma de la radiación solar directa y difusa en el plano. Se considera que, en buena aproximación, es equivalente al valor modelado de la radiación que mediría un piranómetro (https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/169). La grilla en este caso tiene una resolución de latitud-longitud regular de 0.25° (41 valores de latitud x 41 valores de longitud=1681 puntos). Los datos de ssrd se dividieron en 3600 (segundos) para pasar de (J/m^2) a (W/m^2). Dado que estos valores corresponden a valores de irradiancia horarios, se estimaron a partir de ellos los valores promedios diarios, seguido del cálculo de los valores promedio mensual.

Los datos de MERRA V2 utilizados corresponden al flujo superficial neto descendente de onda corta, SWGNT (Surface Net Downward Shortwave flux), en (W/m^2). Estos datos están disponibles en https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?project=MERRA-2. La resolución espacial en este caso es de 0.5° en latitud × 0.625° en longitud (21 valores de latitud x 17 valores de longitud=357 puntos). Los datos obtenidos, al igual que en el caso de NCEP/NCAR, corresponden a valores promedio mensual del promedio diario de radiación solar.

Para realizar el análisis comparativo, se calcularon los valores promedios en cada punto de las grillas a lo largo del período 2000-2023, tanto para cada mes del año como para el promedio anual. En cada punto de la grilla se obtuvo un valor promedio de irradiación correspondiente al valor anual y 12 valores promedio de largo plazo, uno para cada mes del año. Esto significa que la única variabilidad de los datos analizados es espacial, ya que al promediar sobre todo el período considerado se elimina la variabilidad interanual. La Fig. 1 muestra los resultados para el promedio anual, así como para dos meses representativos: enero, para el verano, y julio, para el invierno, en las tres bases de datos de reanálisis.

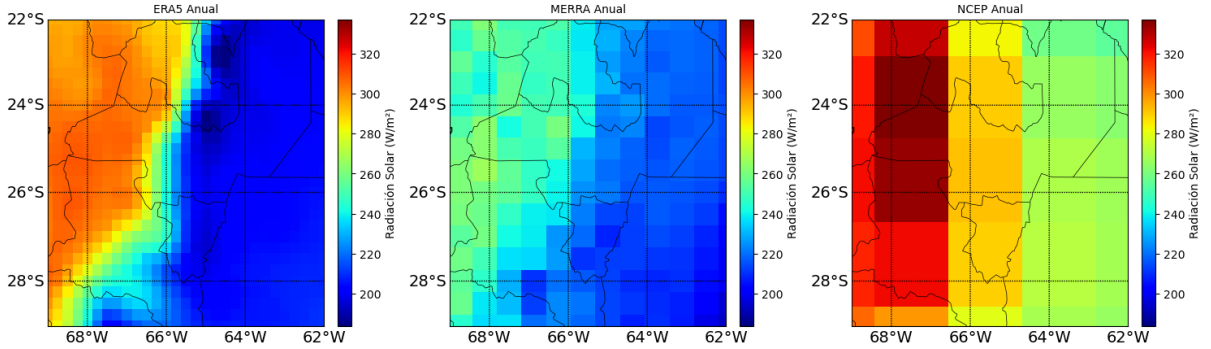


Figura 1. Promedios de irradiación global en plano horizontal en superficie en el período 2000-2023, correspondiente a valores promedio anual utilizando los datos de reanálisis ERA5 (primera columna), MERRA V2 (segunda columna) y NCEP/NCAR R1 (tercera columna).

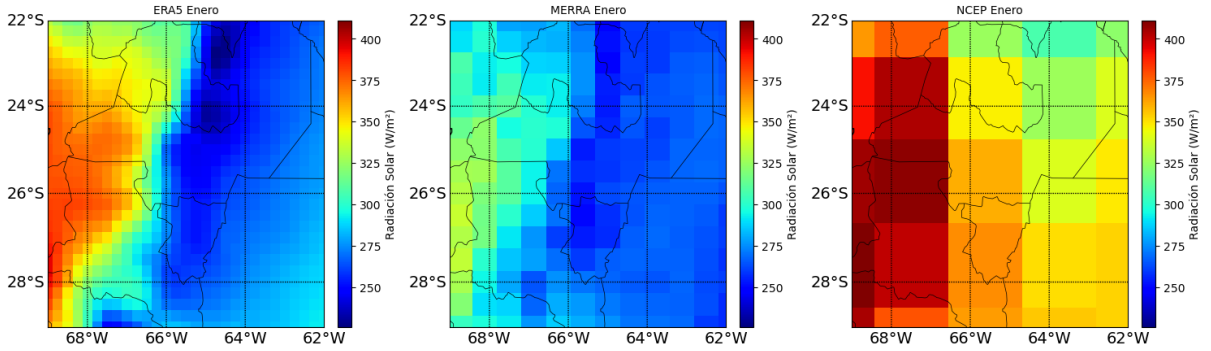


Figura 2. Promedios de irradiación global en plano horizontal en superficie en el período 2000-2023, correspondiente a valores promedio mensual de enero (utilizando los datos de reanálisis ERA5 (primera columna), MERRA V2 (segunda columna) y NCEP/NCAR R1 (tercera columna).

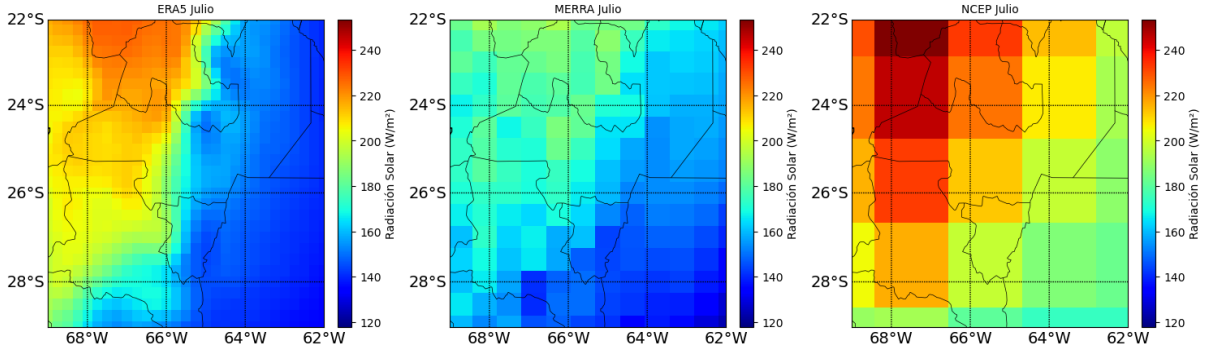


Figura 3. Promedios de irradiación global en plano horizontal en superficie en el período 2000-2023, correspondiente a valores promedio mensual de julio utilizando los datos de ERA5 (primera columna), MERRA V2 (segunda columna) y NCEP/NCAR R1 (tercera columna).

METODOLOGÍA

Entre los numerosos estadísticos usados para realizar comparaciones (Gueymard, 2004, Medina et al., 2023), elegimos el error absoluto medio (MAE, Mean Absolute Error) (Willmott y Matsuura, 2005), el error medio relativo (Mean Relative Error) y el coeficiente de correlación de Pearson (Chicco et al., 2021).

$$\mathrm{MAE} = \sum \frac{|y - x|}{n} \tag{1}$$

$$\mathrm{MRE} = \sum \frac{(y - x)}{x} * 100 \tag{2}$$

$$r = \frac{n\,(\Sigma xy) - (\Sigma x)\,(\Sigma y)}{\sqrt{[n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2]\,[n\,\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}} \tag{3}$$

donde "x" corresponde a los datos de referencia, "y" a los datos a comparar, "n" al número de datos de cada serie.

La comparación en este caso es una comparación de valores promedios considerando la distribución espacial de la radiación. No se analiza la variación temporal dado que utilizamos valores promediados en todo el período (2000-2023). Es decir que los distintos estadísticos se aplican a valores que únicamente presentan una variación espacial. Dado que las grillas de los reanálisis considerados no coinciden, previo a estimar los estadísticos se realizó una interpolación bi-lineal de las grillas de ERA5 y del MERRA V2 para obtener los valores correspondientes en los puntos del grillado de NCEP/NCAR.

Es decir que en este estudio n=30. Posteriormente se realizó un regrillado llevado a la grilla de mayor resolución de los tres reanálisis, es decir, de ERA5, donde se interpoló las grillas de MERRA V2 y NCEP/NCAR, quedando en ésta segunda comparativa n=1681. Los resultados son casi idénticos, pero elegimos mostrar el caso del re-grillado utilizando la grilla con la resolución más baja (NCEP/NCAR).

Se consideró como valor de referencia a los datos de radiación de ERA5, basados en un análisis preliminar de comparación con mediciones en Tucumán (26.8°S, 65.1°O) durante el período 2017-2018, en base a valores promedios diarios, que no se incluye en este estudio. En dicho análisis, ERA5 presentó un mejor desempeño que NCEP/NCAR, con errores relativos entre ~10% y 25% para ERA5 y entre ~50% y 65% para NCEP/NCAR. En cuanto a la detección de la variabilidad diaria, el coeficiente de correlación (r) fue de ~0.9 para ERA5 y ~0.6 para NCEP/NCAR.

El **MAE** mide la magnitud promedio de los errores en el conjunto de datos, sin tener en cuenta su signo, es una medida de la precisión de un modelo, que indica en promedio cuánto difieren las predicciones de los valores reales. Un MAE bajo indica un modelo más preciso. El **MRE** mide la magnitud promedio de los errores relativos entre las predicciones y los valores reales, usado para evaluar la precisión en términos relativos de un conjunto de datos. El MRE se expresa generalmente como porcentaje e indica una medida de cuán grande es el error, un MRE positivo además indica sobreestimación de valores, y un valor negativo una subestimación del valor real. El **coeficiente de correlación de Pearson** (**r**) mide el grado de linealidad de la asociación entre "x" e "y". Es decir que mide cuan similar es la variación de ambas series. Está limitado entre 1 y -1, donde 1 es el valor óptimo en nuestro caso indicando que ambas variables varían de forma idéntica. Se destaca que, en este caso, la variabilidad es espacial.

RESULTADOS

Se estimaron los tres estadísticos mencionados para la serie de los 12 meses y para la serie anual, cuyos valores se listan en la Tabla 2.
La Figura 4 muestra los valores de los estadísticos listados en la Tabla 2. Se observa claramente que los valores de radiación de MERRA V2 son más comparables con ERA5 que los valores de NCEP/NCAR, los cuales en general sobreestiman los valores de radiación en la región. Con respecto a la variabilidad espacial, si bien NCEP/NCAR presenta valores de "r" superiores a los de MERRA en los meses de invierno, en el promedio anual MERRA nuevamente es más comparable con ERA5.

CONCLUSIONES

En este estudio se realizó un análisis comparativo de los datos de irradiación global en plano horizontal obtenidos de tres diferentes reanálisis: ERA5, MERRA V2 y NCEP/NCAR. Se utilizó ERA5 como referencia y la comparación se realizó entre los valores promedios en el período 2000-2023 de la radiación diaria en la región del NOA. Para esto se estimaron el coeficiente de correlación de Pearson (r), el Error Medio Absoluto (MAE) y el Error Medio Relativo (MRE) en cada caso. Si bien lo ideal es realizar este análisis usando como valor de referencia la grilla de los valores obtenidos de mediciones, como no se disponen de las mismas, se utilizó la grilla del ERA5.

Tabla 2. Estadísticos de comparación entre los valores de los reanálisis con resolución NCEP.

Mes	r ERA5 vs.		MAE (W/m^2) ERA5 vs.		MRE (%) ERA5 vs.	
	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2	NCEP/NCAR	MERRA V2
1	0.72	0.82	54.1	31.1	19.2	-7.2
2	0.74	0.84	51.8	27.6	20.2	-4.8
3	0.73	0.85	51.0	28.0	24.1	-0.2
4	0.85	0.85	48.6	28.7	29.2	3.1
5	0.89	0.82	43.8	24.3	32.1	2.8
6	0.86	0.78	41.0	22.7	33.1	1.9

7	0.89	0.81	35.7	19.9	24.0	-4.5
8	0.90	0.85	33.7	23.6	17.5	-8.8
9	0.87	0.84	38.5	28.8	16.8	-7.9
10	0.83	0.83	49.6	33.4	19.6	-3.7
11	0.80	0.82	57.3	35.5	20.8	-3.6
12	0.74	0.84	59.7	34.4	21.2	-5.6
Anual	0.89	0.89	46.6	22.7	21.4	-4.4

Con respecto al patrón de variación espacial, en el caso de NCEP/NCAR, "r" varía entre 0.72 y 0.90 a lo largo de los meses, resultando 0.88 en el caso de los valores promedio anual. En el caso de MERRA V2, "r" oscila entre 0.78 y 0.85, con un promedio anual de 0.89. Es decir que las tres bases de datos presentan un gradiente de variación latitudinal y longitudinal similar. En realidad, estos gradientes se deducen además de manera teórica ya que se trata de una región con elevaciones hacia el oeste de manera que es esperable una disminución de la radiación hacia el este. Y de igual manera, al estar hacia el sur del ecuador, es esperable una disminución de la radiación hacia a medida que nos trasladamos hacia el sur.

Con respecto a los valores de radiación, MERRA V2 presenta valores más comparables con los de ERA5 que NCEP/NCAR ya que tanto el MAE como el MRE son notablemente menores para todos los meses del año, y también para el valor promedio anual, como puede deducirse claramente de la Figura 2 y de los valores de la Tabla 2. En el caso de MERRA V2, MAE varía entre 20 y 36 W/m^2, mientras que en el caso de NCEP/NCAR la variación es entre 34 y 60 W/m^2. El MRE resulta en promedio -5% en el caso de MERRA V2, y 20% en el caso de NCEP/NCAR, lo que indica una clara sobre-estimación de la radiación en el NOA por parte de NCEP/NCAR.

Considerar datos observacionales sería esencial para una validación completa y para comprender mejor las desviaciones observadas. A pesar de las limitaciones, los resultados sugieren que MERRA-2, junto con ERA5, sería más preciso que NCEP7NCAR para estimaciones de irradiación global en plano horizontal en ausencia de datos observacionales en la región del NOA. Sin embargo, futuras investigaciones deberían integrar datos medidos para una evaluación más robusta.

Estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar adecuadamente las fuentes de datos de reanálisis para estudios climáticos y energéticos, reconociendo al mismo tiempo la necesidad de incorporar datos medidos para validaciones futuras.

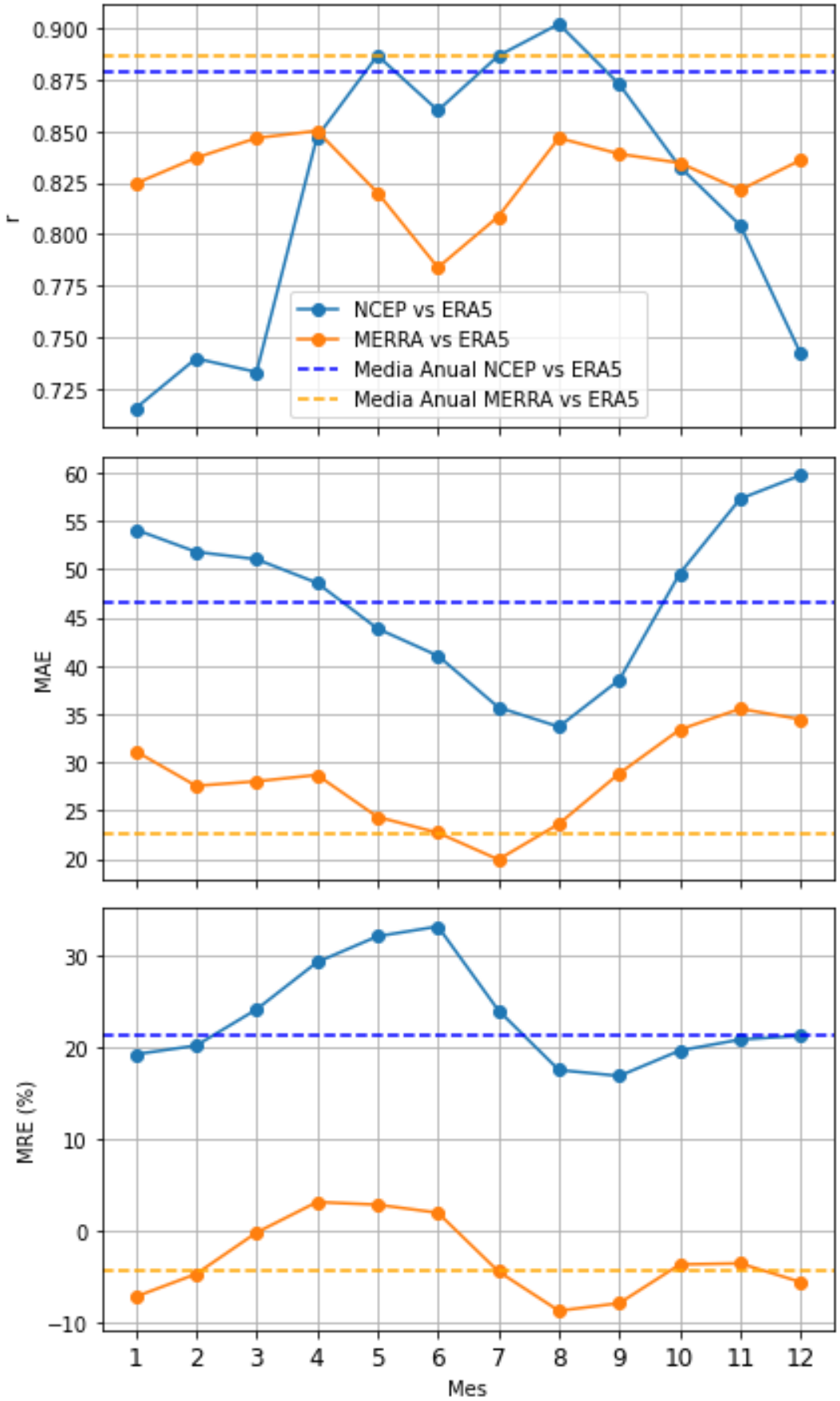


Figura 4. Parámetros estadísticos obtenidos. (Nota: en el eje horizontal el n° representa el mes).

REFERENCIAS

Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. (2021), The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, PeerJ Computer Science, 7, e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Doddy Clarke, E., Griffin, S., McDermott, F., Monteiro Correia, J., Sweeney, C. (2021). Which Reanalysis Dataset Should We Use for Renewable Energy Analysis in Ireland? Atmosphere, 12, 624. https://doi.org/10.3390/atmos12050624

Gueymard, C. A. (2014). A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 1024–1034. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117

Hollmmann R., Merchant C. J., Saunders R. (2013). The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables, Bull. Amer. Meteor. Soc., 94, 1541–1552. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00254.1

Jiao, B., Li, Q., Sun, W., Martin, M. (2022). Uncertainties in the global and continental surface solar radiation variations: inter-comparison of in-situ observations, reanalyses, and model simulations. Clim. Dyn., 59, 2499–2516. https://doi.org/10.1007/s00382-022-06222-3

Kalnay, E. Kanamitsu M., Kistler, R., Collins, W., et al. (1996). The NCEP/NCAR 40- year reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470.

Mabasa, B., Lysko, M.D., Moloi, S.J. (2021). Validating Hourly Satellite Based and Reanalysis Based Global Horizontal Irradiance Datasets over South Africa. Geomatics, 1, 429-449. https://doi.org/10.3390/geomatics1040025

Morales-Moraga, D., Meza, F.J., Miranda, M. y Gironás, J. (2019). Spatio-temporal estimation of climatic variables for gap filling and record extension using Reanalysis data. Theor. Appl. Climatol., 137, 1089–1104.

Peng, X., She, J., Zhang, S., Tan, J. y Li, Y. (2019). Evaluation of Multi-Reanalysis Solar Radiation Products Using Global Surface Observations. Atmosphere, 10, 42.

Salazar, G., Gueymard, C. Bezerra Galdino, J., de Castro Vilela, O., Fraidenraich, N. (2020), Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 117, 109478. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109478

Tahir, Z.R., Azhar, M., Mumtaz, M., Asim, M., Moeenuddin, G., Sharif, H., Hassan, S. (2020), Evaluation of the reanalysis surface solar radiation from NCEP, ECMWF, NASA, and JMA using surface observations for Balochistan, Pakistan, J. Renewable Sustainable Energy 12, 023703. https://doi.org/10.1063/1.5135381

Tahir, Z.R., Amjad, M., Asim, M., Azhar, M., Farooq, M., Ali. M.J., Ahmad, S.U., Amjad, G.M., Hussain, A. (2021), Improving the accuracy of solar radiation estimation from reanalysis datasets using surface measurements, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 47, 101485. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101485

Trenberth K. E., et al. (2013). Challenge of a Sustained Climate Observing System. In: Asrar, G., Hurrell, J. (eds) Climate Science for Serving Society. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6692-1_2

Urraca, R., Huld, T., Gracia-Amillo, A., Martinez-de-Pison, F.J., Kaspar, F. Sanz-Garcia, A. (2018), Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data, Solar Energy, 164, 339-354. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059

Wang, Y., Zhao, X., Mamtimin, A., Sayit, H., Abulizi, S., Maturdi, A., Yang, F., Huo, W., Zhou, C., Yang, X., et al. (2021), Evaluation of Reanalysis Datasets for Solar Radiation with In Situ Observations at a Location over the Gobi Region of Xinjiang, China" Remote Sensing 13, no. 21: 4191. https://doi.org/10.3390/rs13214191

Willmott, C.J., K. Matsuura (2005), Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance, Climate Research, 30, 79–82. https://doi.org/10.3354/cr030079.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo enmarcado en el Proyecto de UE de INFINOA; PUE 22920200100008CO. Los autores agradecen también el financiamiento provisto por el proyecto PIP 2957.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLAR RADIATION IN THE NOA REGION FOR THE PERIOD 2000-2023 BETWEEN REANALYSIS DATABASES

ABSTRACT: The study of climatic parameters, such as surface solar radiation, is of vital importance in analyzing energy availability to appropriately size the technologies required for energy utilization. In many regions, such as Northwestern Argentina, the focus area of this work, there is an inadequate coverage of meteorological stations to work with measured values. Therefore, reanalysis databases are a promising alternative. This study analyzes the average surface solar radiation in the period from 2000 to 2023 in the NOA region using data from the NCEP/NCAR R1, ERA5, and MERRA-V2 reanalyses. The monthly average series were analyzed, and the different databases were compared for each month and the annual mean value. For the comparative analysis, three statistical parameters were estimated: the Pearson correlation coefficient (r), the mean absolute error (MAE), and the mean relative error (MRE). The three reanalyses exhibit similar spatial variability; however, in terms of absolute values, ERA5 and MERRA V2 are comparable, while NCEP/NCAR R1 shows a systematic overestimation reaching up to 30%

Keywords: surface solar radiation, NCEP/NCAR R1, MERRA V2, ERA5, NOA.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 297-307, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

UTILIZANDO EL MODELO SATELITAL GL 1.2 EN ESCALA DIARIA COMO REFERENCIA PARA CALIBRACIÓN PROVISORIA DE LA RED EEAOC – TUCUMÁN

Juan C. Ceballos[1], Jorge D. Forciniti[2], Maria L. Molina[3]
[1]Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos – DISSM, Coordenação Geral de Ciências da Terra – CGCT, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil
Teléfono 55 12 3208 8750 - e-mail jcc.1943@gmail.com
[2]Sección Agrometeorología, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.
CC Nº 9 (4101) Las Talitas –Tucumán – Argentina
[3]Laboratorio de Ionosfera, Atmósfera Neutra y Magnetosfera – LIANM, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán - Tucumán – Argentina

RESUMEN: En Tucumán, la Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC) dispone de una red de estaciones meteorológicas automáticas con generación continua de datos de irradiancia solar. En este trabajo se contrastan las irradiancias medias diarias de 18 estaciones (período 2017-2021) con los valores obtenidos por el modelo satelital GL1.2 desarrollado en la División de Satélites e Sensores Meteorológicos (DISSM/CGCT/INPE, Brasil). Este modelo ya mostró un buen desempeño en la comparación con datos de piranómetros Kipp & Zonen CM6B y CMP6 de la red automática del INMET (Instituto Nacional de meteorología, Brasil). Se realizó un análisis preliminar de la calidad del GL1.2, comparándolo con datos diarios (primer semestre de 2018) de la red del INMET en una región relativamente homogénea del Brasil en latitud semejante a la de Tucumán, obteniéndose un buen ajuste, por lo que se adoptó el GL1.2 como "piranómetro de referencia" para una calibración provisoria de los datos solarimétricos diarios de la red EEAOC. Los resultados de los estadísticos utilizados para juzgar el ajuste lineal EEAOC vs. GL 1.2 sugieren que el modelo satelital puede utilizarse para la calibración provisoria de la red de Tucumán, con dispersión típica (desviación estándar) de 20 W/m^2.

Palabras claves: calibración provisoria, modelo GL 1.2, red solarimétrica.

INTRODUCCIÓN

El Noroeste Argentino tiene un área de 560.000 km^2, y una fracción importante de ella es de tipo montañoso. Históricamente, las redes solarimétricas han sido poco densas para cubrir con detalles la distribución de energía solar, y las series temporales fueron complementadas con mediciones de heliofania (ver p.ej. Atlas Solarimétrico de Grossi Gallegos e Righini, 2007). Actualmente, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) opera una red que en el Centro y Noroeste del país tiene estaciones en Pilar (Córdoba), La Quiaca (Jujuy) y Tucumán, las dos primeras con irradiancias horarias y diarias recientes publicadas en el World Radiation Data Centre (WRDC). Esfuerzos recientes pueden incrementar una red nacional del INTA, instalando 4 estaciones de alto desempeño en Salta y Jujuy (ver noticia).

Dentro del Noroeste Argentino la provincia de Tucumán tiene un área de apenas 22524 km^2, básicamente entre las latitudes de 26º y 28º sur, y longitudes de 64º 30’ y 66º 15’ oeste. La Figura 1 ilustra la orografía de la provincia. Su topografía es compleja, presentando diversos microclimas asociados al relieve y circulación atmosférica regional: llanuras y montañas, climas secos y húmedos, selvas exuberantes y tierras áridas. Llanuras, valles y montañas con altas cumbres ubicadas hacia el oeste y noreste de la provincia, cubren el 45% de la superficie total. Dos altas cumbres exceden 5400 m

de altitud. Al este, el 55% es la Pampa de Tucumán y progresa para la región chaqueña con altitud inferior a 450 m. Dada esta variedad, la instalación y manutención de una red adecuada (con funcionamiento automático) es una tarea complicada. La Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC, con sede en San Miguel de Tucumán), cuenta con una red de más de 40 estaciones meteorológicas automáticas, que son gestionadas por la Sección Agrometeorología de la institución. La Figura 1 ilustra la localización de 18 de ellas, seleccionadas para este trabajo; la mayoría se sitúa en la llanura y piedemonte del Aconquija, y 2 en la región montañosa, en altitud superior a 1700 m.

Desde 1994, esta red genera información meteorológica de manera automática. A partir de 2006, se implementó un sistema de telesupervisión que hasta hoy en día permite obtener datos en tiempo real de diferentes variables meteorológicas, entre ellas la radiación solar global (Lamelas et al., 2006), con una frecuencia de medición cada 15 minutos. Los datos de estas estaciones están disponibles en la página web de la Sección Agrometeorología (http://agromet.eeaoc.gob.ar). La medición de la radiación solar global se realiza mediante solarímetros fotovoltaicos con sensores de fotodiodo de silicio (Grossi Gallegos y Righini, 2007), los cuales son sensibles en la banda espectral que va desde los 300 a 1100 nm, pero están calibrados para medir la radiación solar en el intervalo de 300 a 3000 nm. Al ser una red tan densa, es frecuente enfrentarse a la ausencia de datos de radiación debido a problemas con la fuente de alimentación, así como la presencia de información defectuosa por mal funcionamiento de los sensores. También ocurre que instrumentos se deterioren con el tiempo y debido a la exposición a las condiciones climáticas, lo que puede contribuir a la corrupción de sus datos.

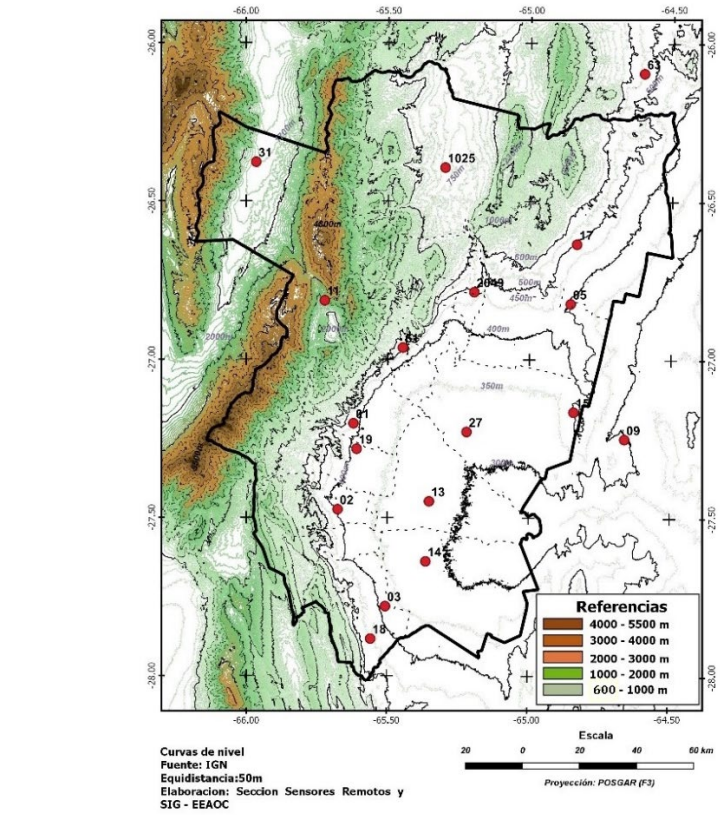
El modelo satelital GL1.2 (Ceballos et al. 2004) fue desarrollado en la DISSM/CGCT/INPE y estima radiación solar operacionalmente a partir de imágenes GOES-VIS da América del Sur y parte de Mesoamérica y Caribe (URL https://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/). En escalas temporales de un día a un mes muestra resultados positivos para desviación media MBE y estándar S en la comparación con varias redes solarimétricas: en el Sur de Brasil, 2,5 y 21 W/m^2 respectivamente, para valores diarios (Porfirio et al. 2020); en la Pampa Húmeda argentina, -4 a +6, y 10 a 20 W/m^2, para promedios de 10 días (Ceballos et al. 2022). Si se considera promedio diario típico de 200 W/m^2 en 2018-2021, para Uruguay se tiene MBE=-4 a 1 y S= 12 a 26 W/m^2 (Sarazola et al. 2023). En Tucumán, Forciniti et al. (2022) observaron excelente linealidad de 16 estaciones de la red EEAOC, período 2017-2021, con valores relativamente elevados de MBE y S~10-30 W/m^2. Es relevante observar que el GL 1.2 muestra desempeño superior o por lo menos comparable al de varios modelos reconocidos internacionalmente, para Brasil (Porfirio et al. 2018) y para Uruguay (Sarazola et al. 2023).

La cuestión central de este trabajo es analizar la posibilidad de utilizar el GL 1.2 como referencia para una calibración provisoria de datos solarimétricos de la red EEAOC. En una etapa posterior, uno o más piranómetros de referencia podrán ser utilizados para 1) calibración sistemática de la red; 2) corrección del propio estimador GL en la región tucumana, para ejecutar un ajuste final de la serie temporal completa de datos solarimétricos. Para eso, se realiza un análisis preliminar de la calidad del GL 1.2 como estimador de irradiancia media diaria en una región relativamente homogénea y en latitud semejante a la de Tucumán (a fin de tener básicamente la misma geometría diaria de la trayectoria del sol, y ángulos cenitales semejantes del satélite GOES). En caso de resultado satisfactorio, a seguir se realiza una “calibración provisoria” de estaciones de la EEAOC en el quinquenio, presentando los resultados.

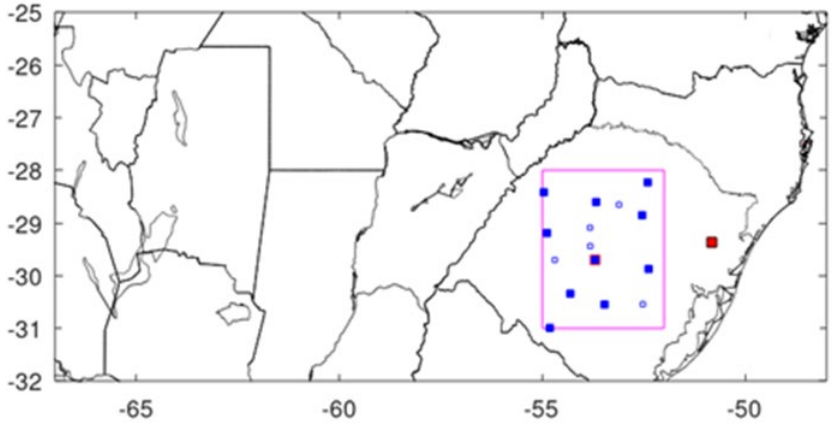
DATOS Y MÉTODOS

Datos de irradiancia media diaria en el quinquenio 2017-2021 fueron analizados, provenientes de tres fuentes:
1. Red automática de la EEAOC (provincia de Tucumán y algunos locales vecinos en Santiago del Estero y Salta). Se dispuso de 30 estaciones automáticas con registros de radiación solar. Estas estaciones registran datos con una periodicidad de 15 minutos. Se calculó el promedio diario de radiación tomando en cuenta los registros generados durante un período de 24 horas. Solo se conservaron los registros diarios que contenían al menos el 95% de los datos de 15 minutos. Los registros que no cumplieron con este criterio fueron descartados. Como resultado fueron seleccionadas 18 estaciones que

cumplían con estos requisitos, y son indicadas en la Figura 1a y Tabla 1. Fuente de datos puede ser consultada en EEAOC Agrometeorología, 2023 (https://agromet.eeaoc.gob.ar).



(a)



(b)

Figura 1. Distribución geográfica de locales. (a) Red EEAOC: círculos en rojo; líneas de nivel negras a cada 100 m en la llanura, y a cada 500 m en la región montañosa. (b) En recuadro, 15 estaciones de la red INMET; 10 escogidas para análisis están llenas en azul. Llena en rojo: estación Canela, RS.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la red EEAOC, georreferenciadas instaladas a lo largo de la provincia de Tucumán y áreas de influencia. ID: identificación en los archivos GL; Estación: ID en archivos EEAOC.

ID	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Altura (msnm)
29046	01	Pueblo Viejo	-27,1975	-65,6183	427
29048	02	Santa Ana	-27,4747	-65,6764	389
29033	03	Casas Viejas	-27,7803	-65,5064	383
29043	05	Monte Redondo	-26,8192	-64,8503	393
29056	09	El Charco	-27,2509	-64,6628	308
29045	18	Bajastiné	-27,8825	-65,5589	471
29037	11	Pinar de los Ciervos	-26,8147	-65,7239	2427
28044	13	Ingas	-27,4489	-65,3514	317
29050	14	Monte Toro	-27,6383	-65,3636	309
29040	15	Viclos	-27,1656	-64,8425	401
29031	17	La Cruz	-26,6350	-64,8350	491
29041	19	Las Faldas	-27,2833	-65,6094	388
29060	27	Los Quemados	-27,2289	-65,2203	324
29055	31	Colalao del valle	-26,3771	-65,9649	1710
29057	61	El Guayal	-26,9382	-65,4712	494
29052	63	Antilla	-26,0942	-64,6022	535
29032	1025	Benjamín Paz	-26,3939	-65,2997	780
29035	2049	El Colmenar	-26,7875	-65,1953	482

El mantenimiento está programado para periodicidad de una o dos veces por bimestre, mientras que los sensores son reemplazados cada 5 años. No se registra calibración, más que la de fábrica. Cuando se detectan datos anómalos por comparación con estaciones cercanas, se reemplaza el sensor por uno nuevo. Está planeada una secuencia sistemática de intercomparaciones con un piranómetro Kipp & Zonen CM6B calibrado recientemente en el GERSOL (Univ, Nac. de Luján). Esto implicará en duración considerable de una secuencia completa de calibración de la red.

2. Red de estaciones automáticas del INMET (Sur y Sudeste del Brasil), primer semestre de 2018. La red INMET dispone de piranómetros Kipp & Zonen CM6B y CMP6, con señal muestreado a cada minuto e información de la integral horaria (Porfirio et al. 2020; página web INMET 2023). Datos diarios son generados como promedio diario de los datos horarios. Considerando un área de 3º×3º (longitud -55° a -52ºW, latitud -31º a -28ºS) en el Estado de Rio Grande do Sul, geográficamente homogénea y en latitud semejante a la provincia de Tucumán (Figura 1b), la red INMET reporta la existencia de 15 estaciones. Para análisis final fueron utilizados datos disponibles de 10 de ellas, indicadas con cuadrado lleno.

3. Estimadores provenientes del modelo satelital GL 1.2 (generados en la DISSM/CGCT/INPE, Brasil), produciendo archivos digitales diarios en grilla regular con resolución de 0,04º. Los archivos digitales diarios de GL permiten el muestreo operacional de estimaciones para un conjunto de puntos de interés, que incluyen los locales de las redes EEAOC e INMET. Un número ID de identificación, latitud, longitud y altitud y los valores diarios son insertados en una planilla mensual (archivos de texto) TAB_GL12G_*aaaamm*.txt, donde *aaaamm* indica año y mes. En planillas mensuales ESTACAO_*aaaamm*.txt con la misma secuencia interna de ID son incorporados los datos disponibles de mediciones diarias. Las planillas están en continua actualización, sea por la adquisición de datos antiguos, sea por la inclusión de nuevos locales de interés. La base de datos disponible en 2023 fue la utilizada en este trabajo. Datos X no registrados o inválidos ($X \leq 0$ o $X > 400$ W/m^2) son considerados nulos.

Métodos de evaluación de parámetros

Considérese una variable física (en este caso, irradiancia solar media diaria), con una serie de datos X (estimados o medidos) y con una serie correspondiente de datos Y (obtenidos con un método considerado más preciso, o "verdadero"). La serie X puede ser corregida o ajustada mediante una regresión lineal Y|X obtenida por el conocido criterio de cuadrados mínimos, resultando en estimar un valor X* "corregido" según la expresión

$$X^* = a\,X + b, \tag{1a}$$

$$a = [< X^2 >< Y > - < X >< XY >]/\,D,\;\; D = < X^2 > - < X >^2 \tag{1b}$$

$$b = (< Y > - a)\,/ < X >. \tag{1c}$$

Aquí, el corchete angular <*U*> simboliza el promedio aritmético de una variable *U*. Las medidas de calidad de datos están asociadas a las desviaciones ("errores") E = Y - X, E* = Y – X*, según

$$\text{MBE(desviación media, } \textit{mean bias error}) = <E> \tag{2a}$$

$$\text{MBE*(ídem, referido al "valor corregido")} = <E^*> \tag{2b}$$

$$S^2 \text{ (varianza de E)} = \text{Var (E)} = < (E - \text{MBE})^2 > \tag{2c}$$

$$S^{*2} \text{ (varianza de E*)} = < (X^* - \text{MBE}^*)^2 > \tag{2d}$$

$$\text{RMSE (error cuadrático medio)} = (<E^2>)^{1/2} = (\text{MBE}^2 + S^2)^{1/2} \tag{2e}$$

MBE* = 0, por construcción. La linealidad del ajuste X* (Ec.1a) se califica según el coeficiente de correlación (ρ) y el de determinación (ρ^2):

$$\rho = < (X - <X>) \,.\, (Y - <Y>) > / \,[\text{Var (X)} \,.\, \text{Var (Y)}]^{1/2} \tag{3}$$

En el caso de observar una convergencia coherente de los pares (X, Y) $\rightarrow$ (0,0) para Y$\rightarrow$0, es razonable forzar una regresión lineal pasando por el origen, de modo que

$$X^* = a\,X \tag{4a}$$

$$a = <X\,Y>/<X^2> \tag{4b}$$

Este criterio de calibración es eventualmente más coherente que el descripto por las (Ecs.1a -1c), siempre que no se registren valores excesivamente grandes y frecuentes de E y de S (Ecs. 2a -2e).

RESULTADOS

Comportamiento del modelo GL 1.2

Aunque no disponemos de información detallada sobre la rutina de mantenimiento y calibración de la red INMET, *a priori* los piranómetros utilizados son de buena calidad y probablemente mayor estabilidad que los de la EEAOC. Así, en una primera etapa las estimaciones del modelo satelital (GL) fueron comparadas con las medidas de piranómetros (Gp) en la red INMET, adoptadas como referencia. En el contexto de las variables descriptas en Datos y Métodos, era GL = X, Gp = Y. Desechando pares (GL, Gp) con GL o GP nulo (ausencia de dato o incompatibilidad de él), fueron considerados los datos de diez de las quince estaciones (indicados en azul lleno en la Figura 1). No fueron aplicados filtros adicionales, obteniéndose una población total de 1734 pares de datos (GL, Gp).

La Figura 2 ilustra la comparación entre las variables GL y Gp: a la izquierda, estación Canela (fuera de la región muestreada, ver Figura 1b), y a la derecha, el conjunto de informaciones de los 10 locales seleccionados. Para una región geográficamente homogénea, se esperan variaciones grandes de la

irradiancia a lo largo del año, pero dispersión pequeña de los puntos en torno de una recta de calibración (primera diagonal, *si el modelo y los piranómetros son confiables*).

En lo que respecta a Canela, los parámetros de desviación son MBE = -1, S = 20, RMSE = 20 W/m^2; para la regresión usual (línea roja) es MBE=0, S* = 18 W/m^2, y el ajuste apenas multiplicativo (línea verde) produce MBE* = -4, S* = 19 W/m^2. Por lo tanto, no hay una diferencia estadística significativa entre la regresión usual y aquella con origen forzado. Los valores de desviación estándar S o S* del modelo GL son semejantes a los mencionados en la Introducción para otras regiones de América del Sur en latitudes semejantes.

La Figura 2 permite una visión de conjunto de los pares (GL, Gp). Se han considerado rectas de regresión con pasaje forzada por el origen de coordenadas. Los coeficientes de correlación son muy elevados para todos los locales (ρ > 0,966, excepto uno), indicando acentuada linealidad y pequeña dispersión de puntos en torno de la recta de regresión. Algunos valores intermedios de irradiancia (100 a 250 W/m^2) presentan desvíos mayores (probablemente debido a limitaciones del GL 1.2 en el modelaje de efectos de nubes). Por otro lado, la Figura 2 muestra puntos que obviamente denuncian datos GL o Gp inválidos pero que son minoritarios.

La coherencia de GL→ 0 con Gp→ 0, dentro de la margen de un desvío estándar S y las pendientes oscilando dentro de ±0,03 en torno de la unidad, justifican usar una regresión Gp|GL simple (apenas una constante multiplicativa de ajuste), o sea, el uso de las expresiones (4) para "calibrar" el modelo GL 1.2 con piranómetros de referencia. Recíprocamente, sugieren que el propio modelo GL puede ser usado como referencia para valores diarios regionales dentro del 3% de la constante de calibración.
A pesar de ser próximos y climáticamente semejantes, se observan algunos coeficientes de ajuste *a* con valores discrepantes: la Figura 2 ilustra en rojo y en azul los ajustes con máxima y mínima pendiente (*a* = 1,06 y *a* = 0,95). Estas diferencias de 5% en el coeficiente de ajuste sugieren eventual defecto de calibración de algunos piranómetros (de hecho, no tenemos información sobre la calibración sistemática de los instrumentos de la red).

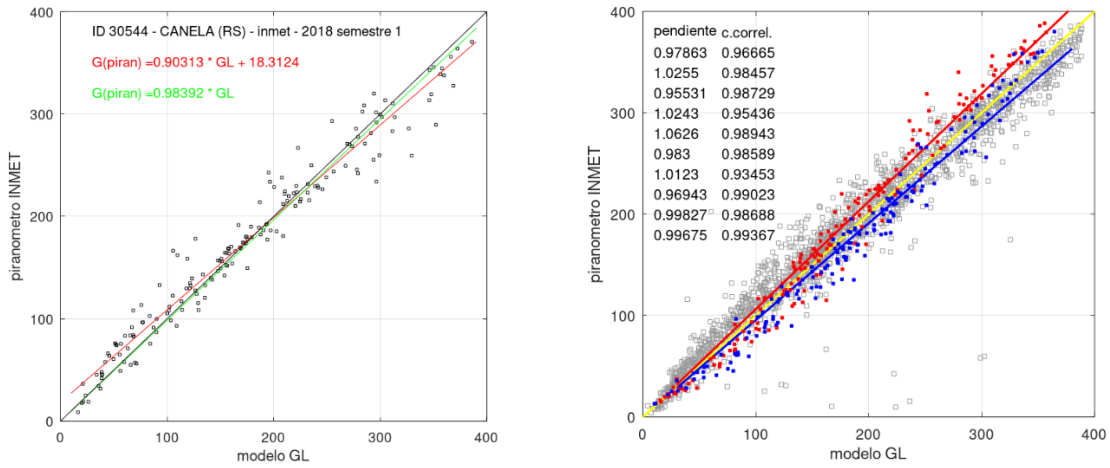


Figura 2. Modelo GL versus piranómetros de la red INMET en la región central de Rio Grande do Sul, enero-junio 2018. Izquierda: estación Canela, con rectas de regresión usual y con origen forzado. Derecha: Comparación con 10 piranómetros, indicando pendientes y coeficientes de correlación de la regresión Gp|GL. Líneas roja y azul: ver texto.

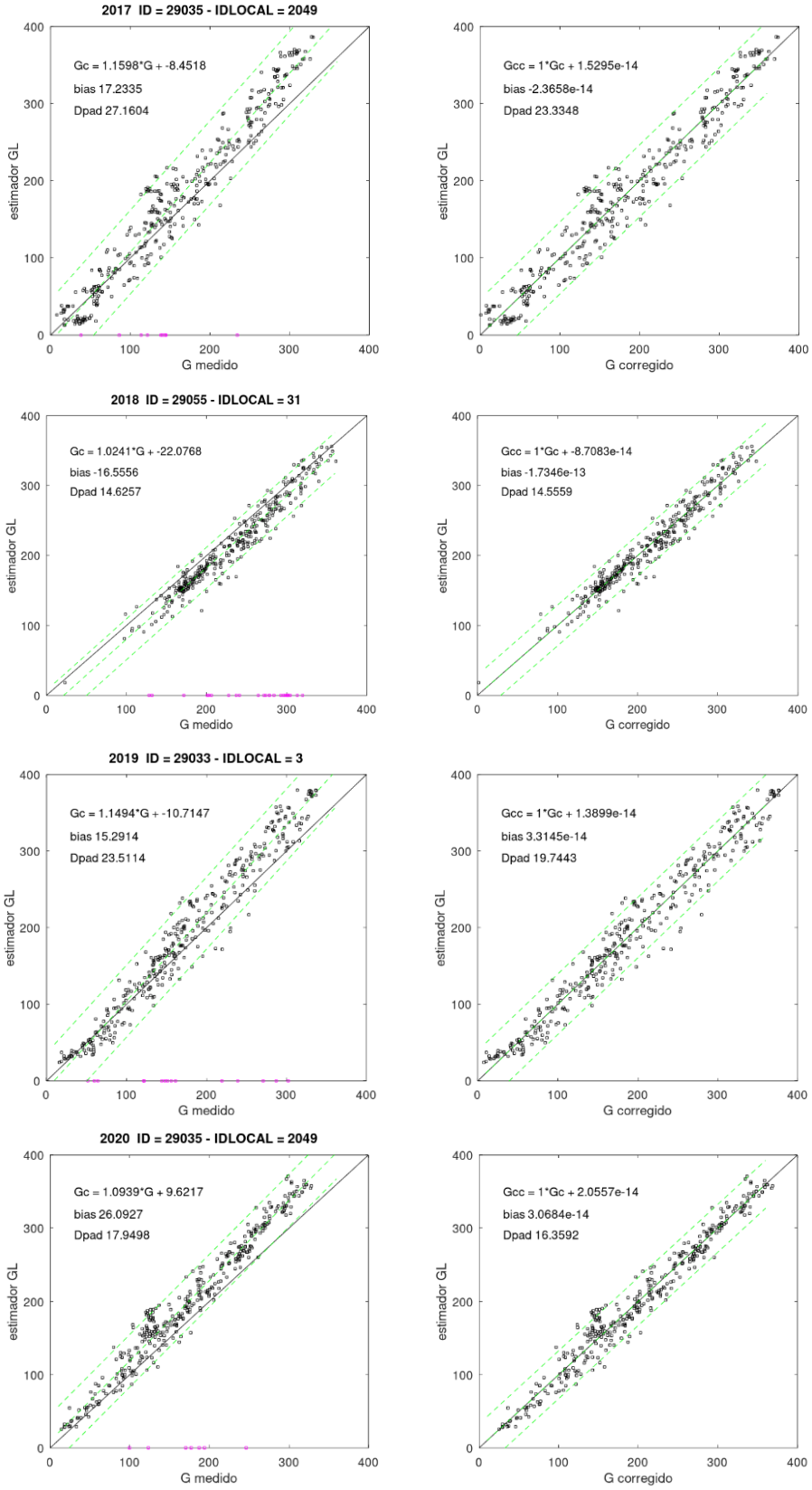


Figura 3. *Ejemplos de comportamiento de estaciones en 4 años diferentes. Izquierda: diagrama de dispersión GL|G (Gc se refiere a la recta de regresión lineal); puntos rosados en el eje x indican casos con ausencia de valor GL (no incorporados a la estadística). Derecha: diagrama GL|G*. bias: desviación media MBE; Dpad: desviación estándar S. Gc y Gcc se refieren a las respectivas rectas de regresión lineal.*

La coherencia de GL→ 0 con Gp→ 0, dentro de la margen de un desvío estándar S y las pendientes oscilando dentro de ±0,03 en torno de la unidad, justifican usar una regresión Gp|GL simple (apenas una constante multiplicativa de ajuste), o sea, el uso de las expresiones (4) para "calibrar" el modelo GL 1.2 con piranómetros de referencia. Recíprocamente, sugieren que el propio modelo GL puede ser usado como referencia para valores diarios regionales dentro del 3% de la constante de calibración.
A pesar de ser próximos y climáticamente semejantes, se observan algunos coeficientes de ajuste *a* con valores discrepantes: la Figura 2 ilustra en rojo y en azul los ajustes con máxima y mínima pendiente (*a* = 1,06 y *a* = 0,95). Estas diferencias de 5% en el coeficiente de ajuste sugieren eventual defecto de calibración de algunos piranómetros (de hecho, no tenemos información sobre la calibración sistemática de los instrumentos de la red).

Es importante observar que el GL1.2 es un modelo físico (no estadístico) y no incluye ajuste empírico con datos solarimétricos de superficie. Localmente, depende principalmente de la información sobre reflectancia típica de escena sin nubes (*Rmin*) y sobre agua precipitable (*W2*). La primera puede influir en la estimación de nebulosidad que, conjuntamente con la segunda, permite evaluar absorción por la atmósfera (Ceballos et al., 2004). En la medida en que *Rmin* y/o *W2* se aparten del valor asumido en el modelo, éste producirá estimaciones con errores sistemáticos mayores (Ceballos et al., 2023).
Los elevados coeficientes de correlación (Figura 2) en su conjunto son favorables al uso del propio modelo GL como "piranómetro de referencia" en la red del INMET, para detección *a priori* de comportamientos anormales de un piranómetro. Sugiere también que el GL 1.2 puede ser usado en la región de la EEAOC, desde que *Rmin* y *W2* representen valores regionales. El propio GL 1.2 puede ser corregido con futuros ajustes estacionales, mediante un piranómetro de referencia *ad hoc* localizado en Tucumán y calibrado adecuadamente.

Comparación red EEAOC versus modelo GL
Considerando el estimador GL 1.2 como valor de referencia para una calibración de datos de superficie (G = X, GL = Y), la Figura 3 ilustra algunos casos entre 2017 y 2020. A la izquierda, las abscisas representan datos medidos por estación, y las ordenadas el valor estimado GL 1.2., considerado de referencia. Se incluyen la regresión lineal (Ec. 1a), la desviación media MBE (Ec. 2a) y la desviación estándar S (Ec. 2c). El coeficiente de correlación lineal fue ρ> 0,95 en todos los casos. Las rectas de trazos representan G* ± 2 S. Los gráficos de la derecha se refieren a valores de G corregidos. La regresión GL|G* describe la diagonal principal 1:1, la desviación media MBE* es nula. Las líneas de trazo representan la regresión G*± 2 S*. En general, las medidas de la red EEAOC presentan una dispersión del orden de S* = 20 W/m^2.

La Tabla 2 presenta los parámetros estadísticos MBE (Ec. 2a) y S (Ec. 2c) en W/m^2 para todas las estaciones EEAOC, considerando el quinquenio 2017-2021. Las estaciones tenían por lo menos 50% de los pares (G, GL) posibles. Al aplicar una regresión lineal, MBE*=0 pero la dispersión de los datos corregidos cambia poco en relación a la original: S*~S. Estaciones como Pinar de los Ciervos (ID local 11) o El Guayal (61) presentarían elevado valor de S*, asociado a variaciones de comportamiento o mantenimiento durante el quinquenio; al procesar dados anuales, como ilustrado por la Tabla 3, S* decrece para 26-27 W/m^2. Es importante observar que, una vez retirada la tendencia *a.G+b*, S* representa el desvío estándar de fluctuaciones **E** = GL – G* aleatorias compuestas como suma de los errores del propio sensor terrestre más los errores intrínsecos de GL, asociados muy especialmente a las limitaciones del modelo para discernir correctamente la nebulosidad en una célula de grilla (0,4º × 0,4º) y sus variaciones rápidas.

En escala anual se observan valores típicos S*~20 W/m^2, lo que parece representar una característica regional de la precisión del modelo GL 1.2. Asumiendo para **E** una distribución aproximadamente gaussiana, el intervalo ±2S*~ 40 W/m^2 acumula 95% de las fluctuaciones esperadas para **E**. Este margen es también el esperable para substitución de G* por el valor GL en el caso de dados faltantes.

De esta forma, los coeficientes *a,b* permitirían una corrección preliminar de las series temporales de irradiancia obtenidas por la red EEAOC y la compleción de series temporales. Obviamente esta corrección tiene naturaleza estadística y no substituye el análisis cuidadoso de las series de medidas para corregir errores de naturaleza técnica o de limitaciones del propio modelo satelital.

Tabla 2: Desviación media (sesgo MBE) y desviación estándar S, en W/m², para estaciones instaladas a lo largo del territorio tucumano con datos del período 2017-2021.

ID	ID Local	MBE	S
29046	1	26,6	30
29048	2	31,5	36
29033	3	10,2	24
29043	5	18,7	24
29056	9	34,3	42
29045	11	-4,6	63
29037	13	22,2	31
28044	14	20,9	25
29050	15	16,4	32
29040	17	12,9	22
29031	18	13,2	23
29041	19	17,5	33
29060	27	32,4	39
29055	31	-12,1	18
29057	61	-4,8	41
29052	63	28,4	32
29032	1025	21,2	43
29035	2049	19,5	23

Tabla 3: Cálculo anual de la pendiente (a) y ordenada al origen (b) de la recta de regresión GL|G, sesgo (MBE) de la estimación GL 1.2, y desviación estándar S de la regresión GL|G*. Período 2017-2021. Unidades: W/m².*

ID	2017				2018				2019				2020				2021			
Local	*a*	*b*	MBE	S*	*A*	*b*	MBE	S*	*a*	*b*	MBE	S*	*a*	*b*	MBE	S*	*a*	*b*	MBE	S*
1	1,118	-9,7	8	28	1,248	-15,0	23	19	1,207	-4,9	27	20	1,187	4,5	35	18	1,184	0,9	30	16
2	1,178	-6,6	19	27	1,233	-7,6	27	19	1,203	-5,2	27	21	1,181	8,2	37	19	1,157	7,7	33	20
3	1,114	-19,8	1	21	1,116	-18,0	2	21	1,149	10,7	15	20	1,064	3,7	16	24	1,055	5,3	15	19
5	1,141	-14,9	10	23	1,136	4,8	23	25	1,119	-7,4	13	18	1,069	10,5	24	20	1,068	9,2	21	20
9	1,058	6,9	17	27	1,117	0,9	21	27	1,130	-4,4	18	23	1,062	20,3	32	23	1,070	16,5	29	22
11	0,863	31,5	6	27	1,040	-12,4	-5	20	1,062	-15,5	-3	19	1,069	-3,3	11	20	1,077	2,7	16	19
13	1,156	-17,9	9	20	1,136	-7,6	15	20	1,162	-0,26	25	23	1,085	11,8	27	22	1,085	9,6	20	19
14	1,156	-12,1	14	25	1,186	-15,6	17	16	1,141	-3,8	20	18	1,119	7,8	30	20	1,124	-6,0	17	15
15	1,036	-7,3	-0,6	25	1,123	-9,5	12	19	1,113	-6,2	13	18	1,020	20,0	24	23	1,012	9,1	11	19
17	1,142	-21,0	5	20	1,121	-10,4	11	19	1,131	-11,8	12	17	1,086	5,8	23	15	1,078	-1,5	13	18
18	1,125	-20,2	24	21	1,097	-10,8	7	19	1,118	-6,6	14	19	1,121	2,0	25	18	1,080	2,9	17	19
19	1,138	-15,9	7	23	1,148	-9,1	15	20	1,148	-5,5	19	21	1,118	-0,7	20	20	1,130	-0,3	21	21
27	1,142	-6,3	17	28	1,102	5,8	22	25	1,148	2,1	26	25	1,095	24	41	21	1,094	10,4	27	24
31					1,024	-22,0	-17	15	1,039	-22,4	-13	16	1,072	-25,4	19	18	1,048	-20,7	-9	19
61	0,978	-2,0	-6	24	1,043	-1,3	6	14	1,018	-3,0	0	25								
63	1,167	-16,5	13	22	1,195	-16,1	19	20	1,158	-7,1	19	26	1,180	12,1	44	20	1,212	1,5	39	22
1025	1,181	-17,1	14	25	1,160	-11,6	16	25	1,188	-13,9	20	22	1,134	9,3	34	18	1,143	6,1	31	19
2049	1,160	-8,5	17	23	1,126	-6,7	14	17	1,154	-11,8	14	15	1,094	9,6	18	16	1,116	6,5	25	20

CONCLUSIONES

La comparación del modelo GL 1.2 con piranómetros de la red INMET en latitudes semejantes a Tucumán indica que el modelo pude comportarse de forma semejante a un Kipp & Zonen (CM6B o CMP6) para irradiancias medias diarias, con ajustes lineales de elevado coeficiente de correlación y desviaciones no superiores a 3% de la calibración relativa (sea del modelo corregido con relación a un patrón, o de los instrumentos con relación al modelo). Inclusive, permite detectar eventuales desvíos de calibración del orden de 5% en dos instrumentos de entre 10 de la región escogida. Este resultado sugiere la competencia del GL 1.2 para analizar críticamente la calibración de instrumentos de una red regional y realizar una corrección provisoria de series temporales de medición.
La comparación con datos medidos en 18 estaciones de la red EEAOC en Tucumán (irradiância media diaria G en el quinquenio 2017-2021), muestra una elevada correlación lineal entre el modelo GL 1.2 y las mediciones de la red ($\rho > 0,95$). Los valores experimentales G corregidos por regresión lineal (G*) tienen MBE* nulo y desviación estándar S* típica de 20 W/m^2 en torno de las estimaciones satelitales. Estos resultados avalan al modelo GL1.2 como una herramienta de referencia para calibraciones provisorias de datos solarimétricos de la red EEAOC, así como compleción de datos faltantes en series temporales de G*. Lógicamente, se deben aplicar análisis adicionales a las series temporales de valores experimentales, para separar desviaciones meramente estadísticas de problemas asociados a manutención o reemplazo de instrumentos.

Bien entendido, este procedimiento es provisional y puede ser reajustado por comparación posterior del GL con un piranómetro patrón en el área tucumana. La ventaja principal del método es que la calibración individual de los piranómetros de la red (30 estaciones) contra apenas uno de alta calidad, calibrado y de referencia requeriría, sin duda, un tiempo y esfuerzo mucho mayor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el aporte de la Sección Agrometeorología de la EEAOC, difundiendo datos meteorológico y solarimétricos en la URL https://agromet.eeaoc.gob.ar/, así como del grupo G-STAR de la DISSM/CGCT/INPE (e-mail gstar@inpe.br) contribuyendo a la difusión de datos del modelo GL 1.2. Series mensuales para América del Sur están disponibles (formato geotiff) en la URL http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/ → medias mensais, y series pentadales de 20 años en la página GSTAR http://pururuca.cptec.inpe.br/gstar/GSTAR_dados.html.

REFERENCIAS

Ceballos, J.C., Jesus, H.J.S., Porfirio, A.C.S., Costa, S.M.S. (2023). Estimativa de radiación solar à superficie: GL Versões 1.2 e 1.4. Configuração modular – Relatório Preliminar. Relatório GSTAR RT-001-2023. http://pururuca.cptec.inpe.br/gstar/GSTAR_publicacoes.html.

Ceballos, J. C., Bottino, M. J. y Souza, J.M. (2004). A simplified physical model for assessing solarradiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. J. Geophys. Research 109: D02211, https://doi.org./10.1029/2003JD003531.

Ceballos, J.C., Lamelas, C. M., Forciniti, J. D. y Rodrigues, M.L. (2011). Radiación Solar en la Provincia de Tucumán: Una Comparación Entre Valores Estimados por Satélite y Medidos por una Red Solarimétrica. XXXIV Reunión de ASADES 2011. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 15, 2011. Área: Radiación Solar y Clima- 71 – 78. ISSN 0329-5184. Acceso https://www.researchgate.net/project/Satellite-estimation-of-surface-radiative-fluxes; también https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDICI_d60a0f4ecc5825f35b2c6e804b94ce6d.

Ceballos, J.C., Porfirio, A.C.S, Oricchio, P.A. y Posse, G. (2022). Characterization of the annual regime of surface solar irradiance over Argentine Pampean Region using GL1.2 satellite-based data.Renewable Energy 194: 526-537. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.038.

EEAOC, Sector Agrometeorología. 2023. Página web URL http://agromet.eeaoc.gob.ar.

Forciniti J.D., Ceballos J.C., Molina M.L., Leal A.M., Soria F.J. y Soulé Gómez M. L. (2022). Comparación de Datos de Radiación Solar Global Mensual Estimados por Satélite y Generados por la Red de Estaciones Meteorológicas de la EEAOC, Tucumán – Argentina. Actas XLIV Reunión de

trabajo ASADES. Vol. 9: 177-185. http://asades.org.ar/wp-content/uploads/2023/05/ACTAS-2022.pdf.
Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007). Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, ISBN978-987-9285-36-7. Acceso en http://www.gersolar.unlu.edu.ar/?q=node/8 INMET 2023. Página web: https://portal.inmet.gov.br/
Lamelas, C.M., Forciniti, J.D. y Soulé Gómez, M.L. (2006). Provincia de Tucumán: Desarrollo e instalación de un sistema de telesupervisión y comando para estaciones meteorológicas automáticas. XI Reunión Argentina de Agrometeorología. Trabajos Presentados - Área Agrometeorología: 13 – 16.
Porfirio, A.C.S., Ceballos, J.C., Britto J.M.S. y Costa S.M.S. (2020): Evaluation of Global SolarIrradiance Estimates from GL1.2 Satellite-Based Model over Brazil Using an Extended RadiometricNetwork. Remote Sensing 12, no. 8: 1331. https://doi.org/10.3390/rs12081331.
Porfirio, A.C.S; Ceballos, J.C.; Enoré, D.; Costa, S.M.S. Validation of three satélite-based solar radiation products: Preliminary analysis over Northeast and South of Brasil. In: XX Congresso Brasileiro de Meteorologia (XX CBMET), 2018, Maceió. Acceso https://docplayer.com.br/147737732-Xx-cbmet-anais-congresso-brasileiro-de-meteorologia-27-a-30-de-novembro-de-2018-maceio-al-desafios-do-monitoramento-meteorologico.html
Sarazola, I., A. Laguarda, J.C. Ceballos, R.A. Suárez 2023. Benchmarking of modeled solar irradiation data in Uruguay at a daily time scale. Journal of IEEE Latin America Transactions, 21:1040-1048. https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/8026/2085

USING THE SATELLITE-BASED MODEL GL 1.2 ON A DAILY SCALE AS A REFERENCE FOR PROVISIONAL CALIBRATION OF THE EEAOC – TUCUMÁN NETWORK

ABSTRACT

In Tucumán, the Estación Experimental Agroindustrial 'Obispo Colombres' (EEAOC) has a network of automatic weather stations with continuous generation of solar irradiance data. In this study, the daily average irradiances of 18 stations (period 2017-2021) are compared with values obtained from the GL1.2 satellite model developed by the Division of Satellites and Environmental Sensors (DISSM/CGCT/INPE, Brazil). This model has already shown good performance in comparison with data from Kipp & Zonen CM6B and CMP6 pyranometers from the automatic network of INMET (National Institute of Meteorology, Brazil). A preliminary analysis of the quality of GL1.2 was carried on, comparing it with daily data (first semester of 2018) from the INMET network in a relatively homogeneous region of Brazil with a latitude similar to that of Tucumán. A good fit was obtained, leading to the adoption of GL1.2 as the 'reference pyranometer' for a provisional calibration of the daily solarimetric data from the EEAOC network. The results of the statistical measures used to assess the EEAOC vs. GL1.2 linear fit suggest that the satellite model can be used for the provisional calibration of the Tucumán network, with a typical dispersion (standard deviation) of 20 W/m^2.

Keywords: provisional calibration, model GL 1.2, solarimetric network.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 308-320, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN UNA ADAPTACIÓN AL SITIO DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL PARA SALTA (ARGENTINA).

Germán Salazar[1,3], Rubén Darío Ledesma[1,3], Constanza López Ruiz[1], Olga de Castro Vilela[2]
[1]Grupo de Estudio y Evaluación de la Radiación Solar (GEERS) - INENCO - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
[2]Centro de Energías Renovaveis (CER) – Universidade Federal de Pernambuco - Brasil
[3]Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta - Argentina
e-mail: german.salazar@conicet.gov.ar

RESUMEN: En este trabajo se analizan diferentes métricas comparando valores medidos de Irradiancia Solar Global contra valores estimados usando diferentes técnicas de Inteligencia Artificial, particularmente Aprendizaje Automático (Machine Learning), con el objetivo de realizar una Site Adaptation a través de la Base de Datos Satelitales CAMS-Rad para la ciudad de Salta (1200 metros sobre el nivel del mar). Se analizaron los datos con integraciones temporales de 5 minutos y 15 minutos. Se usaron dos periodos diferentes de datos medidos: un año (2014) o dos años (2014-2015) para entrenar y validar. Las técnicas de Machine Learning usadas fueron Regresión Lineal Simple y Múltiple, Quantile Mapping, Multilayer Perceptron, XGBoost y regresión Clusterwise. Todas las métricas indican una mejora sobre los estimados por CAMS-Rad, destacándose las regresiones Clusterwise.

Palabras clave: irradiancia solar global, aprendizaje automático, adaptación al sitio, Salta.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las características de distribución espaciotemporal del recurso solar resulta de interés para poder aprovecharlo de manera óptima, ya sea por medio de sistemas fotovoltaicos o de concentración (Vignola et al, 2012; Huld et al, 2012). Se sabe que el Noroeste argentino (NOA) es una de las regiones del planeta con una irradiación superior a la media mundial, pero dicha distribución no es homogénea en la región debido a su orografía (Solargis.com). Los mapas actuales de distribución de la radiación solar en el NOA no provienen de redes de medición, sino de estimaciones de Bases de Datos Satelitales (BDS) (Laspiur et al, 2013): esto es porque no existen redes radiométricas en la región que midan de manera constante y con protocolos de mantenimiento y recalibración. Se han realizado estudios que muestran que las estimaciones con modelos satelitales tienen diferencias respecto de los valores reales (Sengupta et al, 2018), lo que implica que usar valores de irradiancia solar estimada usando imágenes satelitales inducirá un error en las posteriores estimaciones que se puedan llegar a hacer usando esa información, por ejemplo, generación de energía (Viana et al, 2011).

Es posible adaptar los valores de irradiancia solar de una BDS a partir de los valores medidos si se dispone de una serie de mediciones, en un sitio especifico, durante un periodo temporal simultaneo dentro de la extensión de la BDS (Polo et al, 2016, 2020). La idea es encontrar una función que *adapte*, es decir, mejore los estimados satelitales acercándolos a los valores efectivamente medidos en tierra. Es importante mencionar que no se habla de "corrección" sino de "adaptación" ya que corregir implica que los valores finales sean iguales a los medidos. Este método se denomina habitualmente Adaptación al Sitio (AS) o Site Adaptation, en inglés. Así, encontrada dicha función, se podría aplicar la misma a todos los valores de la BDS *fuera del periodo* de simultaneidad, adaptando años de datos satelitales a partir de una muestra de datos medidos en superficie.

Se han estudiado varias metodologías y modelos para encontrar esa función siendo el Machine Learning (ML) el más utilizado (Chu et al, 2024). En este trabajo analizamos los resultados obtenidos al utilizar

técnica de ML para adaptar los valores de la BDS CAMS-Rad (SoDa-pro.com) para la ciudad de Salta (Argentina). La eficacia de cada técnica se muestra analizando las métricas de comparar los valores irradiancia solar medidos en Salta, durante el periodo 2013-2015, contra valores modelados usando técnicas de ML, siendo las mismas Regresión Lineal Simple (RLS) y Múltiple (RLM), Quantile Mapping (QM), Multilayer Perceptron (MLP), XGBoost (XGB) y regresión Clusterwise (RCws). Resulta destacable mencionar que todos los modelos utilizados en este trabajo mejoran los estimados por CAMS-Rad.

MATERIALES UTILIZADOS

Sitio de Estudio e *Instrumentos utilizados*

La ciudad de Salta es la capital de la provincia de Salta (Argentina). Las mediciones de Irradiancia Solar Global (GHI por sus siglas en inglés) se realizaron en el Campus de la Universidad Nacional de Salta La posición geográfica de la estación radiométrica del Grupo de Estudio y Evaluación de la Radiación Solar (GEERS) es latitud 24.7288° Sur, longitud 65.4095° Oeste. La altitud es de 1233 metros sobre el nivel del mar. La clasificación del clima en la ciudad de Salta es Cwb según Köppen-Geiger (Peel y Fynlayson, 2007).

El radiómetro utilizado para adquirir los datos analizados fue uno marca Eppley modelo PSP. Dado que es un piranómetro antiguo, el mismo se recalibra cada 6 meses contra un piranómetro marca Kipp & Zonen modelo CM21, cuya contante de calibración esta referenciada a instrumentos contrastados en Davos (Suiza) por la WRC.

El radiómetro PSP está conectado a un datalogger marca Campbell Scientifics modelo CR1000. La frecuencia de medición fue programada a 5 segundos, guardándose el promedio cada 1 minuto.

Base de datos satelital usada

La BDS utilizado en este trabajo es el Servicio Atmosférico Copernicus (CAMS), que integra modelos atmosféricos de aerosoles de última generación con datos de observación de la Tierra para proporcionar servicios de información que cubren la calidad del aire europeo, la composición atmosférica global, el clima, la energía solar y radiación Ultravioleta (SoDa-pro.com). El Servicio de Radiación Solar CAMS (CAMS-Rad) proporciona una parametrización rápida de la transferencia radiativa en la atmósfera. Vincula parámetros del cielo despejado, como los aerosoles, el vapor de agua y el ozono, con información sobre las nubes obtenida por satélite. Dado que la información sobre nubes de alta resolución se infiere directamente de las observaciones por satélite, las series temporales de irradiación para condiciones nubosas sólo están disponibles actualmente para el campo de visión del satélite Meteosat de Segunda Generación (MSG), que abarca aproximadamente Europa, África, el Océano Atlántico y Oriente Medio (+66° a -66° tanto en latitud como en longitud). El sitio estudiado se sitúa prácticamente en el borde oeste de la imagen del satélite, con una longitud de 65.4095°O para Salta. El modelo utilizado para la estimación de la irradiancia es Heliosat-4 (SoDa-pro.com)

Características de los datos medidos:

Los valores de GHI usados se registraron desde el 1/1/2013 al 31/6/2015, con frecuencia de 1 minuto. Se aplicaron a los datos una serie de filtros de Control de Calidad (Ecuaciones 1) diseñados para ser aplicados solo a valores de GHI (Nollas et al, 2022):

$$GHI < 1.5\ S\ Esc\ (\cos SZA)^{1.2} + 100\ W/m^2 \quad (1.1)$$

$$GHI > (6.5331 - 0.065502\ SZA + 1.8312 \times 10^{-4}\ SZA^2) / (1 + 0.01113\ SZA) \quad (1.2)$$

$$K_t < 1.4 \quad (1.3)$$

donde S es el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, Esc es la Irradiancia Solar Total (1361 W/m^2), SZA es el ángulo cenital solar y K_t es el índice de claridad, igual a GHI/I_{ext}. Del 100% de datos

diurnos utilizados, 95.45% pararon el primer filtro, 95.44% pasaron el filtro 2 y 3. En este trabajo solo se analizaron datos para SZA>80°, lo que representó el 82.86% de los datos.

Se usaron dos tipos de integración temporal para comparar los valores de GHI medidos y modelados: 5 minutos y 15 minutos. La integración de 5 minutos se hizo para explorar las altas frecuencias en las técnicas de ML usadas. La integración de 15 minutos se hizo para establecer una base temporal inferior a la de las imágenes de satélite en su formato nativo. Dado que este trabajo pretende comparar las prestaciones de diferentes ML técnicos para realizar AS, esta frecuencia parece óptima para esta tarea.

TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING USADAS

El ML aborda el problema de desarrollar algoritmos capaces de mejorarse a sí mismos con la experiencia (Mitchell, 1997). Los algoritmos de ML se dividen en dos categorías principales: Aprendizaje Supervisado (ApSu), en el que el algoritmo crea una función que relaciona las entradas con los resultados esperados, y Aprendizaje No Supervisado (ApNSu), en el que el algoritmo modela un conjunto de entradas sin disponer de ejemplos etiquetados. Los algoritmos de ApSu se dividen en *Clasificación* y *Regresión*. La *Clasificación* es una técnica utilizada para predecir la pertenencia a un grupo de instancias de datos (Faouzi y Colliot, 2024). Por otro lado, el ApNSu incluye algoritmos de *Agrupación* (clustering) y *Reducción Dimensional*, del tipo *Análisis de Componentes Principales* (ACP). En el estudio del AS, así como en otros procesos de ML relacionado a la radiación solar, se han descripto y utilizado muchas técnicas (Narvaez et al, 2021; Datha et al, 2022). En este trabajo se han utilizado técnicas de ML para hacer correlaciones, es decir, encontrar una función que relacione la variable regresora (o variables regresoras) con la variable objetivo, minimizando el error. Las más simples son las regresiones lineales. La que sigue en simpleza es el Mapa de Cuantiles (Quantile Mapping en inglés), la que utiliza una función de Distribución Acumulativa para corregir tendencias estadísticas en la distribución de los valores de irradiancia solar entre las series medidas y estimadas.

El perceptron multicapa (multilayer perceptrón, en inglés, MLP) es quizás la estructura más utilizada para el aprendizaje automático, por estar directamente relacionada con el concepto de Redes Neuronales Artificiales: un MLP es una Red Neurona Artificial. Otra técnica usada habitualmente en el análisis de series de irradiancia solar es el XGBoost (Li et al, 2022; Obiora et al, 2021; Zhang et al , 2023; Huang et al, 2025) que es un algoritmo de la familia de los Árboles de Decisión . Por último, se utiliza una técnica que no es habitual de usar en el análisis de series temporales de radiación solar, como lo es el Clusterwise: dicha técnica se encuentra bajo análisis de varios grupos de investigación de la región (Rodrigues et al, 2024; Ledesma et al, 2024)

Regresión Lineal Simple (RLS): esta función es la más simple posible ya que solo tiene un solo regresor.

En la ecuación 2 se muestra la forma de la función.

$$\mathrm{GHI_{adap}} = \mathrm{a.GHI_{BDS}} + \mathrm{b} \tag{2}$$

donde los coeficientes a y b se calculan a través de $\mathrm{GHI_{med}} = \mathrm{a.GHI_{BDS}} + \mathrm{b}$.

Regresión Lineal Múltiple (RLM): es una función lineal que utiliza más de un regresor. En la ecuación 3 se describe su forma general.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \cdots + \beta_j x_{\mathrm{i,j}} + \mathrm{e}_i \tag{3}$$

En resumen, se trata de ajustar los datos a un modelo bajo los siguientes supuestos:

- Los residuos e_i son normales de media 0 y varianza común desconocida σ; además, estos residuos son independientes.
- El número de variables explicativas (j) es inferior al número de observaciones (i); esta hipótesis se conoce como rango completo.
- No existen relaciones lineales exactas entre las variables explicativas.

El estimador del vector paramétrico **β** es

$$\beta=(X^T X)^{-1} X^T y \tag{4}$$

donde las matrices ***y*** e ***X*** son:

$$y=\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{i-1} \\ y_i \end{pmatrix} \qquad \boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,j} \\ 1 & x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{i,1} & x_{i,2} & \dots & x_{i,j} \end{pmatrix}$$

Quantile Mapping (QM): El mapeo de cuantil (QM) es una técnica sencilla utilizada en modelado climático y meteorología para corregir la distribución de un parámetro modelado comparándolo con la distribución empírica de las observaciones (Panofsky and Brier, 1968). La metodología consiste en transformar los datos al dominio de probabilidad (cuantiles) e invertir la transformación utilizando la función de distribución acumulativa (CDF) como operador.

$$y_c = \mathrm{CDF}_0^{-1}[\mathrm{CDF}_m(x_m)] \tag{5}$$

XGBoost (XGB): El Extreme Gradient Boosting (Chen y Guestrin, 2016) es una técnica avanzada de Machine Learning que ha ganado gran popularidad debido a su eficiencia y precisión. En el contexto de la regresión, XGBoost se utiliza para predecir valores continuos, como por ejemplo temperaturas. Utiliza un enfoque iterativo basado en árboles de decisión y un método de optimización llamado boosting para mejorar continuamente la precisión de sus predicciones. El objetivo principal de la regresión con XGBoost es minimizar el error de predicción, construyendo un modelo fuerte a partir de la combinación de múltiples modelos débiles (árboles de decisión) de manera iterativa.

Para entender cómo funciona XGBoost, es esencial conocer algunos conceptos básicos: los árboles de decisión, el boosting y la función objetivo. Los árboles de decisión dividen los datos en segmentos basados en decisiones sobre características específicas. El boosting es una técnica de ensemble learning donde varios modelos se entrenan secuencialmente, cada uno intentando corregir los errores de los anteriores. La función objetivo de XGBoost combina una función de pérdida, que mide el error del modelo, con un término de regularización, que penaliza la complejidad del modelo. El proceso de XGBoost incluye varias etapas: inicialización con una predicción simple, construcción de árboles para predecir errores residuales, ajuste de predicciones, construcción de árboles sucesivos y optimización mediante regularización.

Multilayer Perceptron (MLP): El perceptrón multicapa (MLP)(Rumelhart et at, 1986) es una clase de red neuronal artificial (RNA) de tipo feedforward, es decir que la información fluye en una sola dirección: desde las entradas hacia las salidas a través de una serie de capas intermedias llamadas capas ocultas. Generalmente, cuando se hace referencia a una RNA, se trata de un MLP. Su estructura básica consta de tres capas de nodos: una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Los nodos de las capas oculta y de salida son neuronas artificiales que utilizan una función de activación no lineal. El MLP utiliza una técnica de aprendizaje supervisado para el proceso de entrenamiento. El algoritmo de aprendizaje más utilizado en los MLP es la retro propagación combinada con un algoritmo de optimización. Este algoritmo permite al MLP minimizar el error en sus salidas en comparación con los resultados esperados, normalmente medidos por una función, a lo largo de múltiples iteraciones de entrenamiento o épocas.

Regresión Clusterwise (RCws): Se habla de regresión por conglomerados o regresión Clusterwise (Hastie et al, 2009) cuando se concatena un proceso de clustreing seguido de un proceso de regresión aplicado a cada grupo, con el objetivo de obtener mejores predicciones al reconocer que diferentes grupos dentro de los datos pueden tener relaciones distintas entre las variables explicativas y la variable de respuesta. En este caso se realizó primero un proceso de agrupación (clustering) y luego para la regresión se usó MLR. Este método ha mostrado ser de interés para el proceso de AS (Miranda et al,

2024) y ha generado una investigación (Ledesma et al, 2024). El método mirandaMLR se inicia realizando un proceso de clustering para asignar una de cinco clases a cada instante medido en el conjunto de entrenamiento, para lo que utiliza tres parámetros, VI (índice de variablidad), Kc (indice de cielo claro) y KDE (estimación de la densidad del kernel), este último es una forma no paramétrica para estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria. En este caso el clustering se realiza mediante el algoritmo Kmeans, y utiliza centroides iniciales definidos por el autor (Miranda). En cambio, en el método randomMLR se realiza también un proceso de clustering sobre el conjunto de entrenamiento, pero utilizando dos parámetros, VI y Kc, aplicando el algoritmo Kmeans con una inicialización de centroides aleatorios. Es necesario destacar que para calcular KDE es necesario determinar un ancho de banda óptimo, aunque en la propuesta de mirandaMLR no es especifica el valor escogido, en este trabajo se utilizó 'la regla de oro' de (Silverman, 1986) para determinar el valor óptimo, indicando un valor de 0,1.

Una vez que los datos del conjunto fueron etiquetados con una clase, a partir del paso anterior, en el modelo MirandaMLR se realiza una clasificación, utilizando el algoritmo Random Forest, con el objetivo de poder inferir una clase (etiqueta) a partir de las variables regresoras modeladas, nótese que para definir estas clases se utilizaron variables derivadas la medida en el paso anterior (indice de variabilidad VI, índice de cielo claro Kc, Kernel Density Estimate KDE) (Miranda et al, 2024). Esta clasificación es aplicada y evaluada sobre el conjunto de validación. En el método RandomMLR esta clasificación se realiza utilizando el mismo algoritmo y las mismas variables, pero en este caso el algoritmo de clasificación se entrena en el conjunto de entrenamiento, pero se evalúa en el conjunto de prueba, esto implica una estrategia más rigurosa en cuanto al análisis en la obtención de un modelo óptimo para la clasificación, teniendo en cuenta en cómo se han definido los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba.

Como paso final, en el método MirandaMLR se entrena un modelo de regresión lineal múltiple por cada una de las clases obtenidas en el conjunto de validación, luego se evalúa el resultado obtenido en el conjunto de prueba. En cambio, en el método RandomMLR cada modelo de regresión es entrenado a partir de los datos del conjunto de entrenamiento, utilizando el conjunto de validación nada más que para el evaluar el rendimiento de los distintos hiper-parámetros de los modelos, luego los modelos son evaluados en el conjunto de prueba.

Metodología de Entrenamiento, Validación y Prueba

Los procesos de ML requieren de un entrenamiento, que es donde "aprenden" a corregir la función que describirá la relación entre la serie de datos medidos y los estimados. Ese entrenamiento en realidad se compone de dos procesos: entrenamiento y validación, el que se aplica dentro de un mismo periodo temporal, separándose cierta cantidad de datos para entrenar y el restante para validar. Durante el entrenamiento, se trata de determinar la forma de la función/ecuación que correlaciona los valores medidos y estimados (emparejados) dentro del periodo de simultaneidad. La veracidad de esa función (entendiendo por veracidad al error que genera entre los valores medidos y los que estima) se prueba contra los datos de validación. Por lo general, se destinan 80% de los datos para entrenar y 20% para validar. Es recomendable que la asignación de esos datos (como dato de entrenamiento o dato de validación) sea aleatoria, para evitar la inducción de sesgos estacionales en las evaluaciones.

Sin embargo, esto no evita lo que se denomina overfitting, es decir, la sobre especialización de una función de correlación sobre una serie de datos. Resulta sorprendente que el desempeño de las técnicas de ML se mida generalmente con las métricas hechas sobre los datos de entrenamiento, de validación o de la concatenación de estos (Fig.1-b). Estas métricas mostrarán valores que indicarán una alta correlación entre los valores medidos y los adaptados, pero la real medida de esa correlación solo podrá ser percibida al medirse fuera del periodo de simultaneidad, al ser aplicada sobre los valores que no han sido usados para entrenar y validar (Fig.1-a). Este procedimiento se denomina de prueba (o Test) y las métricas sobre estos datos indicaran si el overfitting del periodo de simultaneidad afecta la implementación de la función sobre la extensión completa de los datos estimados por la BDS. Esta información será presentada para cada técnica utilizada en este artículo. Se usaron los datos de un año (2014) y de dos años (2014 y 2015) para entrenar y validar. Para el caso de un año/dos años, el 80% de

los datos de ese periodo se usaron para entrenar y el restante 20% de ese mismo periodo se usaron para validar. El periodo de prueba o test fue realizado con los datos del año 2013.

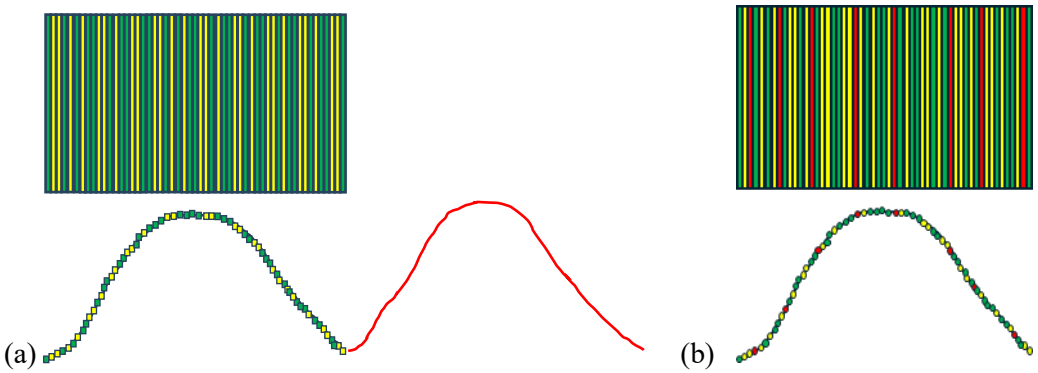


Figura 1. Comparación del procedimiento de Entrenamiento, Validación y Prueba realizado de dos maneras distintas. En (a) se usan los valores del periodo de simultaneidad para entrenar (puntos verdes) y validar (puntos amarillos), pero la prueba se hace fuera de ese periodo (puntos rojos). En (b) se usa el periodo de simultaneidad para realizar las tres operaciones.

RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de la aplicación de los diferentes modelos a los datos de GHI medidos en Salta, en frecuencia de 5 minutos y de 15 minutos. Las métricas (Tabla 1 y 2) utilizadas para comparar los resultados fueron el error cuadrático medio (RMSE), el error de desvío medio (MBE) y el error absoluto de desvío medio (MABE)

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{GHI}_{\mathrm{med,i}}-\mathrm{GHI}_{\mathrm{mod,i}}\right)^{2}/n} \tag{6}$$

$$\mathrm{MBE}=\sum_{i=1}^{n}\left(\mathrm{GHI}_{\mathrm{med,i}}-\mathrm{GHI}_{\mathrm{mod,i}}\right)/n \tag{7}$$

$$\mathrm{MABE}=\sum_{i=1}^{n}\left|\mathrm{GHI}_{\mathrm{med,i}}-\mathrm{GHI}_{\mathrm{mod,i}}\right|/n \tag{8}$$

donde el subíndice *med* indica medido y el subíndice *mod* indica modelado. Para generar los valores porcentuales (rRMSE, rMBE y rMABE) se deben dividir por el promedio de los valores medidos.

Tabla 1. Métricas de la comparación de los valores medidos vs los adaptados por las distintas técnicas usadas, para una frecuencia de datos de 5 minutos. Entrenamiento y Validación se realizan sobre el mismo periodo (1 año = 2014, 2 años = 2014+2015), solo que el primero toma aleatoriamente el 80% de los datos mezclados y el segundo el 20% restante. El testeo o Prueba se realiza sobre todos los datos de 2013.

	5min					
	CAMS					
	Entrenamiento	Validación	Testeo	Entrenamiento	Validación	Testeo
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	37.9	38.3	37.5	37.9	37.2	37.5
rMBE(%)	5	3.64	5.5	4.9	3.3	5.5
rMABE(%)	23.8	23.9	22.9	23.8	23.9	22.9
	SLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	35.4	36	35.4	35.4	35.2	35.4
rMBE(%)	1.7	-1	0.11	-2.1	-0.9	0.2
rMABE(%)	23.5	23.5	23.2	23.5	23.3	23.2
	MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	34.4	35.3	35.4	34.5	35.4	35.5
rMBE(%)	4.9	-0.8	-1.5	-4.2	-3.5	-1.45
rMABE(%)	22.7	22.9	23.7	22.7	23.6	23.7
	QM					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	36.7	37.3	36.9	36.7	36.6	36.9
rMBE(%)	0	1.38	-2	0	2.7	-2.1
rMABE(%)	22.4	22.6	22.8	22.4	23.1	22.8
	MLP					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	33.7	34.5	35	34.5	35.3	35.8
rMBE(%)	-0.9	-1.7	-3.4	-3	-3	-3.5
rMABE(%)	22.3	22.3	23.8	24.5	23.3	24.5
	XGBoost					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	33.5	33.5	35.6	34.9	34.9	35.5
rMBE(%)	-0.9	-0.9	-2.4	-4	-4	-2.1
rMABE(%)	21.7	21.7	23.8	23.6	23.6	23.7
	Miranda MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	24.67	26.6	38.2	24.8	25	38.2
rMBE(%)	-0.1	-1.2	0	-0.2	-1	0
rMABE(%)	14.8	15.7	21.8	14.9	15	21.8
	Random MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	34.9	34.1	34.1	34.1	34.2	34.9
rMBE(%)	1.5	1.7	1.7	1.6	-0.5	1.5
rMABE(%)	22.6	22	22	22	22.3	22.6

El calcular los valores de RMSE, MBE y MABE para evaluar los procedimientos de Entrenamiento, Validación y Prueba (o Test) resulta de utilidad ya que permite apreciar las performances de los modelos en estas etapas.

Lo primero que se debe observar es que los valores de RMSE entre Entrenamiento y Validación deben ser muy similares: esto es porque los procedimientos utilizan el valor de la validación para detener el proceso de entrenamiento, pero como se realizan en dos sets diferentes de datos, no son exactamente iguales (Figura 2 y 3).

La métrica del periodo de Prueba es quizás la más importante porque la misma ha sido realizada en un periodo fuera del Entrenamiento y Validación. Es decir, probar fuera del periodo de entrenamiento es la prueba definitiva del correcto funcionamiento de un modelo. El modelo que se elige es precisamente el que presenta la mejor performance en los datos de Testeo o Prueba.

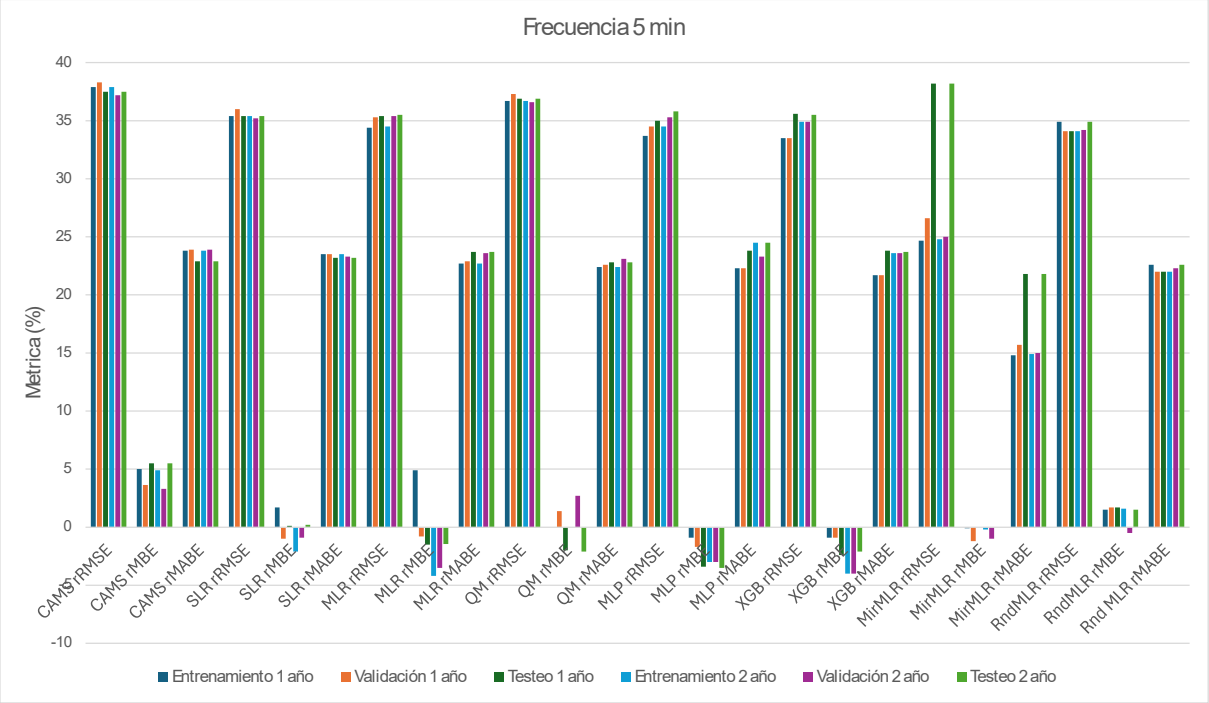


Figura 2. Valores de rRMSE, rMBE y rMABE para la frecuencia de datos de 5 minutos para Salta, de acuerdo con la Tabla 1

Un caso interesante es el que se observa para el modelo Miranda MLR. Para los periodos de Entrenamiento y Validación este modelo da métricas (para RMSE) que son menores a los de los demás modelos: para el caso de 5 minutos el rRMSE de entrenamiento y validación es de 24.67% y 26.6% respectivamente. Estos valores son aproximadamente 10% más bajos que los otros modelos para los mismos procedimientos. Sin embargo, para la Prueba, el rRMSE (38.2%) es superior al de los demás modelos. Esto es un claro indicio de que el modelo entrenado y validado en 2014 (o 2014-2015) no funciona tan bien en 2013. Esto no ocurre para Random MLR, el que mantiene sus métricas similares en todas sus etapas de entrenamiento, validación y prueba.

Las demás técnicas ofrecen resultados similares, siendo el mejor el mostrado por Random MLR. Puede decirse que el peor de los métodos es el de QM. Quizás la mejor cualidad de esta última técnica mencionada es que corrige el bias de los datos entre los valores medidos y los adaptados, lo que se aprecia en su rMBE de entrenamiento. Pero esto solo ocurre en ese procedimiento: en la Validación y la Prueba, esta característica no se aprecia más.

Tabla 2. Métricas de la comparación de los valores medidos vs los adaptados por las distintas técnicas usadas, para una frecuencia de datos de 15 minutos. Entrenamiento y Validación se realizan sobre el mismo periodo (1 año = 2014, 2 años = 2014+2015), solo que el primera se toma de manera aleatoria el 80% de los datos mezclados y el segundo el 20% restante de esos datos. El testeo o Prueba se realiza sobre todos los datos de 2013

	15 min					
	CAMS					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
	Entrenamiento	Validación	Testeo	Entrenamiento	Validación	Testeo
rRMSE(%)	37.49	38.1	35.7	36.2	35.6	35.7
rMBE(%)	5.4	7	5.4	3.8	3.4	5.4
rMABE(%)	23.66	23.8	21.9	23.5	23.3	21.9
	SLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	34.6	34.8	35.4	33.9	33.3	35.3
rMBE(%)	-4.1	1.6	-0.4	9.4	-0.5	0.5
rMABE(%)	23.2	23.3	23.4	22.5	22.1	23
	MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	33.4	33.8	33.8	33.5	33.1	33.2
rMBE(%)	1	1.2	-2.6	3.2	-0.5	1.2
rMABE(%)	22.4	22.6	23.1	22.1	21.8	21.6
	MQ					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	35.7	36.3	34.6	34.9	34.4	34.8
rMBE(%)	0	2.9	-2.6	0	-1.4	-5.2
rMABE(%)	21.9	22	21.7	21.7	21.9	22.7
	MLP					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	33.2	33.8	33.7	33.5	33	32.9
rMBE(%)	1	2.2	-1.6	-2.3	-2.7	-1.4
rMABE(%)	21.9	22.3	22.8	22.3	21.9	21.8
	XGBoost					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	30.9	32.4	34.4	32.2	31.5	33.2
rMBE(%)	0	1.39	-4.5	0	-0.5	1
rMABE(%)	20.8	21.9	23.9	21.2	20.6	21.7
	Rodrigues MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	21.5	22.1	36.5	21.6	21.1	36.5
rMBE(%)	0.5	1.6	-0.05	-0.2	0	0
rMABE(%)	13.2	13.4	21.1	13	13	21.1
	Random MLR					
	1 año	1 año	1 año	2 año	2 año	2 año
rRMSE(%)	33.1	33.5	33.1	32.8	32.3	32.9
rMBE(%)	2.1	3.9	2.1	0.1	-0.4	1.5
rMABE(%)	21.4	21.6	21.4	21.5	21.1	21.5

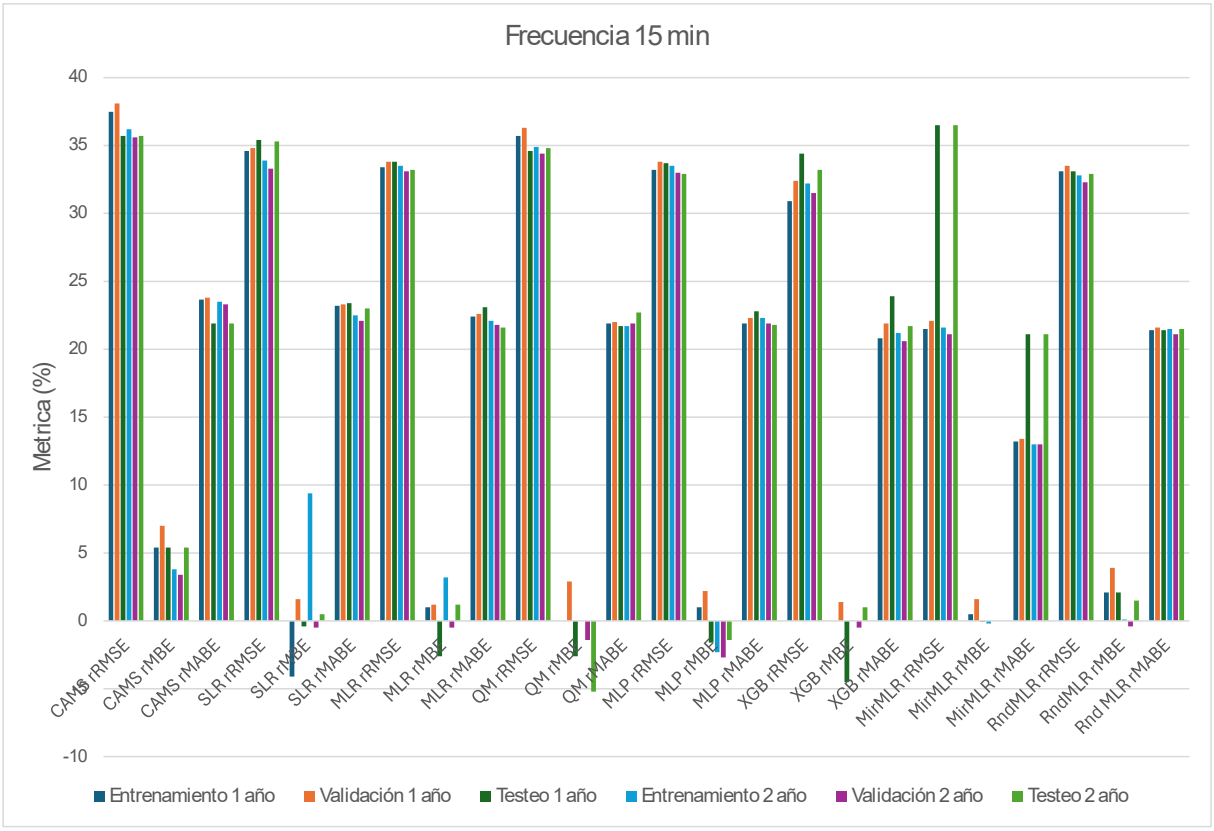


Figura 3. Valores de rRMSE, rMBE y rMABE para la frecuencia de datos de 15 minutos para Salta, de acuerdo con la Tabla 2.

DISCUSIÓN

En este análisis se han detectado varias situaciones para tener en cuenta, las que enumeraremos a continuación:

i) **Overfitting:** el overfitting es un fenómeno que ocurra al entrenar un modelo con un cierto set especifico de datos. Ocurre que el modelo/función resultante se ha especializado en resolver la relación entre los regresores y los valores medidos de ese set de datos, siendo altamente probable que al aplicar ese modelo/función a otro set de datos diferente al set con el que se entrenó, los resultados tengan un error mayor al calculado dentro del periodo de entrenamiento. Además, es común que como salida del entrenamiento se brinden muchos posibles modelos/funciones; y es común que se elija como modelo/función final al que ofrece el menor error. Sin embargo, debe tenerse muy claro que esto no asegura el correcto desempeño de este fuera del periodo de simultaneidad. En este trabajo las configuraciones asociadas a los hiperparámetros de los modelos XGBoost y MLP fueron determinadas a partir de una optimización realizada mediante la técnica de búsqueda en rejilla (grid search), donde se buscaron los modelos que brinden el menor RMSE en el conjunto de pruebas, esto fue realizado mediante la librería scikit-learn de Python.

Puede notarse que todos los modelos mostrados no indican overfitting, salvo por MirandaMLR, que en su Entrenamiento y Validación muestra métricas muy inferiores a los demás modelos. Sin embargo, en el Prueba las métricas se disparan superando el desempeño de CAMS. Eso no sucede en Random MLR, indicando que sus estimaciones fuera de la región de simultaneidad son mejores, es decir, con un error menor y con mayor estabilidad.

ii) **Calidad de la BDS y de los valores medidos**: durante el proceso de aprendizaje el sistema busca correlacionar valores simultáneos de la base de datos satelital con los datos medios. Si la base de datos satelital tiene período del día o rango de ángulo cenital que presentan

errores y no correlacionan con los valores medidos (más aún si estos errores son aleatorios) el proceso de aprendizaje generará un sistema que se "equivocará" mucho. Lo mismo aplica para los valores medidos lo que deben ser de calidad y no tener errores. Este es un problema presente para CAMS-Rad para ángulos cenitales altos (> 60°) cerca del atardecer: este problema puede deberse al ángulo del satélite respecto de la posición de la ciudad de Salta. Sin embargo, este problema no es sistemático.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizan los resultados de realizar un proceso de Adaptación al Sitio usando datos medidos de Irradiancia Solar Global en la ciudad de Salta (Argentina) contra valores estimados por la Bases de Datos Satelital CAMS-Rad. Se han utilizado diferentes técnicas de Aprendizaje Automático como Regresión Lineal Simple y Múltiple, Quantile Mapping, Multilayer Perceptron, XGBoost y regresión Clusterwise. Se usaron dos integraciones temporales de 5 y 15 minutos para los datos de Entrenamiento, Validación y Prueba. Los valores de entrenamiento y Validación abarcaron un año (2014) y dos años (2014-2015), mientras que los datos de Prueba se realizaron usando un año (2013). Los resultados muestran que todas las técnicas mejoran los estimados por CAMS-Rad. Solo el modelo Miranda MLR muestra efectos de overfitting en su etapa de Prueba. El modelo Random MLR es el que ha mostrado los mejores resultados en la etapa de Prueba, indicando una mejora de entre 2.8% y 3.4% respecto de los estimados por CAMS. Los demás modelos analizados tienen mejoras de entre 2.5% a 0.6%, sin manifestar overfitting. Esto es importante para que los modelos entrenados puedan ser usados fuera de la región de simultaneidad. Solo QM ha mostrado realizar una corrección de bias de los datos analizados, con un rMBE igual a 0. Estos resultados indican que es posible realizar una Adaptación al Sitio de manera eficiente para los datos de irradiancia solar en la ciudad de Salta. Estos procedimientos serán replicados en otros sitios de la provincia de Salta, en la búsqueda de la confección de un Mapa de Radiación Solar con altísimo detalle en sus valores reales de ocurrencia.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado con el Proyecto "A" Nº2751/0 del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (Argentina).

REFERENCIAS

Vignola F, Grover C, Lemon N, McMahan A. Building a bankable solar radiation dataset. Sol Energy 2012; 86:2218–29. https://doi.org/10.1016/j. solener.2012.05.013.

Huld T, Müller R, Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Sol Energy 2012;86(6):1803–15. https://doi. org/10.1016/j.solener.2012.03.006

Laspiur MR, Salazar GA, Zerpa J, Watkins M. TRAZADO DE MAPAS MEDIOS ANUALES DE ENERGÍA SOLAR GLOBAL, DIRECTA, DIFUSA Y TILT, USANDO LA BASE DE DATOS DE SWERA. CASO DE ESTUDIO: PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY. Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 1, pp. 08.157-08.162, 2013. ISBN 978-987-29873-0-5

Sengupta M, Xie Y, Lopez A, Habte A, Maclaurin G, Shelby J. The national solar radiation data base (NSRDB). Renew Sustain Energy Rev 2018; 89:51–60. https:// doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003.

Viana TS, Rüther R, Martins FR, Pereira EB. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. Sol Energy 2011; 85:486–95. https://doi.org/10.1016/j. solener.2010.12.015.

Polo J, Wilbert S, Ruiz-Arias JA, Meyer R, Gueymard C, Súri M, et al. Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets. Sol Energy 2016; 132:25–37. https://doi.org/10.1016/j. solener.2016.03.001

Polo, J.; Fernández-Peruncheña, C.; Salamalikis, V.; Mazorra-Aguiar, L.; Turpin, M.; Martín-Pomares, L.; Kazantzidis A.; Blanc, P.; Remund, J.; Benchmarking on improvement and site-adaptation techniques for modeled solar radiation datasets, Solar Energy, Volume 201, 2020, Pages 469-479, ISSN 0038-092X.

Chu Y, Wang Y, Yang D, Chen S, Li M. A review of distributed solar forecasting with remote sensing and deep learning. Renewable and Sustainable Energy Reviews 198,2024, 114391, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114391

https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service

https://www.soda-pro.com/help/cams-services/introduction

Peel MC, Finlayson BLMT. Updated world map of the Koppen-Geiger € climate classification. Hydrol Earth Syst Sci 2007:1633–44

Nollas FM, Salazar GA, Gueymard CA, Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance, Renewable Energy (2022), doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.056.

Mitchell TM. Machine Learning (1997) ISBN: 0070428077

Faouzi J, Colliot O. Classic machine learning algorithms. Machine Learning for Brain Disorders, Springer, In press. hal-03830094v1

Narvalez, G.; Giraldo, L. F.; Bressan, M. Pantoja, A.; Machine learning for site-adaptation and solar radiation forecasting, Renewable Energy, Volume 167, 2021, Pages 333-342, ISSN ISSN 0960-1481, https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.089.

Dhata, E.F.; Kim, C.K.; Kim, H.-G.; Kim, B.; Oh, M. Site-Adaptation for Correcting Satellite-Derived Solar Irradiance: Performance Comparison between Various Regressive and Distribution Mapping Techniques for Application in Daejeon, South Korea. Energies 2022, 15, 9010. https://doi.org/10.3390/en15239010

Miranda DR, Vilela OC, Salazar GA, Alonso-Suárez R, Costa ACA, Costa RSS, Ing Ren T. A Novel Methodology for Site Adaptation of Solar Radiation Using Supervised and Non-Supervised Procedures. 2024. Pre-print:https://ssrn.com/abstract=4804417, http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4804417

Ledesma, Ruben and Salazar, Germán Ariel and Vilela, Olga de Castro and Lopez Ruíz, Constanza, Evaluation of Data Splitting Strategies for Improving Satellite-Derived Solar Irradiance Time Series. 2024. Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=4944326 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4944326

Huang, Liexing and Kang, Junfeng and Wan, Mengxue and Fang, Lei and Zhang, Chunyan and Zeng, Zhaoliang, Solar Radiation Prediction Using Different Machine Learning Algorithms and Implications for Extreme Climate Events, Frontiers in Earth Science9, 2021, DOI 10.3389/feart.2021.596860 ISSN 2296-6463.

Xianglong Li, Longfei Ma, Ping Chen, Hui Xu, Qijing Xing, Jiahui Yan, Siyue Lu, Haohao Fan, Lei Yang, Yongqiang Cheng, Probabilistic solar irradiance forecasting based on XGBoost, Energy Reports,

Volume 8, Supplement 5, 2022, Pages 1087-1095, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.251.

Chibuzor N Obiora, Ahmed Ali, Ali N Hasan. Implementing Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Algorithm in Predicting Solar Irradiance. 2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica. IEEE

Chunxiao Zhang, Yingbo Zhang, Jihong Pu, Zhengguang Liu, Zhanwei Wang, Lin Wang, An hourly solar radiation prediction model using eXtreme gradient boosting algorithm with the effect of fog-haze, Energy and Built Environment, Volume 6, Issue 1, 2025, Pages 18-26, ISSN 2666-1233

Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer.

Panofsky, H.A. and Brier, G.W. (1968) Some Applications of Statistics to Meteorology. Earth and Mineral Sciences Continuing Education, College of Earth and Mineral Sciences.

Tianqi Chen and Carlos Guestrin. 2016. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Silverman, B.W. (1986). Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Chapman & Hall/CRC London

PERFORMANCE ANALYSIS OF DIFFERENT MACHINE LEARNING TECHNIQUES IN A GLOBAL SOLAR IRRADIANCE SITE ADAPTATION FOR SALTA (ARGENTINA)

ABSTRACT: In this work, different metrics are analyzed comparing measured values of Global Solar Irradiance against estimated values using different Artificial Intelligence techniques, particularly Machine Learning, to perform a Site Adaptation through the CAMS-Rad Satellite Database for the city of Salta (1200 meters above sea level). The data were analyzed with temporal integrations of 5 minutes and 15 minutes. Two periods of measured data were used: one year (2014) or two years (2014-2015) for training and validation. Machine Learning techniques were Simple and Multiple Linear Regression, Quantile Mapping, Multilayer Perceptron, XGBoost and Clusterwise regression. All metrics indicate an improvement over CAMS-Rad estimates, with Clusterwise regressions standing out.

Keywords: global solar irradiance, machine learning, site adaptation, Salta.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 321-331, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

EVALUACIÓN DEL MODELO REST2 DE CIELO CLARO PARA LA IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL EN LA RED SAVER-NET DE ARGENTINA

Anabela Lusi[1,2], Facundo Orte[1,2], Agustín Laguarda[3], Rodrigo Alonso-Suárez[4], Juan Pallotta[1], Raúl D'Elia[2], Elian Wolfram[5]

[1]Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (DEILAP), UNIDEF (CITEDEF-CONICET), IRL-IFAECI-CNRS-3351, Villa Martelli (B1603), Buenos Aires, Argentina.
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB) CABA, Argentina
[3]Laboratorio de Energía Solar, Facultad de Ingeniería, Udelar, Montevideo, Uruguay
[4]Laboratorio de Energía Solar, CENUR Litoral Norte, Udelar, Salto, Uruguay
[5]Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Av. Dorrego 4019 (C1425GBE), CABA, Argentina
e-mail: anabelalusi@gmail.com

RESUMEN: Dada la utilidad de los modelos de cielo claro para estimar la Irradiancia Global Horizontal (GHI), resulta pertinente evaluar su desempeño frente a mediciones de superficie de calidad controlada. En este trabajo se presenta la evaluación del modelo REST2 ("Reference Evaluation of Solar Transmittance", dos bandas), un modelo de alto rendimiento basado en un esquema de dos bandas que utiliza diversos parámetros atmosféricos para la caracterización de la atmósfera. El resultado del modelo se evaluó utilizando datos minutales de GHI de los sitios de Pilar, Villa Martelli, Comodoro Rivadavia y Río Gallegos de la red argentina de radiación solar Saver-Net, durante los años 2019 y 2020. Los resultados de la comparación indican una muy buena correlación de los datos, con coeficientes de Pearson entre 0,998 y 0,999 para todas las estaciones. Además, se observa que, con las variables de entrada consideradas, el modelo REST2 presenta una leve tendencia a subestimar las mediciones de GHI, revelando sesgos relativos (rMBD) negativos en todos los sitios. Los errores cuadráticos medios porcentuales (rRMSD) fueron de 2,9% en Pilar, 3,5% en Villa Martelli, 3,2% en Comodoro Rivadavia y 4,0% en Río Gallegos. Se observó que las métricas de rendimiento encontradas en este estudio son consistentes con los valores reportados en la región.

Palabras clave: GHI, REST2, modelado y cielo claro.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de cielo claro estiman la irradiancia solar (en W/m²) que llega a la superficie terrestre en ausencia de nubosidad. Estas estimaciones son necesarias en muchas aplicaciones. En el ámbito de la energía solar, resultan esencialmente útiles en el diseño y la simulación de sistemas, en el control de calidad de las series de medidas y en la evaluación de la precisión de los instrumentos de medición. Además, estos modelos son fundamentales para la estimación basada en satélites de la irradiancia solar de todo cielo, ya que constituyen la base de muchos modelos físicos e híbridos.

Las estimaciones pueden ser de la Irradiancia Normal Directa (DNI o G_{bc}), de la Irradiancia Horizontal Difusa (DHI o G_{dhc}) o de la Irradiancia Global Horizontal (GHI o G_{hc}). El subíndice "c" denota que estas estimaciones corresponden a condiciones de cielo claro. Otra forma de generar la GHI_c es mediante la agregación de las estimaciones G_{bc} y G_{dhc} en la ecuación de clausura (Ec. 1):

$$G_{hc} = G_{bhc} + G_{dhc} = G_{bc} \cos(\theta z) + G_{dhc} \quad (1)$$

donde:

θz es el ángulo solar cenital,

$G_{bhc} = G_{bc} \cos(\theta z)$: es la proyección de la irradiancia directa en incidencia normal sobre el plano horizontal.

Los enfoques que utilizan los diferentes modelos varían ampliamente, desde considerar únicamente una variable de entrada para caracterizar el estado de la atmósfera sin nubes, hasta requerir varias. Muchos de estos modelos se ajustan localmente, otros se basan en coeficientes arbitrarios, y por lo tanto pueden tener variaciones significativas en su rendimiento para diferentes ubicaciones geográficas. Aunque estos modelos suelen producir resultados de banda ancha, deben ser capaces de tener en cuenta la dispersión, la reflexión y la absorción que se producen dentro de determinadas bandas espectrales, debido a componentes atmosféricos como el vapor de agua, el ozono y aerosoles (Engerer y Mills, 2015).

Los modelos más simples son los que se basan únicamente en cálculos geométricos. La atenuación de la irradiancia normal extraterrestre que incide en la atmósfera es una función del ángulo cenital; a medida que este ángulo aumenta, también lo hace la masa de aire que atraviesa, resultando en una mayor interacción entre la radiación solar y la atmósfera. Estos modelos, que son esencialmente correlaciones empíricas basadas en mediciones de la ubicación de un sitio y parámetros astronómicos (Stein et al., 2012) comprenden el de Dneshyar, Paltridge y Proctor (Daneshyar, 1978), Kasten y Czeplak (Kasten y Czeplak, 1980), Haurwitz (Haurwitz, 1945), Berger y Duffie (Berger, 1979), y Robledo y Soler (Robledo y Soler, 2000), entre otros.

Otros modelos incluyen, además del ángulo cenital, algunos parámetros básicos del estado de la atmósfera como la presión, la temperatura, la humedad relativa, el contenido de aerosoles y la dispersión de Rayleigh. Por ejemplo, el modelo de Ineichen y Pérez (Ineichen y Perez, 2002) utiliza la masa de aire, la turbidez de Linke (TL) y la elevación solar. La TL es un parámetro adimensionado que incluye los efectos de dispersión y absorción por aerosoles, absorción de gases residuales y absorción por vapor de agua. Típicamente oscila entre 2 (para atmósferas muy limpias) y 5. El modelo de Inechien y Perez es una mejora del modelo de Kasten (Kasten, 1980). Otros modelos que se destacan en precisión son el de Rigollier, Bauer y Wald (Rigollier et al., 2000), y el de Kasten (Kasten, 1984), ambos basados en TL.

Los modelos más sofisticados utilizan una mayor cantidad de parámetros atmosféricos, como contenido de aerosoles y columna total de agua precipitable, con el objetivo de modelar con mayor precisión la atmósfera y su efecto sobre la irradiancia que llega a la superficie. Cuando se calibran adecuadamente, estos modelos suelen ofrecer los mejores rendimientos. No obstante, la necesidad de múltiples variables de entrada puede ser una desventaja, ya que estos datos no siempre están disponibles para todas las ubicaciones. Aunque es posible estimar algunas de estas variables utilizando valores constantes adaptados, esto puede resultar en una disminución del rendimiento del modelo. En este sentido, los datos de satélite pueden ser útiles para estimar varios de estos parámetros. Existen muchos modelos, entre ellos podemos mencionar el de Bird y Hulstrom (Bird y Hulstrom, 1981), Ineichen (Ineichen, 2008), Iqbal (Iqbal, 1983), Atwater y Ball (Atwater y Ball, 1978, 1981) y Gueymard (C. A. Gueymard, 2008).

REST2 (“Reference Evaluation of Solar Transmittance”, dos bandas) es considerado un modelo de alto rendimiento para predecir la irradiancia, iluminancia y radiación fotosintéticamente (PAR) de banda ancha en cielos despejados a partir de datos atmosféricos (C. A. Gueymard, 2008). Utiliza un esquema de dos bandas al igual que el modelo CPCR2 (C. Gueymard, 1989) que fue desarrollado y publicado con anterioridad. La estructura general de REST2 es prácticamente idéntica a la de CPCR2, con una separación de bandas de 700 nm. La banda 1 corresponde a la región del ultravioleta (UV) y visible, de

290 a 700 nm. Se caracteriza por una fuerte absorción por parte del ozono en el UV y una fuerte dispersión por moléculas y aerosoles en toda la banda. La banda 2 considera la región del infrarrojo cercano, de 700 a 4000 nm, y se caracteriza por una fuerte absorción del vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases, junto con una dispersión limitada.

La irradiancia directa se estima como un producto de las transmitancias en ambas bandas mientras que la radiación difusa en cada banda es una suma entre la difusa ideal y el efecto del backscattering entre la radiación reflejada en el suelo y en el cielo. Por último, la radiación global se calcula a partir de la ecuación de clausura (Ec. 1).

Este modelo utiliza diversos datos de entrada, entre los que se incluyen la ubicación del sitio (coordenadas geográficas, elevación y zona horaria), la presión (p, hPa), el agua precipitable (w, cm), la columna total de ozono (u_o, cm), el contenido de dióxido de nitrógeno (u_n, cm), el albedo de dispersión terrestre para las bandas 1 y 2 (ρ_1, ρ_2), los parámetros de turbidez y exponente de Ångstrom ($\beta, \alpha_1, \alpha_2$), y el ángulo cenital solar (θ_z). Uno de los parámetros más importantes es el coeficiente β, una medida del espesor óptico de los aerosoles para una longitud de onda de 1 μm.

La irradiancia incidente (particularmente las componentes directas y difusas) son funciones importantes de las propiedades ópticas del aerosol, sobre todo de la profundidad óptica (AOD, por sus siglas en inglés "Aerosol Optical Depth"). AOD_λ, también denominada $\tau_{a,\lambda}$, es una cantidad espectral que normalmente disminuye cuando aumenta la longitud de onda. Según Ångström (Ångström, 1929), la dependencia espectral de la extinción por aerosoles se puede aproximar como una relación de ley de potencia (Ec. 2):

$$AOD_\lambda = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (2)$$

donde:

β es la AOD a 1 μm, o parámetro de turbidez (Ångström, 1964),
λ es la longitud de onda en μm,
α es el exponente de Ångström.

Este último valor es un indicador cualitativo del tamaño de las partículas del aerosol (Ångström, 1929). Los valores de $\alpha \leq 1$ indican distribuciones de tamaño dominadas por aerosoles de modo grueso (con radios $\geq$ ~0,5 μm), que suelen estar asociados con polvo y sal marina. Los valores de $\alpha \geq 2$ indican distribuciones de tamaño dominadas por aerosoles de modo fino (con radios $\leq$ ~0,5 μm), que suelen estar asociados con la contaminación urbana y la quema de biomasa (Eck et al., 1999; Schuster et al., 2006; Westphal y Toon, 1991).

En estudios previos, se han realizado diferentes evaluaciones de los componentes GHI, DNI y DHI del modelo REST2 en distintas partes del mundo. Estos sitios se encuentran principalmente en Europa, América del Norte, norte de África, Medio Oriente y, con menor frecuencia, en Sudamérica. Todos los trabajos coinciden en que el modelo REST2 presenta un muy buen desempeño.

Entre estas validaciones, se encuentra la realizada por Gueymard (C. A. Gueymard, 2012), donde se utilizó información atmosférica de AERONET, obteniendo un rRMSD de 1,5% para la componente GHI en escalas de 1 a 3 minutos. Engerer y Mills (Engerer y Mills, 2015) utilizaron información atmosférica media interpolada extraída del conjunto de datos SoDa, y encontraron un rRMSD de 5,1% para la evaluación de GHI a escala de 1 minuto. Finalmente, en Antonanzas-Torres et al. (Antonanzas-Torres et al., 2019) se utilizó información de AERONET, encontrando valores de rRMSD de 3,1% para GHI de 1 minuto. A nivel regional se destaca el trabajo de Russo et al. (Russo et al., 2022), donde se

evaluó el desempeño de REST2 con información de reanálisis de MERRA2, encontrando un rRMSD de 3,7% para la componente GHI a escala de 1 minuto.

El objetivo de este trabajo es evaluar el modelo REST2 a una escala de tiempo de 1 minuto con datos terrestres de GHI durante los años 2019 y 2020, utilizando información atmosférica de AERONET. El estudio se llevó a cabo en los sitios de Pilar (Córdoba), Villa Martelli (Buenos Aires), Comodoro Rivadavia (Chubut) y Río Gallegos (Santa Cruz) de Argentina. Estos sitios pertenecen a la red de monitoreo de la radiación solar Saver-Net (Orte et al., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para validar el modelo, la salida de GHI se comparó con mediciones terrestres, que se describen a continuación. Las variables de entrada del modelo REST2 se obtuvieron de la medición terrestre de los fotómetros solares de la red AERONET (β, α_1, α_2, w) (*Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage*, s. f.; Holben et al., 1998; Shaw, 1983), de la base de datos de OMI/Aura (u_o) (Levelt et al., 2006), de la base de datos de la National Solar Radiation Data Base (NSRDB) (ρ_1, ρ_2) (Sengupta et al., 2018), de mediciones de parámetros meteorológicos en el sitio (p) y, además, otros parámetros se estimaron o se utilizaron valores por defecto (θ_z, u_n, p) (ver Tabla 2).

Mediciones terrestres de GHI

La información de GHI utilizada para validar el modelo se obtuvo con una frecuencia minutal durante los años 2019 y 2020 en las diferentes estaciones de la red Saver-Net: Pilar (PIL) (31,68ºS, 63,87ºO, 330 m s.n.m.), Villa Martelli (VMA) (34,58ºS, 58,48ºO, 25 m s.n.m.), Comodoro Rivadavia (CRD) (45,78ºS, 67,50ºO, 43 m s.n.m.) y Río Gallegos (RGL) (51,60ºS, 69,32ºO, 15 m s.n.m.) (Figura 1). Los datos se registraron con piranómetros Kipp&Zonen CMP-21 en el rango de onda corta en un plano horizontal con un tiempo de adquisición de un minuto. La incertidumbre típica reportada para estos instrumentos es menor a ±2% para los totales diarios (OTT HydroMet, s. f.). El conjunto de datos fue sometido a un control de calidad siguiendo diversos pasos. En principio, las medidas de altura solar menor a 7º fueron descartadas, ya que representan una porción del día donde los valores de GHI son bajos, y la incertidumbre relativa de la medida es más alta, por lo que se suelen descartar para fines de evaluación de modelos. Además, se realizó una exhaustiva inspección visual en las series temporales con el fin de detectar periodos defectuosos. Por último, se examinaron los valores de GHI y del índice de claridad (*kt*) con el ángulo cenital, y se realizaron diagramas solares con el objetivo de determinar muestras alteradas por la presencia de sombra.

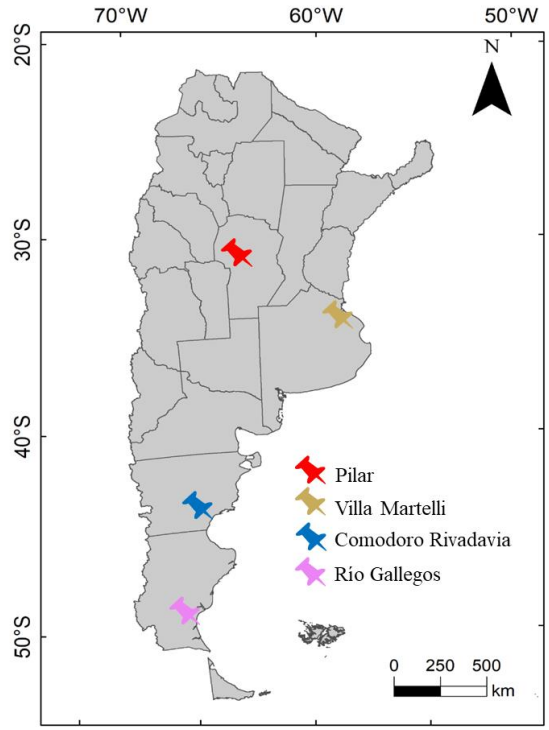


Figura 1: Distribución geográfica de los sitios de la Red argentina de irradiancia solar UV-Total "Saver-Net" utilizados en este estudio.

La detección de los minutos claros se realizó siguiendo la metodología propuesta en Lusi et al. (Lusi et al., 2023), donde se filtraron valores altos del índice de claridad modificado (k_t^*) y bajos de variabilidad entre las muestras ($\sigma = std(\Delta k_t^*)$), para un entorno de ±2 muestras de la muestra objetivo. En este trabajo, los límites se adecuaron para realizar una correcta selección dependiendo del sitio. Los límites establecidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Límites establecidos para la detección de minutos claros en cada estación.

Estación	Límite del k_t^*	Límite de σ
PIL	$0{,}75 < k_t^* \leq 0{,}85$	$\sigma \leq 0.005$
VMA	$0{,}75 < k_t^* \leq 0{,}85$	$\sigma \leq 0.003$
CRD	$0{,}77 < k_t^* \leq 0{,}88$	$\sigma \leq 0.005$
RGL	$0{,}76 < k_t^* \leq 0{,}90$	$\sigma \leq 0.003$

Mediciones de AERONET

La red de fotómetros solares terrestres, conocida como AERONET (Aerosol Robotic NETwork), fue establecida por la NASA en colaboración con PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normlization Satellitaire; Universidad de Lille, CNES y CNRS-INSU). AERONET utiliza fotómetros del modelo CIMEL Electronique 318, que son radiómetros de campo de visión angosto diseñados para medir la irradiancia solar. Estos fotómetros solares poseen bandas espectrales bien definidas en longitudes de onda clave, tales como 1020, 940, 870, 670, 500, 440, 380 y 340 nm, con un ancho de banda de aproximadamente 10 nm FWHM (Full Width Half Maximum) (Shaw, 1983). El parámetro de turbidez (β), los exponentes de Angstrom (α_1, α_2) y el vapor de agua precipitable (w) fueron obtenidos o estimados a través de información de AERONET (https://aeronet.gsfc.nasa.gov/).

En la descarga, las estaciones se corresponden con los nombres de “Pilar_Cordoba”, “CEILAP-BA”, “CEILAP-Comodoro” y “CEILAP-RG”, para los sitios de PIL, VMA, CRD y RGL, respectivamente. Los productos seleccionados fueron AOD, agua precipitable y parámetros de Angstrom en el nivel 2.0.

Mediciones de ozono (OMI/Aura)

La columna total de ozono se descargó del sitio web de la NASA (http://avdc.gsfc.nasa.gov), que contiene la base de datos del instrumento OMI, siendo la información de libre acceso. El producto de datos utilizado fue el OMDOAO3 L2, el cual utiliza un algoritmo que aprovecha las capacidades hiperespectrales del instrumento OMI basándose en la Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS). El algoritmo consta de tres pasos. En primer lugar, se utiliza el método DOAS para ajustar la sección transversal de absorción diferencial de ozono al espectro de radiancia de la Tierra normalizado por el Sol, para obtener la densidad de columna inclinada. En el segundo paso, la densidad de la columna inclinada se traduce en la densidad de la columna vertical utilizando un factor de masa de aire. El tercer paso consiste en una corrección de los efectos de las nubes, para tener en cuenta el ozono que está oscurecido por las mismas (Veefkind et al., 2006).

Modelo REST-2

Las variables obtenidas para el modelo presentan diferentes frecuencias temporales. Con el objetivo de homogeneizar todos los datos a la frecuencia minutal, se implementaron diversas estrategias.

En el caso de la columna total de ozono de la base de datos del OMI, cuando se dispuso de más de un registro diario, se optó por calcular el promedio de esos valores y utilizar dicho resultado para representar la totalidad del día. En las situaciones en las que no se contaba con datos disponibles, se realizó una interpolación lineal entre el día anterior y el siguiente, dado que el comportamiento del ozono tiende a mostrar una transición suave entre días consecutivos. Esta metodología aseguró una continuidad en los datos.

Para el agua precipitable, que presentaba una frecuencia temporal variable, se utilizó el valor observado por el fotómetro solar sin ningún procesamiento.

En relación con los datos de presión medidos en la estación de VMA, los cuales tenían una frecuencia de 5 segundos, se promediaron los valores para representar un valor por minuto. En las demás estaciones, la presión se estimó en función de la altitud del sitio.

Para variables de bajo impacto como la concentración de NO_2 se utilizaron los valores predeterminados propuestos en Gueymard (C. A. Gueymard, 2008).

Los datos del albedo de superficie fueron obtenidos del sitio web de la NSRDB (https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer) con una cadencia de 10 minutos. Para completar la serie de datos, se realizó una interpolación lineal en los valores faltantes. Además, se asumió que el albedo terrestre es igual en las dos bandas ($\rho_1 = \rho_2$).

Se consideró el AOD_{500} para la banda UV-VIS, y el AOD_{870} para la banda NIR. Los exponentes de Angstrom α_1 y α_2, se obtuvieron para longitudes de onda entre 440 y 675 nm, y 500 y 870 nm respectivamente. B se obtuvo invirtiendo la Ec. 2 de la aproximación de Angstrom, con información de la banda 2 (AOD_{870} y α_2):

$$\beta = AOD_{870} * 0.87^{\alpha_2} \quad (3)$$

La Tabla 2 resume las variables atmosféricas de entrada del modelo REST2 y la fuente que dio lugar a dicha información.

Tabla 2: Variables de entrada y fuente de información del modelo REST2.

Variable de entrada	Fuente de información
Ángulo solar cenital (θz)	Calculado a partir de la ubicación geográfica
Presión atmosférica (p)	Medida en la estación (VMA), calculado a partir de la altitud (PIL, CRD, RGL)
Columna total de ozono (u_o)	Instrumento OMI del satélite Aura
Columna total de NO_2 (u_n)	Valor por defecto (0,00002)
Parámetro de turbidez de Angstrom (β)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Exponentes de Angstrom (α_1, α_2)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Vapor de agua precipitable (w)	Fotómetro solar terrestre (AERONET)
Albedo terrestre (ρ_1, ρ_2)	Base de datos NSRDB

Métricas de rendimiento

Se emplearon tres métricas principales de rendimiento: el desvío promedio o sesgo (MBD) (Ec. 4), el desvío cuadrático medio (RMSD) (Ec. 5) y el desvío medio absoluto (MAD) (Ec. 6). La métrica MBD permite cuantificar cualquier sesgo sistemático presente en las estimaciones del modelo REST2 en comparación con las mediciones de referencia de la estación. Por otro lado, tanto RMSD como MAD se utilizan para medir la dispersión de las desviaciones. Además, se analizó el coeficiente de correlación de Pearson (R).

$$\mathbf{MBD} = \frac{1}{N}\sum_i^N e_i \tag{4}$$

$$\mathbf{RMSD} = \left[\frac{1}{N}\sum_i^N {e_i}^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

$$\mathbf{MAD} = \frac{\sum_i^N |e_i|}{N} \tag{6}$$

donde:

N es el número de pares de medidas (y_i) y estimativos de un modelo ($\hat{y}_i$),
e_i son los residuos $\hat{y}_i - y_i$.

Estos indicadores pueden expresarse en términos relativos (rMBD, rRMSD y rMAD) como porcentaje de la media de las medidas $\langle y_i \rangle$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta la dispersión entre el modelo REST2 y las mediciones terrestres que se identificaron previamente como despejadas en cada uno de los sitios. Se puede observar una correlación fuerte para los dos conjuntos de datos, con coeficientes de correlación de Pearson entre 0,998 y 0,999 en todas las estaciones, lo que indica un buen ajuste. No obstante, es notable una leve subestimación por parte del modelo REST2, reflejado por los valores negativos del rMBD en todas las estaciones (Tabla 3). Los valores de rRMSD resultaron en 2,9%, 3,5%, 3,2% y 4,0% para PIL, VMA, CRD y RGL, respectivamente.

En un trabajo previo, los sitios de VMA y PIL fueron evaluados en la misma escala temporal utilizando el modelo McClear (Lusi et al., 2023). Al comparar estos resultados con el desempeño del modelo REST2 se observan diferencias. En VMA, el modelo McClear presenta un rMBD de -0,7%, mientras que REST2 muestra un valor de -2,1%. En PIL, el modelo McClear tiene un rMBD de 1,2%, comparado con -0,2% del modelo REST2. Estos resultados indican variaciones en el desempeño de los modelos de acuerdo con la región geográfica. En términos de rRMSD, McClear muestra un mejor desempeño, con valores de 2,3% en VMA y 2,2% en PIL, mientras que REST2 arrojó valores de 3,5% y 2,9%, respectivamente. Estos resultados sugieren que, aunque el modelo McClear ofrece una mayor precisión en términos de rRMSD, ambos modelos muestran un alto desempeño.

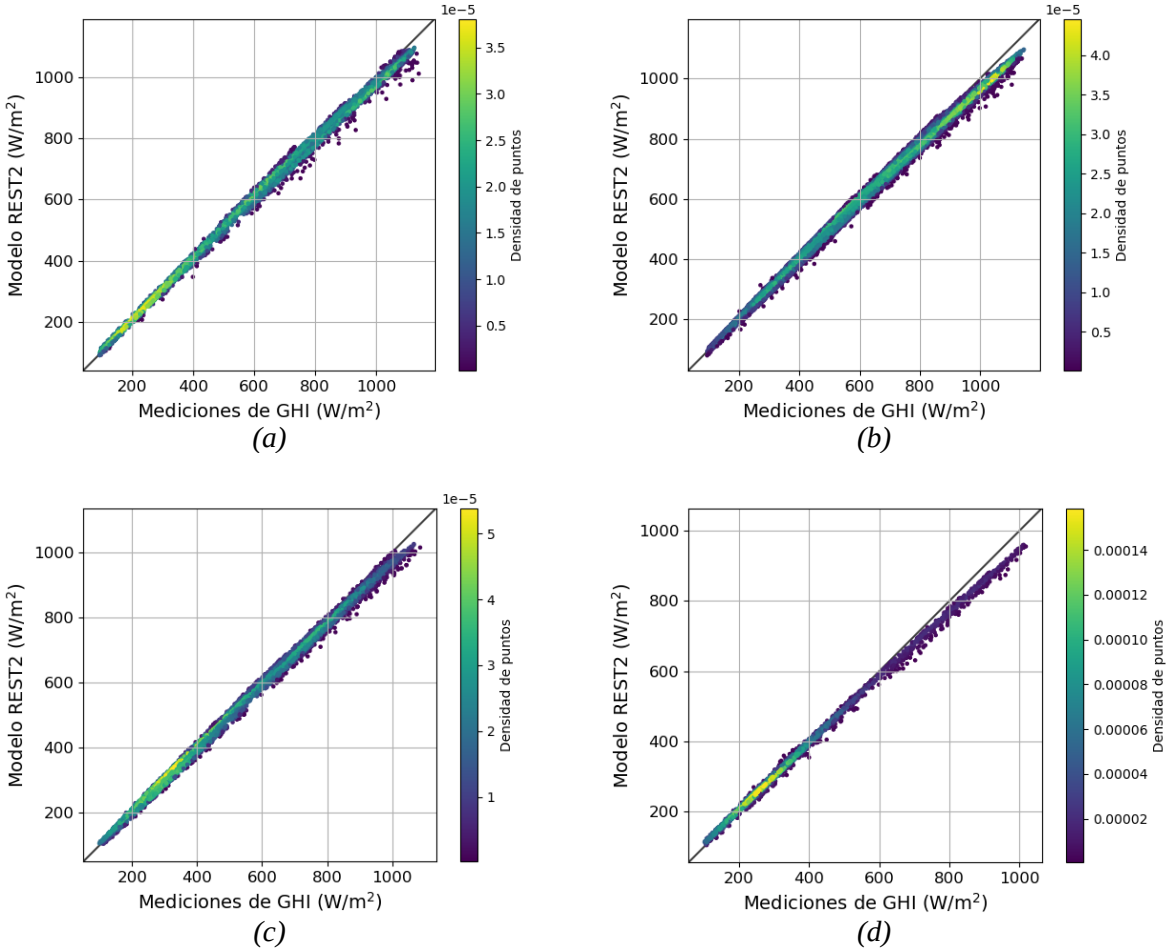


Figura 2: Desempeño del modelo REST2 (a) PIL, (b) VMA, (c) CRD, (d) RGL.

Tabla 3: Indicadores de desempeño del modelo REST2 para los años 2019 y 2020.

Sitio	rMBD (%)	rRMSD (%)	rMAD (%)	R	# Observaciones	Media de las medidas (W/m^2)
PIL	-0,2	2,9	2,3	0,998	4382	651,3
VMA	-2,1	3,5	2,8	0,998	16948	689,8
CRD	-1,6	3,2	2,4	0,999	6396	589,2
RGL	-1,3	4,0	2,7	0,999	2506	457,2

Estudios previos, aunque han utilizado variables atmosféricas provenientes de distintas fuentes de información, han reportado métricas de desempeño del orden de los valores encontrados en este estudio (Engerer y Mills, 2015; Laguarda, 2021; Russo et al., 2022). Las leves discrepancias observadas podrían atribuirse a las diferencias en las fuentes de información de entrada utilizadas en el modelo.

CONCLUSIONES

Este estudio proporciona una evaluación del rendimiento del modelo REST2 en la estimación de GHI bajo condiciones de cielo claro. Los datos utilizados para validar el modelo corresponden a registros minutales de las estaciones de PIL, VMA, CRD y RGL de la red Saver-Net, durante los años 2019 y 2020. La recopilación de diversas fuentes de información permitió obtener las variables atmosféricas necesarias para estimar GHI_c mediante el modelo REST2.

Los resultados del análisis indican una muy buena correlación de los datos, con valores de R entre 0,998 y 0,999 para todas las estaciones. Se observa que el modelo REST2 tiene una suave tendencia a subestimar las mediciones de GHI_c, revelando sesgos relativos negativos en todos los casos.

En comparación, el modelo McClear, evaluado previamente en dos de las cuatro estaciones de este estudio, muestra un mejor desempeño en términos de rRMSD. Sin embargo, es importante destacar que la información de entrada para la caracterización de la atmósfera empleada por el modelo McClear es diferente a la empleada por el modelo REST2 presentado en este trabajo.

En futuras investigaciones, se propone expandir el alcance de este estudio incluyendo más estaciones de la red Saver-Net y abarcando períodos de tiempo más extensos. Además, se sugiere alimentar el modelo REST2 con otras fuentes de información, como por ejemplo datos de reanálisis, lo que permitiría una comparación con los resultados encontrados en este trabajo.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo cuenta con el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en el marco del proyecto PICT-2020-SERIEA-02601.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) por el financiamiento del proyecto Saver-Net y a las instituciones SMN y CITEDEF por el mantenimiento y operación en los nodos de monitoreo de la red. Anabela Lusi es estudiante del Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud (DCAAS, UNICEN, Argentina). R. Alonso-Suárez y A. Laguarda agradecen el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), Udelar, a través del programa CSIC Grupos.

REFERENCIAS

Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage. (s. f.). Recuperado 3 de enero de 2024, de https://aeronet.gsfc.nasa.gov/

Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, *11*(2), 156-166. https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498

Ångström, A. (1964). The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, *16*(1), 64-75. https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00144.x

Antonanzas-Torres, F., Urraca, R., Polo, J., Perpiñán-Lamigueiro, O., y Escobar, R. (2019). Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *107*, 374-387. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.032

Atwater, M. A., y Ball, J. T. (1978). A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, *21*(3), 163-170. https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90018-X

Atwater, M. A., y Ball, J. T. (1981). A Surface Solar Radiation Model for Cloudy Atmospheres. *Monthly Weather Review*, *109*(4), 878-888. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0878:ASSRMF>2.0.CO;2

Berger, X. (1979). Etude du Climat en Region Nicoise en vue d'Applications a l'Habitat Solaire. *CNRS, Paris*.

Bird, R. E., y Hulstrom, R. L. (1981). *Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces* (SERI/TR-642-761). Solar Energy Research Inst. (SERI), Golden, CO (United States). https://doi.org/10.2172/6510849

Daneshyar, M. (1978). Solar radiation 330 for Iran. *Solar Energy*, *21*(4), 345-349. https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90

Eck, Thomas., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., y Kinne, S. (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *104*(D24), 31333-31349. https://doi.org/10.1029/1999JD900923

Engerer, N., y Mills, F. (2015). Validating nine clear sky radiation models in Australia. *Solar Energy*, *120*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.044

Gueymard, C. (1989). A two-band model for the calculation of clear sky solar irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, *43*(5), 253-265. https://doi.org/10.1016/0038-092X(89)90113-8

Gueymard, C. A. (2008). REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*, *82*(3), 272-285. https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.008

Gueymard, C. A. (2012). Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*, *86*(8), 2145-2169. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.011

Haurwitz, B. (1945). Insolation in relation to cloudiness and cloud density. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *2*(3), 154-166. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1945)002<0154:IIRTCA>2.0.CO;2

Holben, B. N., Eck, T. F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J. P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J. A., Kaufman, Y. J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., y Smirnov, A. (1998). AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment*, *66*(1), 1-16. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5

Ineichen, P. (2008). A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*, *82*(8), 758-762. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.009

Ineichen, P., y Perez, R. (2002). A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*, *73*(3), 151-157. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00045-2

Iqbal, M. (1983). *An Introduction To Solar Radiation*. Elsevier Science.

Kasten. (1984). Parametrisierung der Globalstahlung durch Bedeckungsgrad und Trubungsfaktor. *Annalen der Meteorologie Neue*, *20*, 49-50.

Kasten, F. (1980). A simple parameterization of the phyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor. *Meteorol. Rdsch.*, *33*, 124-127.

Kasten, F., y Czeplak, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, *24*(2), 177-189. https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90391-6

Laguarda, A. (2021). *Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre: Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda*. https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/28319

Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., Vries, J. de, Stammes, P., Lundell, J. O. V., y Saari, H. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *44*(5), 1093-1101. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333

Lusi, A., Orte, F., Alonso-Suárez, R., D'Elía, R., y Wolfram, E. (2023). Evaluación de los Modelos de Radiación Solar Global Heliosat-4 y McClear en dos Sitios de Argentina. *ANALES AFA*, *34*(3), Article 3. https://doi.org/10.31527/analesafa.2023.34.3.76

Orte, F., Wolfram, E., Luccini, E., D'Elia, R., Lusi, A., Pallotta, J., Nollas, F., Carmona, F., Papandrea, S., Cabezas, M. D., Benítez, G. C., y Mizuno, A. (2022). Red de Monitoreo de la Irradiancia Solar UV-Total en Argentina «Saver-Net». *Meteorológica*, *47*(2). https://doi.org/10.24215/1850468Xe016

OTT HydroMet. (s. f.). *CMP Series Pyranometers, Operational Manual*. https://s.campbellsci.com/documents/ca/product-brochures/cmp6-cmp11-cmp21_br.pdf

Rigollier, C., Bauer, O., y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas—With respect to the heliosat method. *Solar Energy*, *68*(1), 33-48. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9

Robledo, L., y Soler, A. (2000). Luminous efficacy of global solar radiation for clear skies. *Energy Conversion and Management*, *41*(16), 1769-1779. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00019-4

Russo, P., Laguarda, A., Abal, G., y Piccioli, I. (2022). *Performance of the REST2 model for 1-minute clear-sky solar irradiance with MERRA-2 atmospheric inputs.* https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/37953

Schuster, G. L., Dubovik, O., y Holben, B. N. (2006). Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(D7). https://doi.org/10.1029/2005JD006328

Sengupta, M., Xie, Y., Lopez, A., Habte, A., Maclaurin, G., y Shelby, J. (2018). The National Solar Radiation Data Base (NSRDB). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *89*, 51-60. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.003

Shaw, G. E. (1983). Sun Photometry. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *64*(1), 4-10. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1983)064<0004:SP>2.0.CO;2

Stein, J., Hansen, C., y Reno, M. (2012). *Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis.* (SAND2012-2389, 1039404; pp. SAND2012-2389, 1039404). https://doi.org/10.2172/1039404

Veefkind, J., Dehaan, J., Brinksma, E., Kroon, M., y Levelt, P. (2006). Total ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) using the DOAS technique. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, *44*, 1239-1244. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.871204

Westphal, D. L., y Toon, O. B. (1991). Simulations of microphysical, radiative, and dynamical processes in a continental-scale forest fire smoke plume. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *96*(D12), 22379-22400. https://doi.org/10.1029/91JD01956

ACCURACY OF THE REST2 CLEAR-SKY MODEL FOR GLOBAL HORIZONTAL IRRADIANCE IN THE SAVER-NET NETWORK OF ARGENTINA

ABSTRACT Given the utility of clear-sky models for estimating the Global Horizontal Irradiance (GHI), it is pertinent to evaluate their performance against high-quality surface measurements. This work presents an evaluation of the REST2 model ("Reference Evaluation of Solar Transmittance," two bands), a high-performance model based on a two-band scheme that uses various atmospheric parameters to characterize the atmosphere. The model's results were assessed using minute GHI data from the Pilar, Villa Martelli, Comodoro Rivadavia, and Río Gallegos sites in the Argentine solar radiation network Saver-Net during 2019 and 2020. The results indicate a very good correlation of the data, with Pearson coefficients between 0.998 and 0.999 for all stations. Furthermore, it was observed that, with the considered input variables, the REST2 model tends to slightly underestimate GHI measurements, revealing negative relative biases (rMBD) in all cases. The relative mean square errors (rRMSD) were 2.9% at Pilar, 3.5% at Villa Martelli, 3.2% at Comodoro Rivadavia, and 4.0% at Río Gallegos. The performance metrics observed in this study are consistent with the values reported in the region.

Keywords: GHI, REST2, modeling and clear sky

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 332-343, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO LCIM PARA LA ESTIMACION DE RADIACION SOLAR EN LA SUPERFICIE DE SALTA CAPITAL Y EL ROSAL

Nicolás Rivera[1], Germán Salazar[1], Agustín Laguarda[2]
[1]Instituto de investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta
[2]Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, UdelaR
E-mail: nicolasrivera2297@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se analiza el desempeño del modelo satelital LCIM para la estimación de la irradiancia solar en plano horizontal (GHI) en toda condición de cielo sobre dos sitios de la provincia de Salta, fuera de su región de entrenamiento: Salta Capital (1200 msnm) y El Rosal (3355 msnm). Este modelo semi-empírico ha sido desarrollado por el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República, Uruguay (LES) para la Pampa Húmeda. En segunda instancia, se propone y analiza un reentrenamiento sobre los parámetros empíricos del modelo para mejorar su precisión de sus estimativos de GHI en los sitios estudiados. Para ello se necesitó contar con: (i) medidas de GHI en ambos sitios, para entrenamiento y validación, (ii) un modelo preciso para estimar GHI en condiciones de cielo claro (modelo ESRA para Salta Capital y modelo McClear para El Rosal) e (iii) información del canal visible del satélite GOES-East. Además, como referencia se evalúan los estimativos del modelo Heliosat-4, provisto por el servicio de acceso gratuito de Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS). Los resultados muestran que el modelo LCIM original adapta mejor respecto a las mediciones en tierra que el modelo Heliosat-4 (rRMSE de LCIM: 20,1% y 15,1%, mientras que Heliosat-4: 27,7% y 29,4%, para Salta Capital y El Rosal respectivamente). En segunda instancia, se analiza y ajusta el cálculo del índice de nubosidad para su aplicación sobre una zona de alto albedo superficial como El Rosal. Las desviaciones rRMSE de las adaptaciones fueron del 19,7% y 12,9% para Salta y El Rosal (con el nuevo índice) respectivamente, mejorando su desempeño en su versión original en ambos sitios (20,1% y 15,1%).

Palabras clave: irradiancia solar en plano horizontal, modelo satelital, all-sky models, LCIM, Heliosat-4.

INTRODUCCIÓN

La forma más directa de comprender las características de la radiación solar en un lugar específico es mediante mediciones de largo plazo en el sitio mismo. Sin embargo, en regiones con características orográficas variables (como en la provincia de Salta), medir en cada sitio es impracticable por el costo considerable tanto en recursos materiales como humanos. Se requieren, además, mediciones de mediano-largo plazo, dado que la radiación solar posee características climáticas que varían en el tiempo. Surge así, la opción complementaria de utilizar información de satélites meteorológicos geoestacionarios, que tiene la ventaja de cubrir grandes áreas por largos periodos de tiempo. La información satelital suele tener alta frecuencia de muestreo, generalmente subhoraria, en varios canales espectrales, especialmente en el rango visible. Esta información es útil para captar la nubosidad, de gran impacto en la irradiación global horizontal. Dado esto, existen modelos que estiman la irradiancia solar en superficie sobre el campo de visión del satélite.

Un ejemplo es el modelo satelital LCIM (L de LES y CIM de Cloud Index Model), desarrollado por el grupo de investigación del Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de la República (LES, http://les.edu.uy/) para la Pampa Húmeda (Laguarda, 2021). El LES proporciona información de Irradiación Solar Global Horizontal (GHI) bajo demanda para una gran región de Sudamérica utilizando imágenes de *Geostationary Operational Environmental Satellite* – East (GOES-East) específicamente GOES-13 (desactivado en 2017-2018) y GOES-16 (desde 2018). Estos satélites se ubican sobre el ecuador en una longitud de -75 grados y son operados por la National Oceanic and Atmospcheric Administration, EUA (NOAA). El LCIM es de naturaleza semi-empírica ya que se basa en un modelo físico para estimar la radiación en condiciones de cielo claro y en una parametrización fenomenológica para modelar el efecto de las nubes. Esta parametrización cuenta con dos parámetros empíricos determinados en Laguarda (2021) específicamente para aplicación del modelo a la región climática de la Pampa Húmeda, clasificada según Köppen-Geiger (Peel et al., 2007) como Cfa (clima templado, sin estación seca y con veranos calurosos) y con alturas dentro de un rango desde los 0 a 500msnm. Sin embargo, su desempeño no fue analizado en sitios de características climáticas y orográficas diferentes, como los de la provincia de Salta, donde nos encontramos con cinco clasificaciones climáticas según Köppen-Geiger (BWk, BSh, BSk, Cwa, Cwb) y con variaciones de altura que van desde los 300msnm a más de 6000msnm.

En este contexto, se propone evaluar el modelo satelital LCIM en su forma original y reentrenando sus parámetros empíricos, compararlo con el modelo de referencia Heliosat-4 (proporcionado por el servicio de CAMS), utilizando como referencia mediciones de radiación solar tanto en Salta Capital como en El Rosal, situados en latitud = 24,728611° (S), longitud = 65,40944° (O), altura = 1233 metros sobre el nivel del mar (msnm) y latitud = 24,39278° (S), longitud = 65,76806° (O), altura = 3355 msnm, respectivamente.

Las mediciones, realizadas en el campus de la Universidad Nacional de Salta y en la Escuela N°4526 "El Rosal", se utilizarán para evaluar el desempeño de los modelos: LCIM, su adaptación local, y el modelo Heliosat-4 mediante métricas como el coeficiente de determinación (R^2), el sesgo medio (MBD), el error cuadrático medio (RMSE) y sus respectivos relativos como porcentaje (rMBD y rRMSE), con el fin de determinar la correspondencia entre las estimaciones de radiación solar de los modelos satelitales.

MEDIDAS EN TIERRA

Las mediciones en tierra de irradiancia solar se llevaron a cabo en dos sitios de la provincia de Salta: Salta Capital y El Rosal cuyas clasificaciones climáticas son Cwb y Bsk según Köppen-Geiger respectivamente, con una diferencia de más de 2000 metros de altura entre estos sitios y aproximadamente 130 km de distancia. Las mediciones se realizaron a nivel minutal y la Tabla 1 brinda información acerca de los sitios, equipo y periodo de medición.

Tabla 1: descripción de los sitios, equipo y periodo en que fueron tomados los datos de GHI

Sitio	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Altura (m)	Piranómetro	Inicio	Fin
Salta Capital	24,728611	65,40944	1233	Eppley PSP	10/8/22	31/10/23
El Rosal	24,39278	65,7806	3355	Kipp & zonen CMP3	16/5/23	31/12/23

Los piranómetros fueron calibrados a partir de un sensor patrón (Kipp & Zonen CM21), y constantemente se los supervisan, para realizar limpieza y la baja de datos (una vez al mes), de esta forma controlar posibles fallas o errores. Las salidas analógicas de ambos sensores fueron conectadas a Dataloggers Campbell CR1000 registrando datos con frecuencia minutal.

A las mediciones de GHI se les aplicó un exigente control de calidad detallado en Rivera et al., (2024), algunos de los cuales fueron propuestos por la Baseline Surface Radiation Network (BSRN; Long y

Dutton, 2002), así como por Nollas et al. (2023). Además, filtros específicos por sombreado sobre el sensor y filtros manuales para eliminar ruido eléctrico sobre un periodo de tiempo. Posteriormente, los datos fueron ajustados a una nueva escala temporal, pasando de mediciones minutales a intervalos de 10 minutos, ya que la evaluación de los modelos en condiciones de todo tipo de cielo se realizará con esa cadencia. Después de este cambio de escala, se obtuvieron 24895 datos de GHI a 10 minutos para Salta Capital y 13188 para El Rosal.

DESCRIPCION DE LOS MODELOS

Modelo LCIM

El modelo LCIM (Laguarda, 2021) es un modelo híbrido o semi-empírico que estima GHI (Laguarda et al., 2020) y DNI (Laguarda et al., 2023) en condiciones de todo tipo de cielo para la Pampa Húmeda. En este trabajo estudiaremos únicamente la componente GHI. Para sus estimativos a partir de 2018, se basa en información del canal visible del GOES-16, de frecuencia 10 minutal. El modelo estima la GHI como una fracción de la que habría en condiciones de cielo claro según la Ec. (1). El modelo es semi-empíricio o híbrido dado que utiliza un modelo físico de cielo claro modificado empíricamente a partir de un índice de nubosidad calculado a partir de información satelital. Estos tipos de modelos, son llamados modelos de índice de nubosidad o CIM (Cloud Index Model) y se pueden expresar como:

$$GHI = GHI_{cc} \times F(\eta), \tag{1}$$

donde:

- GHI es el estimativo de Irradiancia sobre el plano horizontal en condiciones de todo tipo de cielo a escala 10-minutal.
- GHIcc es el estimativo de la Irradiancia solar sobre el plano horizontal en condiciones de cielo claro a escala 10-minutal.
- η es el índice de nubosidad.

La función F(η), que utiliza el modelo LCIM detallada en Laguarda (2020, 2021) para el índice de nubosidad es la siguiente:

$$F(\eta) = a \times (1 - \eta) + b \tag{2}$$

La Ec. (2) representa una función lineal, cuyos parámetros a = 0,855 y b = 0,111 fueron establecidos para la Pampa Húmeda en Laguarda (2021). El modelo de cielo claro que utiliza LCIM en la Ec. (1) es el modelo ESRA (Rigollier et al., 2000) a partir de datos del factor de Turbidez de Linke (Louche et al., 1986; Linke, 1992) promediada para 10 sitios en la Pampa Húmeda.

El índice de nubosidad (η) se obtiene de datos satelitales del Canal 2 (centrado en 640 nm) del instrumento Advanced Baseline Imager (ABI) a bordo del satélite geoestacionario GOES-16, a través de la reflectancia planetaria ρ_p,

$$\rho_p = \frac{(\pi \times \frac{L_\lambda}{S_\lambda})}{\cos \theta_z} = \frac{F_R}{\cos \theta_z}, \tag{3}$$

donde L_λ es la radiancia espectral medida por el detector para un píxel (elemento de imagen), S_λ es el resultado de modular el espectro solar extraterrestre (considerando la distancia Tierra-Sol) por la respuesta espectral del instrumento, θ_z el ángulo cenital solar. La radiancia es sensible a las características de las nubes presentes, estas reflejan la irradiancia incidente de forma anisotrópica. La cantidad $\pi \times L_\lambda$ evalúa la irradiancia emergente de la atmósfera (suponiendo isotropía del flujo), mientras que $S_\lambda \times \cos \theta_z$ estima el flujo incidente. La Ec. (3) define una medida aproximada de la reflectancia planetaria asociada a un píxel; la imagen bajada por el usuario consiste en la distribución geográfica del factor F_R. Un proceso de filtrado adecuado aplicado a F_R permite deducir el factor de

reflectancia de fondo (F_{R0}), asociado a la radiación reflejada por la superficie y la atmosfera en la ausencia de nubes.

Los valores de F_R utilizados son obtenidos de la base de imágenes satelitales GOES-East que mantiene el LES. En el caso de GOES-16, tienen una frecuencia 10 minutal (desde el 2018) y una resolución nominal en el nadir de 500 m. Este tamaño en el píxel no representa en forma adecuada lo ocurrido en el sitio, y hay ganancia de desempeño al promediar la información satelital en el espacio (Alonso-Suárez, 2017).

El modelo LCIM utiliza una integración de la información satelital en una celda optimizada para estimar la irradiancia promedio en intervalos de 10 minutos. Esta optimización demuestra que el uso de celdas de 10 minutos de arco por lado (aproximadamente 15 km × 18 km en la región de estudio, considerando latitud y longitud) proporciona una mayor precisión en la estimación de los estimativos de radiación solar (Laguarda, 2021).

η es una normalización de ρ_p, por lo tanto, es un número adimensional entre 0 y 1 que cuantifica la cantidad de nubosidad. La expresión de η queda descrita por:

$$\eta = \frac{\rho_p - \rho_0}{\rho_{max} - \rho_0} = \frac{F_R - F_{R0}}{\rho_{max} \times \cos\theta_z - F_{R0}}, \quad (4)$$

donde:

- ρ_0 es la reflectancia de fondo.
- F_{R0} es el factor de reflectancia de fondo.
- ρ_{max} es la reflectancia que se asocia a condiciones de nubosidad.

Tanto ρ_0 y F_{R0} son campos escalares que presentan variaciones estacionales. Para reflectancias entre la mínima y la máxima, los valores de η están acotados entre 0 y 1, cuando $\rho_p < \rho_0$ es 0 y cuando $\rho_p > \rho_{max}$ es 1. Los valores extremos del índice de nubosidad indican que si es igual a 1 estamos presencia de nubosidad con alto espesor óptico, mientras que si es 0 no encontraremos en situación de cielo claro.

La reflectancia de fondo ρ_0 que utiliza el modelo LCIM es obtenida mediante la parametrización del factor de reflectancia de fondo, F_{R0}, utilizando para ello el método propuesto por Tarpley (1979) y adaptado por Alonso-Suarez (2017). ρ_{max} fue determinado por Laguarda (2021) de modo de optimizar el desempeño de LCIM a partir de un análisis estadístico a través de la métrica RMSE. Allí se reporta ρ_{max} = 0,85, valor utilizado en este trabajo.

Modelo HELIOSAT-4

El modelo Heliosat-4 es un modelo satelital de base física que estima GHI y DNI para toda condición de cielo. Sus estimaciones están provistas por el sitio CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service, http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation). Este modelo surge de la combinación de los modelos físicos McClear y McCloud. Este último, calcula la atenuación de la radiación solar en superficie en presencia de nubes utilizando índices de cielo claro (para GHI y DNI) que se fundamentan en ábacos con cuatro variables de entrada: (i) albedo de la superficie, (ii) profundidad óptica de las nubes, (iii) cobertura de nubes y (iv) tipo de nube (Qu et al., 2017). La información de nubes se obtiene a través de imágenes del satélite MSG (Meteosat Second Generation) con resolución temporal de 15 minutos. Entonces, se generan estimaciones de irradiancia para todo el campo de visión del satélite MSG. Sin embargo, no se asegura que la precisión en áreas donde el ángulo cenital del satélite θ_s exceda los 60°. Cuando $\theta_s > 60°$, los errores de paralaje, la curvatura terrestre y otros factores (Johnson et al., 1994) aumentan la incertidumbre en la localización y caracterización de las propiedades de las nubes, lo que repercute en las estimaciones de irradiación. Dado que los sitios de interés se encuentran a un ángulo cenital $\theta_s > 60°$, este modelo se utilizará solo como referencia en las comparaciones con el modelo LCIM y los datos medidos.

ADAPTACION LOCAL DEL MODELO LCIM

Los parámetros *a* y *b* de la Ec. (2), fueron ajustados en Laguarda et al. (2020) para 10 sitios de la Pampa Húmeda. La baja variabilidad espacial de estos parámetros en sitios permite una aplicación del modelo en esa región utilizando parámetros fijos sin gran pérdida de precisión.

En este trabajo se evaluará en primera instancia al modelo LCIM con los parámetros preestablecidos (LCIMo, LCIM original), y en segunda instancia estos serán re-ajustados a partir de un entrenamiento con datos medidos para la ciudad de Salta y El Rosal, respectivamente y se evaluará al nuevo LCIM (LCIMe). Esta re-adaptación del LCIMo incluye reconsiderar el modelo de cielo claro de mayor precisión para cada sitio.

La adaptación realizada para obtener el modelo LCIMe, en una primera etapa se mantiene la estructura del modelo utilizando como entrada el mismo índice de nubosidad que el modelo LCIMo. En segunda instancia se mejora el cálculo de índice para su aplicación a una zona árida de alto albedo superficial como lo es El Rosal. Sobre la versión adaptada a los sitios de estudio se espera obtener una mejor respuesta en comparación con LCIMo.

La Ec. (5) muestra la estructura de LCIM, desarrollándola, llegamos a la expresión de la Ec. (8). Procederemos a encontrar los parámetros *k1* y *k2* los cuales estarán ajustados a cada sitio de estudio, para así obtener un ajuste local del modelo. Estos parámetros se obtienen realizando un ajuste lineal de la Ec. (8), en donde para ello se necesitará contar con η (obtenida a partir de los datos satelitales de F_R, del modelo de brillo de fondo F_{R0} y ρ_{max}), GHI_{cc}, y los datos de GHI medidos en superficie a los que se le realizaron un control de calidad.

En Rivera et al., (2024) se tiene que el modelo ESRA es el que mejor se ajusta a las condiciones de cielo claro en Salta Capital, mientras que el modelo McClear (MCC; Lefevre et al., 2013) muestra un mejor desempeño para El Rosal, con dispersiones relativas porcentuales (rRMSE) de 3.9% y 2.9%, respectivamente.

Se agrega (t) para distinguir entre las variables que dependen del tiempo y los parámetros de la función.

$$GHI(t) = GHI_{cc}(t) \times \left[a \times \left(1 - \eta(t)\right) + b\right] \quad (5)$$

$$GHI(t) = GHI_{cc}(t) \times \left[(a + b) - a \times \eta(t)\right] \quad (6)$$

$$GHI(t) = \left[GHI_{cc}(t) \times (a + b)\right] - \left[a \times GHI_{cc}(t) \times \eta(t)\right] \quad (7)$$

$$GHI(t) = k1 \times x1(t) + k2 \times x2(t) \quad (8)$$

Donde:

$$x1(t) = GHI_{cc(t)} \quad (9)$$

$$k1 = (a + b) \quad (10)$$

$$x2(t) = GHI_{cc}(t) \times \eta(t) \quad (11)$$

$$k2 = -a \quad (12)$$

El procedimiento implica realizar una técnica de muestreo aleatorio y validación cruzada, lo que significa analizar los datos de manera independiente al dividirlos en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de prueba. La separación se realizó dividiendo aleatoriamente los datos en dos mitades, utilizando una mitad para entrenamiento y la otra para pruebas y validación. Estos conjuntos de entrenamiento y prueba consisten en datos de *GHI(t), GHI_{cc}(t)* y $\eta(t)$.

El ajuste se realizó utilizando la Ec. (8) como función de ajuste, utilizando los datos de entrenamiento como entrada en la función "curve_fit" de Python. Esta función encuentra los parámetros de una función (en este caso, *k1* y *k2*) que mejor se ajustan a los datos proporcionados. Este proceso se repitió 1000

veces para obtener independencia estadística de los resultados, seleccionando nuevos conjuntos de datos aleatorios en cada iteración.

En cada iteración se determinaban los parámetros *k1* y *k2*, con los cuales se obtenía la estimación correspondiente de GHI. Después de realizar las 1000 iteraciones, se procedió a promediar los parámetros *k1* y *k2* obtenidos en cada una de ellas.

OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS MODELOS EN TODA CONDICIÓN DE CIELO

Los datos de GHI estimados correspondientes al modelo LCIMo fueron obtenidos del servicio proporcionado por el LES en http://les.edu.uy/online/stack-loc/. Estos datos medidos en superficie en la escala temporal 10-minutal fueron sometidos a un nuevo filtro debido a que los datos correspondientes al modelo LCIMo poseían algunos huecos temporales debido a imágenes faltantes. Estos huecos representan aproximadamente el 3,7% y el 7,7% para la ciudad de Salta y El Rosal del total de los datos. La obtención de los datos de GHI correspondientes al modelo de Heliosat-4 (al cual en gráficas nos referiremos a él como CAMS) se llevó a cabo utilizando el servicio en http://www.soda-pro.com/. Estos datos se descargaron en intervalos temporales de un minuto y se promediaron para obtener una escala de 10 minutos correspondiente.
Dado los modelos LCIMo, LCIMe y Heliosat-4 se llevará a cabo una evaluación de sus rendimientos utilizando métricas, comparándolos contra datos medidos en tierra para cada sitio de estudio. Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos frente a las medidas son:

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)}{n} \tag{13}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2} \tag{14}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})]^2}{[\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2]} \tag{15}$$

donde:

- x: Valor medido
- y: Valor estimado
- n: Tamaño de la muestra
- $\bar{x}$: Media de los valores medidos
- $\bar{y}$: Media de los valores estimados

Estos indicadores también son presentados en términos relativos como porcentaje de la media, denominados aquí como rMBD y rRMSE.

En Laguarda et al., (2021) se reportó que los errores rRMSE en las evaluaciones del modelo LCIM y Heliosat-4 para la Pampa Húmeda estan en un rango del 16% y 21%, mientras que rMBD 1,5% y -0,2% respectivamente, a escala 10-minutal.

RESULTADOS

Resultados del ajuste

Dado el proceso de obtención de los parámetros *k1* y *k2* a partir de la validación cruzada y llevándolos a su forma *a* y *b*, se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 2:

Tabla 2: Parámetros a y b ajustados para el modelo LCIMe

Sitio	Parámetros	
	a	***b***
Pampa Húmeda (LCMo)	0,855	0,111
Salta	0,876	0,095
El Rosal	0,939	0,052

De esta manera las expresiones finales de la función de GHI estimada del modelo LCIMe resultan ser:

i) Salta:

$$GHI(t) = GHI_{ESRA}(t) \times \left[0{,}876 \times \left(1 - \eta(t)\right) + 0{,}095\right] \quad (16)$$

ii) El Rosal:

$$GHI(t) = GHI_{McClear}(t) \times \left[0{,}939 \times \left(1 - \eta(t)\right) + 0{,}052\right] \quad (17)$$

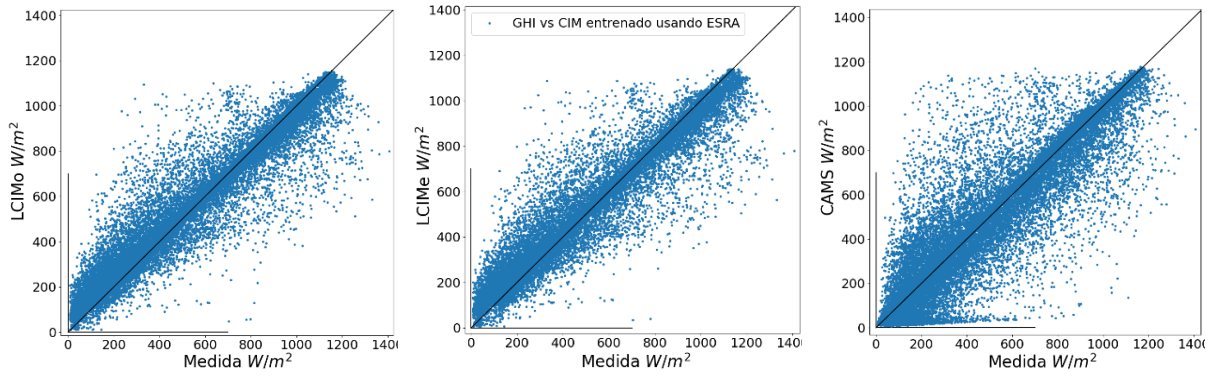
Evaluación de los modelos en toda condición de cielo

A partir de los modelos LCIMo, LCIMe y Heliosat-4 se realizaron las evaluaciones de su rendimiento, las cuales se muestran en la Tabla 3. Estas evaluaciones consisten en comparaciones con datos medidos en tierra, utilizando las medias de GHI medidas en Salta y El Rosal, con valores promedio de 512 W/m² y 699 W/m², respectivamente para normalizar las métricas.

Tabla 3: Métricas de rendimiento para los distintos modelos en condición de todo tipo de cielo

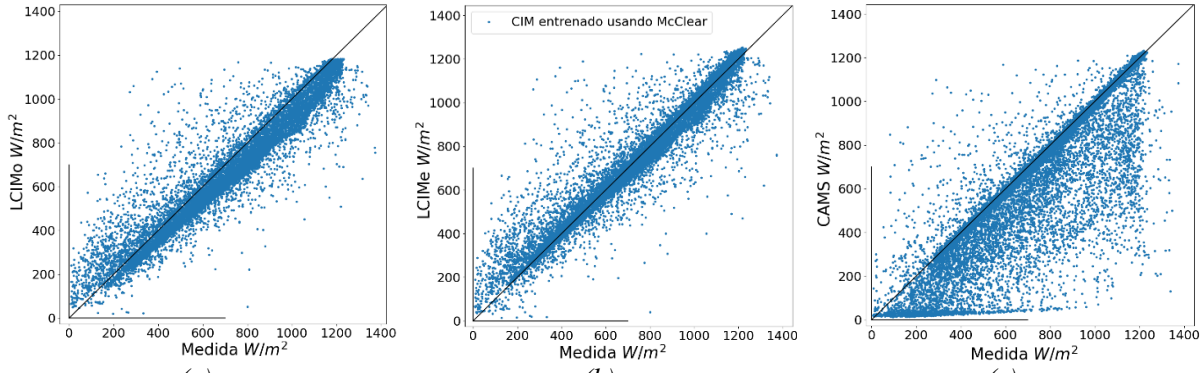
Sitio	Modelo	MBD (W/m²)	RMSE (W/m²)	rMBD(%)	rRMSE(%)	R^2
Salta Capital	**LCIMo**	15,9	103,3	3,1	20,1	0,949
	LCIMe	10,5	100,6	2,0	19,7	0,950
	Heliosat-4	-7,0	142,0	-1,3	27,7	0,903
El Rosal	**LCIMo**	-44,6	105,8	-6,3	15,1	0,944
	LCIMe	2,1	90,8	0,3	13,0	0,949
	Heliosat-4	-107,6	207,5	-15,2	29,4	0,827

Acompañados de las métricas mostradas, se muestran los diferentes gráficos: Figura 1 y Figura 2 de dispersión correspondientes a cada modelo para Salta Capital y El Rosal respectivamente. Se observa que en El Rosal se tiene un mejor ajuste en relación a la recta y=x que en la Capital para los modelos LCIMo y LCIMe, mientras que el modelo Heliosat-4 presenta la mayor dispersión en ambos sitios.



(a) *(b)* *(c)*

Figura 1: Dispersiones entre datos en tierra con modelos en condición de todo tipo de cielo para Salta Capital, (a) LCIMo., (b) LCIMe., (c) Heliosat-4.



(a) *(b)* *(c)*

Figura 2: Dispersiones entre datos en tierra con modelos en condición de todo tipo de cielo para El Rosal, (a) LCIMo., (b) LCIMe., (c) Heliosat-4.

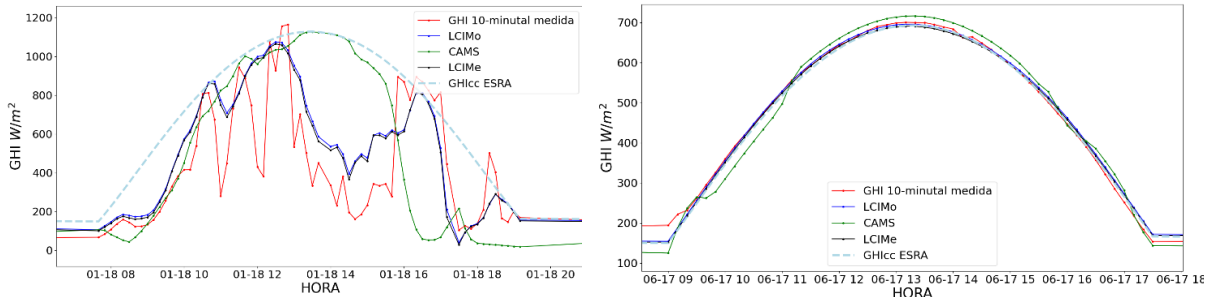
DISCUSIÓN

Salta Capital

Al observar las métricas presentadas en la Tabla 3, se tiene que el modelo LCIMo posee un desempeño superior al modelo Heliosat-4, lo cual es coherente con lo que se aprecia en las gráficas de Salta Capital. Gráficamente (Figura 1*a*), se observa que el modelo LCIMo sobrestima los valores bajos de GHI y subestima los valores altos. Además, se observa en la Tabla 3 que el modelo LCIMe (Figura 1*b*) para la ciudad de Salta reduce tanto los errores rMBD como rRMSE en comparación con el modelo LCIMo en un 1,1% y 0,4%, respectivamente.

Según la información de la Tabla 3, se destaca que el sesgo (MBD y rMBD) de Heliosat-4 es inferior al de LCIMo; este aspecto se refleja en la dispersión de puntos en la Figura 1*c*, donde se aprecian más puntos alejados de la línea de tendencia y=x tanto por encima como por debajo. Dado esto, se observa que el modelo Heliosat-4 tiende a subestimar en comparación con las mediciones terrestres, mientras que LCIMo y LCIMe tienden a sobrestimar.

En la Figura 3 se ilustran los comportamientos de los modelos para dos días, en diferentes estaciones del año y condiciones climáticas. El primero corresponde a un día nublado (Figura 3*a,* 18 de enero de 2023), mientras que el segundo corresponde a un día de cielo claro (Figura 3*b,* 17 de junio de 2023), representando un día de verano y otro cercano al invierno, respectivamente. Para el primer día, el modelo LCIMe exhibe levemente una mayor proximidad a los datos reales en contraste con el modelo LCIMo, estos modelos muestran un patrón similar al medido. Se observa que el modelo Heliosat-4 muestra un seguimiento menos preciso en comparación con la curva de datos medidos. Por otro lado, En la Figura 3*b*, se presenta un día de cielo claro, y todos los modelos describen correctamente estas condiciones. Sin embargo, el modelo Heliosat-4 muestra una mayor amplitud con respecto a los datos reales. Los modelos LCIMo y LCIMe discrepan muy poco entre sí y muestran una excelente aproximación a las mediciones en tierra para este día de cielo claro.



(a) *(b)*

Figura 3: GHI estimada por los modelos y medida en tierra, (a) 18/01/23., (b) 17/06/23.

El Rosal

Según lo indicado en la Tabla 3, se observa que tanto los modelos LCIM como Heliosat-4 tienden a subestimar. Sin embargo, Heliosat-4 el que presenta una mayor subestimación que LCIMo. Esto se evidencia gráficamente en la Figura 2*c*, donde los valores de Heliosat-4 muestran una cantidad significativa de puntos por debajo de la recta (y=x). Esta tendencia sugiere que el modelo Heliosat-4 estaría interpretando incorrectamente la presencia de nubosidad. Al analizar las gráficas Figura 2*a* y Figura 2*b*, se confirma lo observado en la tabla: LCIMe es el modelo que mejor se ajusta a la línea de igualdad, lo cual es coherente con un valor de R^2 superior para este modelo en comparación con su versión original y el modelo Heliosat-4. Se tiene que el modelo LCIMo muestra un patrón tanto en El Rosal, como en Salta que tiende a sobrestimar para valores de GHI bajos y a subestimar para valores de GHI altos. Este comportamiento fue notado en Laguarda (2021). Además, LCIMo exhibe una dispersión (rRMSE) menor que la del modelo Heliosat-4, con una reducción del 14,3%.

Es importante señalar que, además de las limitaciones inherentes a la geometría de la posición del satélite Meteosat, la frecuencia de captura de imágenes es de una cada 15 minutos. Por lo tanto, las estimaciones minuto a minuto publicadas en www.soda-pro.com se obtiene mediante técnicas de "downscaling" lo que podría introducir errores reflejados en los promedios de 10 minutos. Cabe destacar que la mayor concentración de puntos en las Figuras 1*c* y 2*c* se encuentra muy cercana a la línea y=x. La comparación de medias 10-minutales de observación con datos satelitales originales correspondientes a 15 minutos no fue abordada para el presente trabajo. Además, en las Figuras 1*c* y 2*c* se observa una alta densidad de puntos cercanos a cero en las estimaciones del modelo Heliosat-4. Esto se debe a que identifica cielos nublados a cielos que no lo son (este problema podría estar relacionado con el ángulo desde el cual el satélite observa esta región).

Adaptación del índice de nubosidad para zona de alto albedo superficial para El Rosal

Al analizar visualmente los valores de GHI medidos, estimados y de cielo claro a lo largo de la línea temporal, se encontró que tanto el modelo LCIMo como el modelo LCIMe presentaban un desfase y la interpretación de nubosidad en donde no corresponde con respecto a las mediciones reales y al modelo de cielo claro McClear (MCC), como se muestra encerrado en verde en la Figura 4 para distintos días.

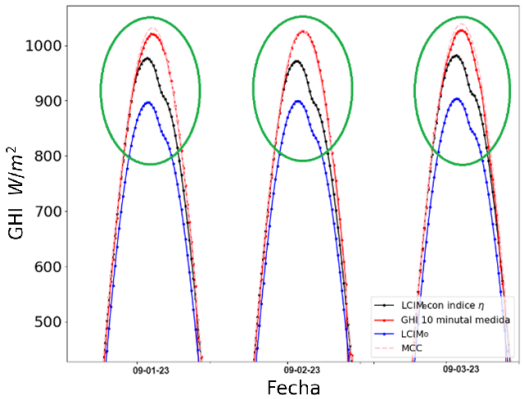
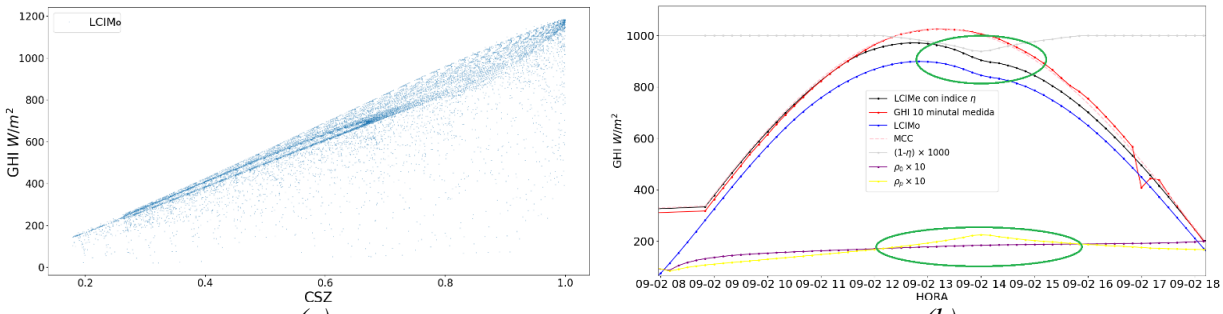


Figura 4: Desfase y atenuación del modelo LCIMo y LCIMe con GHI medida, días 1/9/23 al 3/9/23.

Visto esto a través de una gráfica con el coseno del ángulo cenital con respecto al modelo LCIMo (Figura *5a*), se observa un bucle indeseado. Se observó que tanto el modelo LCIMo como el LCIMe mostraban perturbaciones como si estuvieran en presencia de nubosidad en días donde las mediciones correspondían a días de cielo claro. La Figura *5b* se toma como referencia de esto, y para entenderlo mejor, se graficó el índice de nubosidad η, ρ_p y ρ_0.



(a) *(b)*

Figura 5: Graficas correspondientes al desfase, (a) CSZ vs LCIMo., (b) Variables vs línea temporal. Día 2/9/2023.

De la Figura *5b* se observa, delimitado en verde en la parte superior, una atenuación en las GHI estimadas (LCIMo y LCIMe), lo cual sugiere un aumento en el índice de nubosidad (η). En un día de cielo claro, η debería indicar ausencia de nubosidad ($\eta = 0$), por lo tanto $(1-\eta)\times 1000$ debería permanecer constante en 1000. Sin embargo, esto no sucede, como muestra la línea gris. Tras analizar los datos, encontramos que este comportamiento sucede debido a que, en algunos momentos de ausencia de nubosidad, no se verifica $\rho_p < \rho_0$, por lo que $\eta \neq 0$, lo que el modelo interpreta como nubosidad. Esto se puede observar destacado en verde en la parte inferior; aunque la medida de GHI 10-minutal muestra un día claro, $\rho_p > \rho_0$. Este comportamiento sugiere que la parametrización del brillo de fondo no es precisa, sugiriendo nubes donde no las hay. Es decir, si bien el brillo de fondo fue entrenado específicamente para El Rosal, la aridez del lugar hace que su albedo superficial presente valores muy altos en algunos momentos, haciendo que supere la parametrización sugerida por Tarpley (1979) incluso en algunos momentos de ausencia de nubes. Buscar alternativas para captar de forma realista el brillo de fondo en regiones áridas requiere un estudio más profundo y excede el alcance de este trabajo.

Como solución exploratoria, se incrementa a la parametrización del brillo de fondo en 0,05 unidades (definido por inspección visual de la serie), de modo de evitar que en cielo claro se tenga $\rho_0 > \rho_p$. Implementando este cambio, se obtiene un nuevo índice de nubosidad η_3 y realizando con este una nueva adaptación al modelo LCIMo, se obtuvieron los nuevos parámetros *a* y *b* que se encuentran en Tabla 4, el cual mejora el modelo cualitativamente y cuantitativamente ya que los indicadores de desempeño mejoran (Tabla 5 y Figura 6).

Tabla 4: Parámetros a y b ajustado para el modelo LCIMe con los distintos índices η

El Rosal	**Parámetros**	
	a	***b***
LCIMe con η	0,938	0,052
LCIMe con η_3	0,986	-0,024

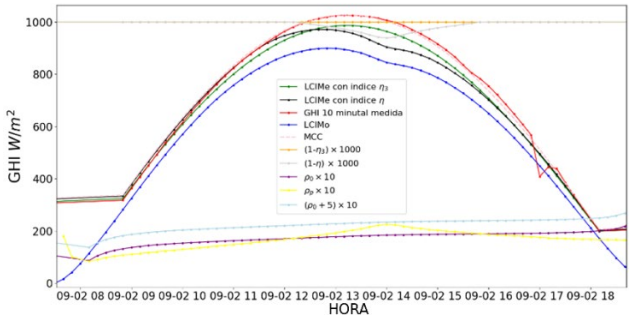


Figura 6: Variables sobre línea temporal corregida, día 2/9/2023.

De la Figura 6, la curva verde muestra el modelo LCIMe con este último índice, en donde se observa que está en fase con el modelo McClear y además no muestra la atenuación artificial debida a la

reflectancia del suelo, dado que en naranja se observa que este índice es igual a 0. En celeste se observa el nuevo ρ_0 el cual es mayor que ρ_p. A partir de este modelo LCIMe con η_3 se procedió a calcular sus indicadores de desempeño contra los valores medidos en tierra, el resultado de estas métricas se encuentra en la siguiente Tabla 5:

Tabla 5: Métricas de desempeño utilizando modelos LCIM con distintos η. El Rosal

Modelo	MBD (W/m^2)	RMSE (W/m^2)	rMBD (%)	rRMSE (%)	R^2
LCIMo	-44,6	105,8	-6,3	15,1	0,944
LCIMe con η	2,1	90,8	0,3	13,0	0,949
LCIMe con η_3	1,8	90,6	0.2	12,9	0,945

Se mantiene el rendimiento a nivel cualitativo del modelo LCIMe con η (mejorando levemente las métricas de desempeño) a la vez que se corrigen artificios indeseados a partir de η_3. No obstante, esto aún puede mejorarse mediante estudios sobre la reflectancia del suelo en El Rosal. De igual manera que para la Capital, la Tabla 5 muestra que el modelo LCIMe para El Rosal reduce tanto los errores rMBD como rRMSE en comparación con el modelo LCIMo en un 6,0% y 2,2%, respectivamente.

CONCLUSIONES

Se evaluaron los modelos LCIM y Heliosat-4, cuyos errores en los sitios de estudio son del 20,1% y 27,7% para Salta, y del 15,1% y 29,4% para El Rosal, respectivamente, utilizando las métricas rRMSE normalizadas con el promedio de las medidas, 512 W/m^2 y 699 W/m^2. Se observó a partir de la Tabla 3 que el modelo LCIMo se ajusta mejor que el modelo Heliosat-4 en ambos sitios.

El modelo LCIMo se reentrenó localmente recalculando sus parámetros empíricos. Los nuevos valores son a = 0,875 y b = 0,095 para la ciudad, y a = 0,986 y b = −0,024 para El Rosal (con el modelo LCIMe entrenado usando η_3) en comparación con los valores originales a = 0,855 y b = 0,111. Según la desviación rRMSE, el modelo LCIMe tiene un error del 19,7% y 12,9%, mientras que el modelo LCIMo tiene un error del 20,1% y 15.1% para Salta Capital y El Rosal, respectivamente. Esto indica que el ajuste proporciona una reducción de este error del 0,4% para Salta Capital, lo cual no es muy significativo considerando que aún queda margen para reducir este error tomando como referencia la Pampa Húmeda donde el rRMSE es del 16% (Laguarda et al., 2021). Para El Rosal, este ajuste proporciona una reducción del rRMSE del 2,2 %, lo cual es relevante, teniendo en cuenta que el error del modelo LCIMe aplicado al paraje ya es menor que el correspondiente para la Pampa Húmeda.

Aunque no se cuenta con una serie temporal de datos de GHI de más de un año, se observó que el modelo LCIMo se ajusta mejor en El Rosal en comparación de Salta Capital. No obstante, en El Rosal, el modelo LCIMo muestra artificios al compararlo con las mediciones terrestres. En algunos momentos del año el modelo interpreta que hay presencia de nubes debido a valores de albedo del suelo más altos en este lugar que para los que fue desarrollado. El procedimiento realizado mostró que existe espacio de mejora en el modelo del brillo de fondo actualmente utilizado en el modelo LCIMo cuando se aplica en zonas áridas. Los resultados a partir del nuevo índice η_3 muestran que el modelo admite varias mejoras en ese sentido, quedando estas mejoras fuera del alcance de este trabajo.

REFERENCIAS

Alonso-Suárez, R. (2017). Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales. *Universidad de la Republica. Facultad de Ing*.

Johnson, D. B., Flament, P. y Bernstein, R. (1994). High-resolution satellite imagery for mesoscale meteorological studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5-33.

Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R. y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda. *Solar Energy, 199*, 295-307. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.005

Laguarda, A. (2021). Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre: Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda. *Udelar. FI*.

Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M., Luza, S., Burgos, B., Stern, V. y Alonso-Suarez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la Pampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente, 48*, 1-9.

Laguarda, A., Alonso-Suarez, R. y Abal, G. (2023). Improved estimation of hourly direct normal solar irradiation (DNI) using geostationary satellite visible channel images over moderate albedo areas. *Solar Energy, 259*, 30-40. doi:10.1016/j.solener.2023.04.042.

Lefevre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-klick, C. y Arola, A. (2013). McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. (C. P. Göttingen, Ed.) *Atmospheric Measurement Techniques, 6*, 2403-2418.

LES, a. d. (s.f.). En LES – Laboratorio de Energía Solar. URL: <http://les.edu.uy.> [consulta: mayo 2024]

Linke, F. (1992). Transmission-koeffizient und trubungsfaktor. *Beitr. Phys. Atomos., 10*, 91-103.

Louche, A., Peri, G. y Iqbal, M. (1986). An analysis of Linke turbidity factor. *Solar energy, 37*(6), 393-396. https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90028-9.

Peel, M., Fynlayson, B., y McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences, 11*(5), 1633 - 1644.

Qu, Z., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gesell, G., Lefèvre, M., Saboret, L., Schroedter-Homscheidt, M., Gschwind, B. y Klüser, L. (2017). Fast radiative transfer parameterisation for assessing the surface solar irradiance: The Heliosat-4 method. *Meteorologische Zeitschrift, 26*(1), 33-57.

Rigollier, C., Bauer, O. y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA—European Solar Radiation Atlas—with respect to the Heliosat method. *Solar Energy, 68*(1), 33-48. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00055-9.

Rivera, N., Salazar, G. y Laguarda, A. (2024). Analisis de la calidad de mediciones de la irradiancia solar en plano horizontal (GHI) y evaluacion del desempeño de los modelos de GHI en codiciones de cielo claro para dos sitios en la Provincia de Salta. *En Revisión*.

Tarpley, J. (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary. *Journal of Applied Meteorology, 18*(9), 1172-1181.

IMPLEMENTATION OF THE LCIM MODEL FOR ESTIMATING SOLAR RADIATION AT THE SURFACE IN SALTA CAPITAL AND EL ROSAL

ABSTRACT: This work analyzes the performance of the LCIM satellite model for estimating Global Horizontal Irradiance (GHI) under all-sky conditions at two sites in the province of Salta, Argentina, outside its training region: Salta Capital (1200 meters above sea level) and El Rosal (3355 meters above sea level). This semi-empirical model was developed by the Laboratorio de Energía Solar of the Universidad de la Republica, Uruguay (LES), for the Pampa Húmeda. Additionally, a retraining of the model's empirical parameters is proposed and analyzed to improve the accuracy of its GHI estimates at the studied sites. For this purpose, the following data were required: (i) GHI measurements at both sites for training and validation, (ii) a precise model to estimate GHI under clear sky conditions (the ESRA model for Salta Capital and the McClear model for El Rosal), and (iii) information from the visible channel of the GOES-East satellite. Furthermore, the estimates from the Heliosat-4 model, provided by the free access service of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), were evaluated as a reference. The results show that the original LCIM model adapts better to ground measurements than the Heliosat-4 model (LCIM rRMSE: 20.1% and 15.1%, while Heliosat-4: 27.7% and 29.4%, for Salta Capital and El Rosal, respectively). Additionally, the calculation of the cloud index was analyzed and adjusted for its application to a high surface albedo area like El Rosal. The rRMSE deviations of the adaptations were 19.7% and 12.9% for Salta and El Rosal (with the new index), respectively, improving its performance over the original version at both sites (20.1% and 15.1%).

Keywords: solar irradiance on a horizontal plane, satellite model, all-sky models, LCIM, Heliosat-4.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 344-355, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANÁLISIS DE VARIANTES DEL MODELO SATELITAL SEMIEMPÍRICO LCIM PARA LA ESTIMACIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR EN SUPERFICIE: CASO DE ESTUDIO EN DOS SITIOS DE URUGUAY

B. Espino[1], **I. Bove**[1], **A. Laguarda**[1]

[1]Laboratorio de Energía Solar, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Udelar

RESUMEN: En este trabajo se exploran tres variantes para parametrizar el factor de atenuación por nubosidad en el modelo satelital LCIM para la estimación de irradiancia solar en superficie. Se realizó un caso de estudio en dos sitios de Uruguay, Salto y Montevideo, utilizando medidas de irradiancia promedio en intervalos de 10 minutos de un año completo para entrenamiento. El objetivo fue mejorar el modelado empírico de la nubosidad, manteniendo la simplicidad y precisión del modelo. Los resultados indican que las variantes no muestran diferencias significativas en la precisión de la estimación, con desvíos menores al 1 %, dispersiones inferiores al 15 % y correlaciones superiores a 0.97 en cada caso. El modelo actual demostró ser el más robusto, especialmente en condiciones de alta irradiancia, mientras que LCIM3, aunque presenta un rendimiento apenas superior, no justifica la complejidad adicional de una parametrización cuadrática. LCIM4, diseñado para destacar en ausencia de nubes, no mostró el desempeño esperado, sugiriendo la necesidad de mejorar los métodos de selección y modelado en estas condiciones. Los resultados sugieren que futuras mejoras en el modelado de la irradiancia solar podrían beneficiarse de una mayor integración de información satelital, incluyendo otros canales espectrales y un tratamiento más detallado de fenómenos geométricos como el paralaje.

Palabras clave: irradiancia solar, GHI, estimación satelital, índice de nubosidad, LCIM

INTRODUCCIÓN

Comprender en detalle el recurso solar es esencial para la evaluación de proyectos de energía solar, ya que la incertidumbre del mismo es la principal fuente de riesgo económico de las plantas fotovoltaicas a gran escala. Para su evaluación es necesario contar con datos de calidad controlada a largo plazo en el lugar de interés. Sin embargo, tener medidas en tierra con estas características es costoso tanto en equipamiento como en recursos humanos, por lo que se suele confiar en información obtenida a través de modelos, ya sea satelitales o numéricos.

En los últimos años, desde el Laboratorio de Energía Solar, Universidad de la República, Uruguay (LES, `http://les.edu.uy/`) hemos desarrollado un modelo semiempírico para la estimación de la irradiancia solar en la región de la Pampa Húmeda Laguarda (2021). El modelo, llamado LCIM por (**L**ES **C**loud **I**ndex **M**odel), puede usarse para estimar con precisión la componente directa en incidencia normal (DNI) y la componente global en plano horizontal (GHI) (Laguarda et al., 2023, 2020). El LCIM pertenece a la familia de modelos que se basan en un índice de nubosidad, como el modelo SUNY (Perez et al., 2002, 2015) o Heliosat-2 (Rigollier et al., 2004). Estos modelos estiman la irradiancia global horizontal aplicando un factor empírico de atenuación por nubosidad a la irradiancia en condiciones de cielo despejado. Este factor a su vez se basa en un índice de nubosidad derivado de datos satelitales. La estructura del modelo se puede resumir como:

$$I = I_{cs} \times F(\eta), \tag{1}$$

donde I representa la irradiancia estimada e I_{cs} es la irradiancia en condiciones de ausencia de nubes (calculada mediante un modelo para ese propósito). $F(\eta)$ es el factor de atenuación por nubosidad, obtenido empíricamente y que depende de un índice de nubosidad (η), derivado de imágenes satelitales. Este índice, propuesto originalmente por Cano et al. (1986) se obtiene a partir de la reflectancia planetaria obtenida por satélite normalizada en un rango dinámico de valores (máximo y mínimo), que pueden depender del tiempo y la ubicación geográfica. El índice η actúa como proxy de la presencia de nubes y típicamente toma valores en $[0, 1]$ siendo el 1 asociado a cobertura total por nubes y 0 asociado a condiciones de cielo despejado. Teniendo esto en cuenta, F es positivo y decrece con η. En caso de ausencia de nubosidad (cielo claro), $\eta \simeq 0$ y $F \simeq 1$.

El modelo LCIM utilizado actualmente por el LES (Laguarda et al., 2020; Laguarda, 2021) usa el modelo ESRA (Rigollier et al., 2000) para estimar la irradiancia en cielo despejado, I_{cs}. ESRA a su vez requiere del conocimiento del factor de turbidez de Linke (TL) como única variable de entrada (Linke, 1922). El TL resume el estado de la atmósfera sin nubes en un solo parámetro, considerando efectos de aerosoles y vapor de agua. En su aplicación operativa, LCIM usa un ciclo estacional único de TL determinado localmente (Laguarda y Abal, 2016; Laguarda et al., 2020). ESRA ha mostrado ser un modelo sencillo y preciso para la región, con estimativos con desvíos cuadráticos medios menores a 3.5 %[1] y desvíos del orden de -0.5 % a nivel horario (Laguarda et al., 2020). El índice de nubosidad, η, se calcula como el albedo terrestre (o reflectancia planetaria, R), normalizado en cada píxel de la imagen según un rango dinámico de valores máximos y mínimos que varían según el día del año y la hora del día:

$$\eta = \frac{R - R_0}{R_{MAX} - R_0} = \frac{F_R - F_{R0}}{R_{MAX}\cos(\theta_z) - F_{R0}}. \tag{2}$$

Aquí, $R = F_R/\cos\theta_z$, siendo θ_z el ángulo cenital solar. El factor de reflectancia, F_R, se obtiene de imágenes del canal visible del satélite geoestacionario GOES-East. R_0 y R_{MAX} representan las reflectancias mínima y máxima esperadas en un píxel en un momento dado. F_{R0} (y por tanto R_0) representa a la reflectancia del pixel sin nubes y se denomina *brillo de fondo*. Esta cantidad se determina mediante una parametrización en función de la posición relativa entre el satélite y el Sol a través de un proceso iterativo propuesto por Tarpley (1979) y adaptado por Alonso-Suárez (2017). Finalmente, R_{MAX} se asocia a un cielo completamente nublado y se asume un valor constante determinado empíricamente de 0.85 (Laguarda et al., 2018).

El LCIM actual (llamado LCIM1 en este trabajo) asume que el factor de atenuación por nubosidad $F(\eta)$ es lineal respecto a η, con dos parámetros ajustados empíricamente para cada sitio,

$$F_1(\eta) = a_1(1 - \eta) + b_1, \tag{3}$$

donde a_1 y b_1 son coeficientes empíricos. Estos coeficientes han mostrado ser robustos al ser calculados en diez sitios de la Pampa Húmeda (Laguarda, 2021), por lo que el modelo en su forma operativa toma el promedio espacial de esos coeficientes sin gran pérdida de precisión. El LCIM1 admite una pequeña tolerancia de 0.05 en las cotas de η de forma de mejorar el rendimiento del modelo en términos generales (Laguarda, 2021). Por lo que $\eta \in [-0.05, 1.05]$.

A pesar de su simpleza, el modelo LCIM ha mostrado ser de los más precisos para la región climática de la Pampa Húmeda, dado que ha sido entrenado específicamente para ello. Diferentes validaciones regionales han mostrado desempeños muy buenos, con dispersiones (en términos del desvío cuadrático medio) de 6 % a nivel diario (Sarazola et al., 2023), 12 % a nivel horario (Laguarda et al., 2020) y 17 % a nivel 10 minutal (Laguarda et al., 2021).

En este trabajo, se analizará de forma exploratoria el impacto de utilizar diferentes enfoques para parametrizar el factor de atenuación por nubosidad $F(\eta)$ del modelo LCIM. El objetivo es explorar posibles mejoras en el modelado empírico de la nubosidad, manteniendo sin cambios la variable η y el modelo para

[1] Las métricas de desepeño expresadas en porcentaje se refieren a la media de las medidas utilizadas como referencia.

condiciones de ausencia de nubes. Dado que LCIM es simple pero también preciso, se buscarán alternativas que preserven estas cualidades. Específicamente, como variable de entrada se utilizará únicamente el dato de reflectancia planetaria (F_R), proveniente de la imagen visible del satélite GOES-East. Asimismo, se limita la parametrización empírica a un máximo de dos parámetros ajustables. De esta forma, se busca lograr un equilibrio óptimo entre la simplicidad del modelo (en estructura e implementación) y la precisión en la representación de la atenuación por nubosidad.

1. DATOS UTILIZADOS

1.1. Datos en tierra

Para el entrenamiento y validación de las variantes propuestas se utilizan medidas en tierra de irradiancia solar. Los dos sitios de medición considerados (AZ y LE) se detallan en la Tabla 1, incluyendo su código de estación y ubicación geográfica. Estos sitios forman parte de la Red de Medición Continua de Irradiancia Solar del LES (RMCIS, `http://les.edu.uy/rmcis/`). Para la medición de la Irradiancia Global Horizontal (GHI), las estaciones están equipadas con sensores Kipp&Zonen's CMP22 (LE) y CMP6 (AZ), respectivamente. Ambos se calibran cada dos años con el estándar local, asegurando la trazabilidad al referencia radiométrica mundial del Centro Mundial de Radiación (PMOD/WRC). El protocolo de muestreo de la RMCIS sigue las recomendaciones de la *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN, McArthur (2005)). Los datos de irradiancia se registran con una frecuencia minutal, como promedio de seis muestras instantáneas tomadas cada diez segundos. Para este estudio consideramos mediciones correspondientes al año 2023 completo.

Tabla 1: Ubicación geográfica de los sitios de medida

Sitio	Código	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
Salto	LE	-31.283	-57.918	56
Montevideo	AZ	-34.918	-56.167	58

Sobre cada conjunto de datos diurnos a nivel minutal se aplican procedimientos de control de calidad y por último se calculan promedios de 10 minutos para el entrenamiento y validación de los modelos. Esta es la escala temporal seleccionada porque es la de las imágenes del satélite GOES-16. Los filtros aplicados incluyen una inspección visual inicial para descartar sombreamientos, y los filtros propuestos por la BSRN (Long y Shi, 2008), los cuales eliminan solamente valores físicamente posibles pero extremadamente raros. Luego se realizó el promedio 10-minutal, aceptando únicamente aquellos con un mínimo de 7 datos válidos. Como último filtro, a los promedios se les impuso una altura solar mínima de 7°, con el objetivo de eliminar las muestras obtenidas al amanecer y al anochecer, donde el error instrumental es mayor. En la Tabla 2 se muestran los datos en cada etapa, indicando cuántos fueron descartados en cada caso

Tabla 2: Resumen de control de calidad y promediado 10 minutal

	LE	**AZ**
Datos diurnos (min)	261436	256149
Descartados (min)	3260	9410
Descartados (%)	1.3	3.7
Válidos (min)	258176	246739
Promedios (10-min)	25770	24644
con $\alpha > 0.7$	**23455**	**22407**

1.2. Datos satelitales

La región de interés de este trabajo es cubierta por satélites geoestacionarios GOES-East (longitud = 75.2°), operados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Desde el 2018 en esa posi-

ción opera el satélite GOES-16. Debido a su posición en órbita geoestacionaria, el tamaño del píxel del satélite GOES-16 en el rango visible es de aproximadamente 1 km, en correspondencia con la resolución espacial nadir de 0.5 km, dado que el ángulo cenital del satélite GOES-East sobre la región objetivo es de aproximadamente 40°. Las imágenes GOES-16 se descargaron del sitio web NOAA CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System), donde están disponibles públicamente. La información satelital es convertida a un Factor de Reflectancia, F_R (adimensionado), a partir de las imágenes del canal visible ($\sim$640 nm). Esta información, que es una medida de la fracción de la radiación solar que es reflejada por el sistema tierra-atmósfera, es luego promediada espacialmente en celdas de $0.125° \times 0.125°$ alrededor de cada sitio de interés.

2. METODOLOGÍA

A continuación se presentan las tres variantes analizadas. En la Tabla 3 se muestran esquemáticamente las características de cada una, junto con la versión actual. A diferencia de LCIM1, todas las variantes utilizan como entrada un índice de nubosidad η en el rango $[0, 1]$, de acuerdo a su definición original (Cano et al., 1986). Es decir, eliminando la tolerancia en el rango de valores extremos. El rango ampliado del índice de nubosidad presente en LCIM1 fue introducido en (Laguarda, 2021), ya que permite mitigar la subestimación en condiciones de baja nubosidad y la sobreestimación en alta nubosidad, un problema común en los modelos de este tipo. Sin embargo, en este estudio, la implementación de parametrizaciones más complejas (LCIM3 y LCIM4, definidas a continuación) aborda estas limitaciones de manera más robusta, por lo que se opta por la definición original del índice de nubosidad. En las parametrizaciones estudiadas se mantienen únicamente dos parámetros empíricos en cada caso. Para realizar una comparación justa, los parámetros del modelo LCIM1 serán reentrenados en este estudio para su comparación con las otras propuestas.

2.1. Variantes analizadas

La variante LCIM2, mantiene la misma expresión lineal para el factor de nubosidad de LCIM (Ec. (3)), por lo que la única diferencia con LCIM1 son los límites de η.

La variante LCIM3, se propone un factor de atenuación por nubosidad cuadrático de la forma:

$$F_3(\eta) = a_3(1 - \eta) + b_3 + c_3(1 - \eta)^2, \tag{4}$$

donde los parámetros empíricos cumplen $c_3 = 1 - a_3 - b_3$, de modo de mantener solo dos parámetros ajustables y que se verifique $F_3(0) = 1$. En la Tabla 3 se muestran los detalles de estas dos variantes.

Finalmente, la propuesta LCIM4 plantea una estructura levemente distinta, donde se discrimina la salida del modelo según si hay condiciones de ausencia de nubes, como se observa en la Tabla 3. Es decir, si se determina que hay cielo despejado, $F_4(\eta) = 1$ y la salida de LCIM4 es simplemente el estimativo de cielo claro, I_{cs} (Ec. (1)). En caso contrario se utiliza una expresión como la de la Ec. (3). Dado que la variable de entrada al modelo es únicamente el factor de reflectancia obtenido de la imagen satelital, F_R, esta estrategia requiere distinguir si hay nubosidad o no utilizando únicamente esa cantidad. El criterio utilizado en esta instancia se basa en comparar la medida de F_R con el modelo de brillo de fondo, F_{R0}, asociado a ausencia de nubes. De forma de evitar un etiquetado incorrecto de muestras claras como nubosas, se impone la condición de cielo despejado si

$$F_R < F_{R0} \times 1.05. \tag{5}$$

En la Fig. 1a se muestra F_R vs. coseno del ángulo cenital, destacando en rojo las muestras de cielo despejado seccionadas con éste método. Para comprobar el criterio, se observa el comportamiento de las medidas en tierra según esa clasificación. En la Fig. 1b, se muestra una gráfica del índice de claridad modificado k_{tp} vs. $\cos\theta_z$, donde también se muestra en rojo las muestras seleccionadas. Este índice de claridad modificado, k_{tp} (Perez et al., 1990) es similar al índice de claridad ($k_t = I/G_{TOA}$, donde I es

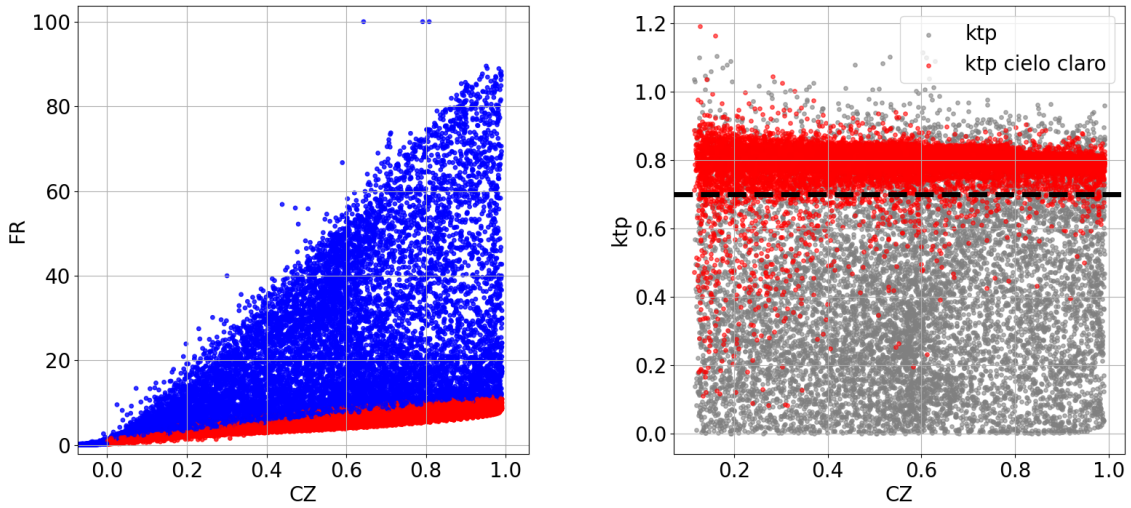
Tabla 3: Variantes de LCIM estudiadas (Ec. (1))

Código	rango de η	$F(\eta)$
LCIM1 (original)	[-0.05, 1.05]	lineal: $a_1(1-\eta)+b_1$
LCIM2	[0, 1]	lineal: $a_2(1-\eta)+b_2$
LCIM3	[0, 1]	cuadrático: $a_3(1-\eta)+b_3+c_3(1-\eta)^2$
LCIM4	[0, 1]	lineal: $\begin{cases} 1 & \text{si hay cielo despejado} \\ a_4(1-\eta)+b_4 & \text{en caso contrario} \end{cases}$

la medida de GHI y I_{TOA} es la irradiancia correspondiente en el tope de la atmósfera), pero removiendo la dependencia con el coseno del ángulo cenital solar.

$$k_{tp} = \frac{k_t}{1.031 \exp\left(-\frac{1.4}{0.9+9.4/m}\right)+0.1} \tag{6}$$

En la Fig. 1b se observa que las muestras de cielo despejado se aglomeran, como era esperado, en donde k_{tp} es alto. También se observa que si bien este criterio con base puramente satelital para detectar muestras toma a la gran mayoría de las muestras claras, también selecciona algunas muestras con valores medios o bajos de k_{tp}. Con este método, un 49.6 % de muestras de FR son consideradas de cielo despejado para AZ y de 44.0 % para LE.



(a) Factor de reflectancia *(b) Índice de claridad modificado*

Figura 1: Selección de cielo despejado con la Ec. (5) para LE. En ambas figuras se muestran en rojo las muestras seleccionadas como cielo sin nubes para el modelo LCIM4.

2.2. Entrenamiento y validación

Para obtener los parámetros de cada modelo, se ajustaron los datos en tierra a la Ec. (1). En cada caso se utilizaron el factor de atenuación de nubosidad y el margen de índice de nubosidad explicitados en la Tabla 3. Para cuantificar el desempeño en cada caso se consideran un conjunto ampliado de indicadores de rendimiento, abarcando las métricas más comunes utilizadas en el campo de la evaluación del recurso solar. Estas métricas incluyen la desviación media del sesgo (**MBD**), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (**RMSD**), la integral de Kolmogorov-Smirnov (**KSI**), y la correlación de Pearson. Las métricas MBD y RMSD serán expresadas en su forma relativa, como un porcentaje de la media de las medidas en

tierra. Las métricas se definen de la siguiente manera:

$$\text{MBD} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i$$

donde $d_i = \hat{y}_i - y_i$ es la diferencia entre las estimaciones del modelo ($\hat{y}_i$) y los datos de referencia medidos (y_i), y N es el número de muestras en la serie de datos diarios. Mide el sesgo sistemático que un modelo puede introducir en la evaluación a largo plazo.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} d_i^2}$$

donde $d_i = \hat{y}_i - y_i$. Mide la dispersión del error con la norma cuadrática y es particularmente sensible a los valores atípicos, lo que lo hace frecuentemente utilizado en este campo.

$$\text{KSI} = \int |\hat{F}(y) - F(y)|\, dy$$

donde $\hat{F}(y)$ es la función de probabilidad acumulada de las estimaciones y $F(y)$ es la función de probabilidad acumulada de las mediciones. Mide la similitud estadística integrando la diferencia absoluta entre estas funciones en todo el rango de la variable objetivo (en este caso, el GHI). Es una métrica orientada negativamente (cuanto más baja, mejor) que cuantifica la diferencia estadística entre ambos conjuntos de datos. Finalmente, el coeficiente de correlación de Pearson que cuantifica la intensidad de la relación lineal entre las estimaciones y las mediciones.

La evaluación del desempeño de las variantes se analizará en términos generales y también discriminando por el índice de claridad modificado, k_{tp}, (Perez et al., 1990) mencionado antes .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4: Parámetros obtenidos en el entrenamiento de las variantes. Se muestra el promedio espacial de los parámetros. Las últimas dos columnas muestran los valores extremos que puede tomar F de la Ec. (1)*.*

Modelo	**parámetro**	**AZ**	**LE**	**Promedio**	F_{max}	F_{min}
LCIM1	a_1	0.941	0.918	**0.930**	1.01	0
	b_1	0.033	0.043	**0.038**		
LCIM2	a_2	0.973	0.957	**0.965**	0.987	0.023
	b_2	0.019	0.026	**0.023**		
LCIM3	a_3	0.598	0.597	**0.598**	1	0.088
	b_3	0.093	0.083	**0.088**		
LCIM4	a_4	0.916	0.885	**0.901**	1	0.044
	b_4	0.040	0.049	**0.045**		

En la Tabla 4 se presentan los parámetros entrenados para cada modelo para ambas estaciones. Adicionalmente, en las últimas tres columnas se muestran sus promedios y los valores extremos que puede tomar F en cada caso. Los parámetros para los modelos LCIM1 y LCIM2 resultan similares entre si. Esto es de esperarse visto que la única diferencia entre los modelos es un margen del 5 % en el índice de nubosidad. Sin embargo, esta pequeña diferencia hace que el valor máximo de F_1 sea en promedio un poco superior a uno, y el de F_2 un poco inferior. Esto significa (según la Ec. (1)) que los valores de irradiancia de LCIM2 siempre serán menores a los del modelo de cielo claro, lo introduce un sesgo indeseado en esas condiciones. En el caso de LCIM3, dado la forma cuadrática de F_3 los valores obtenidos no son comparables a otras opciones, pero se ven estables entre los dos sitios estudiados. Finalmente, por la construcción de

LCIM4, los parámetros a_4 y b_4 son entrenados contra datos asociados a presencia de nubes (los que no verifican la Ec. (5)), sin embargo también son similares a los casos LCIM1 y LCIM2. Por último, vale la pena mencionar que los parámetros obtenidos en los casos lineales son muy parecidos a los obtenidos en Laguarda et al. (2020) para el caso LCIM1 a nivel horario; $a = 0.93$ y $b = 0.045$. En todos los casos los parámetros muestran estabilidad entre de ambas estaciones, manteniéndose siempre que el parámetro *a* de AZ sistemáticamente mayor al de LE.

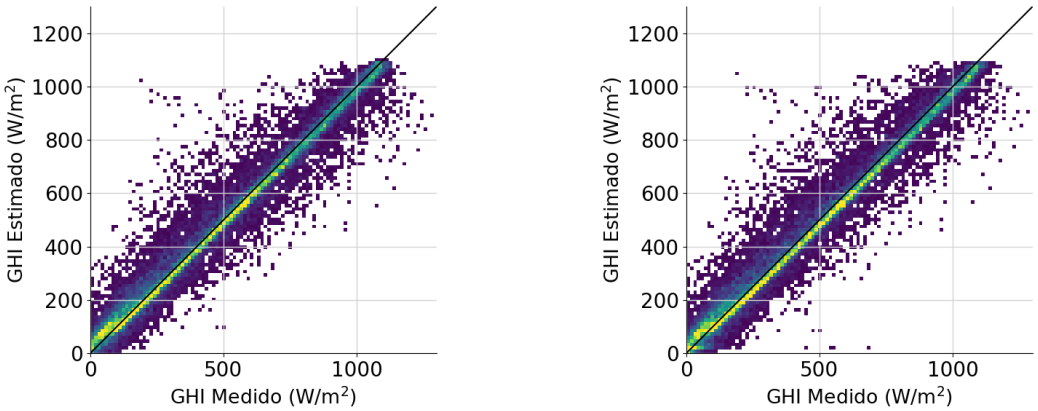
Tabla 5: Métricas de desempeño de las variantes. Los datos totales difieren levemente de los de Tabla 2 por faltantes de imágenes satelitales.

		General		$k_{tp} > 0.7$		$k_{tp} < 0.7$	
Modelo	**métrica**	**AZ**	**LE**	**AZ**	**LE**	**AZ**	**LE**
LCIM1	rMBD (%)	0.3	0.4	-3.9	-3.6	13.9	15.0
	rRMSD (%)	14.9	15.0	8.3	8.2	33.8	37.4
	Corr.	0.974	0.974	0.987	0.987	0.933	0.933
	KSI (W/m^2)	9.7	10.4	23.6	21.7	36.4	38.4
LCIM2	rMBD (%)	0.3	0.3	-4.2	-4.0	14.7	16.1
	rRMSD (%)	15.0	15.3	7.9	8.0	34.9	38.8
	Corr.	0.973	0.973	0.989	0.989	0.932	0.932
	KSI (W/m^2)	9.6	9.5	25.0	24.1	38.4	40.5
LCIM3	rMBD (%)	0.1	0.9	-3.8	-2.5	12.5	14.0
	rRMSD (%)	14.7	15.1	8.3	8.0	33.2	37.9
	Corr.	0.974	0.974	0.987	0.987	0.931	0.927
	KSI (W/m^2)	9.0	6.0	22.7	15.5	32.5	35.3
LCIM4	rMBD (%)	<0.1	0.4	-4.1	-3.1	13.2	13.7
	rRMSD (%)	14.8	15.0	8.6	8.8	32.9	35.9
	Corr.	0.974	0.975	0.986	0.984	0.934	0.933
	KSI (W/m^2)	11.1	8.8	24.5	18.8	34.2	34.5
# Datos		22135	23188	12910	14112	9225	9076
Media de las medidas (W/m^2)		460	471	603	611	260	252

En la Tabla 5 se indican las métricas de desempeño de las variantes analizadas. Se incluye el desempeño general, y discriminado por k_{tp}. Observando la tabla se observa que para cada condición de nubosidad los cuatro modelos muestran métricas muy similares. También hay similitud entre los sitios.

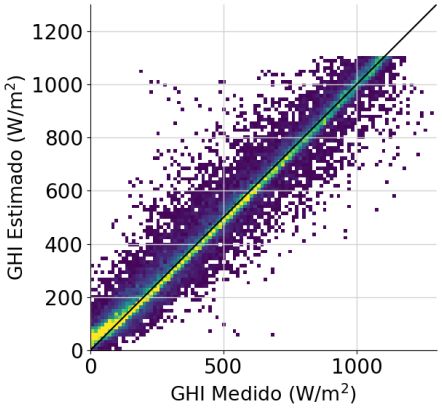
En el caso de las métricas generales, el desvío es positivo y menor a 1 %. Para los modelos LCIM3 y LCIM4 se observa un desvío particularmente bajo en AZ. Los rRMSD se encuentran entre el 14.7 % y el 15.3 % en todos los casos, comparable a trabajos anteriores (Laguarda, 2021). En todos los casos la correlación es alta y se encuentra en el rango 0.973–0.975. El KSI, una variable que indica la similitud de la distribución de probabilidad de los estimativos con las medidas se mantiene en todos los casos el entorno 6.0-10.4 W/m^2, excepto para LCIM4, donde es un par de unidades más alto. En la Fig. 2 se pueden ver gráficos de dispersión de cada modelo para el sitio LE. Las zonas más claras de los gráficos indican mayor densidad de puntos. La figura muestra que en todos los casos los puntos se encuentran cercanos a la recta $y = x$, lo que denota una buena correspondencia entre los datos. En los cuatro casos se tiene una dispersión similar, lo que es acorde a la tabla 5.

En el caso de poca nubosidad (k_{tp} >0.7) los desempeños también son muy similares en todos los casos. Con desvíos sistemáticamente negativos entre mayores a -4.2 %, dispersiones de 8-9 %. En este caso

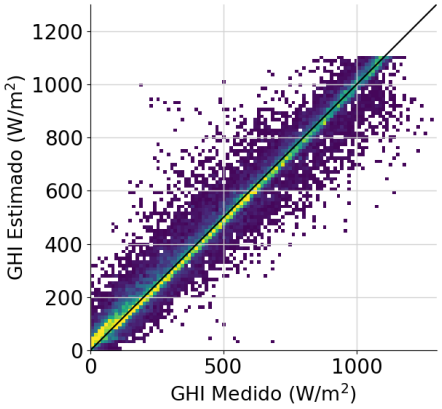


(a) LCIM1

(b) LCIM2



(c) LCIM3



(d) LCIM4

Figura 2: Gráfico de dispersión entre los modelos y las medidas en tierra

las correlaciones son más fuertes que en el caso anterior y se mantienen en torno a 0.985. Si bien las diferencias son mínimas, en este caso LCIM3 muestra métricas levemente superiores que el resto de los modelos. En adición, los mayores sesgos son de LCIM2, en concordancia con el análisis de la Tabla 4. Con respecto a la dispersión, LCIM4 muestra el peor desempeño, lo cual es inesperado por la construcción del modelo, cuyos estimativos de cielo despejado provienen de un modelo específico para ese propósito. Una hipótesis aquí es que el método de selección de cielo despejado utilizado por LCIM4 es subóptimo. En la Fig. 2 se observa que para valores altos de GHI, excepto LCIM1, los modelos muestran una cota estricta para los valores máximos. Esto puede deberse a la imposición de que $F_{MAX} \leq 1$ en esos tres casos. También se observa que la mayor densidad de puntos (zona amarilla) tiende a subestimar parara LCIM2, y en menor medida para LCIM1, a diferencia que LCIM3 y LCIM4.

Por último, para casos de mayor nubosidad (k_{tp} <0.7) se tiene que los sesgos son positivos y menores al 16 %, mientras que las dispersiones en el rango de 33–39 %. Las correlaciones son un poco inferiores, en el entorno de 0.93. Los KSI también se mantienen estables en el rango 32.5–40.5 W/m^2. En este caso, LCIM4 es quien presenta un mejor rendimiento.

En la Fig. 3 se muestran las distribuciones de probabilidad de cada modelo superspuestas a la de las medidas para el caso LE. Nuevamente, se observa comportamiento similar en todos los casos. Allí se observa que para baja irradiancia (menores a 250 W/m^2) en el modelo LCIM3 las muestras están sobre-rrepresentadas. Para irradiancias mayores a 250 W/m^2 se tiene un comportamiento similar en todos los casos, siendo el modelo LCIM4 el que mejor se ajusta al comportamiento de las medidas. También se

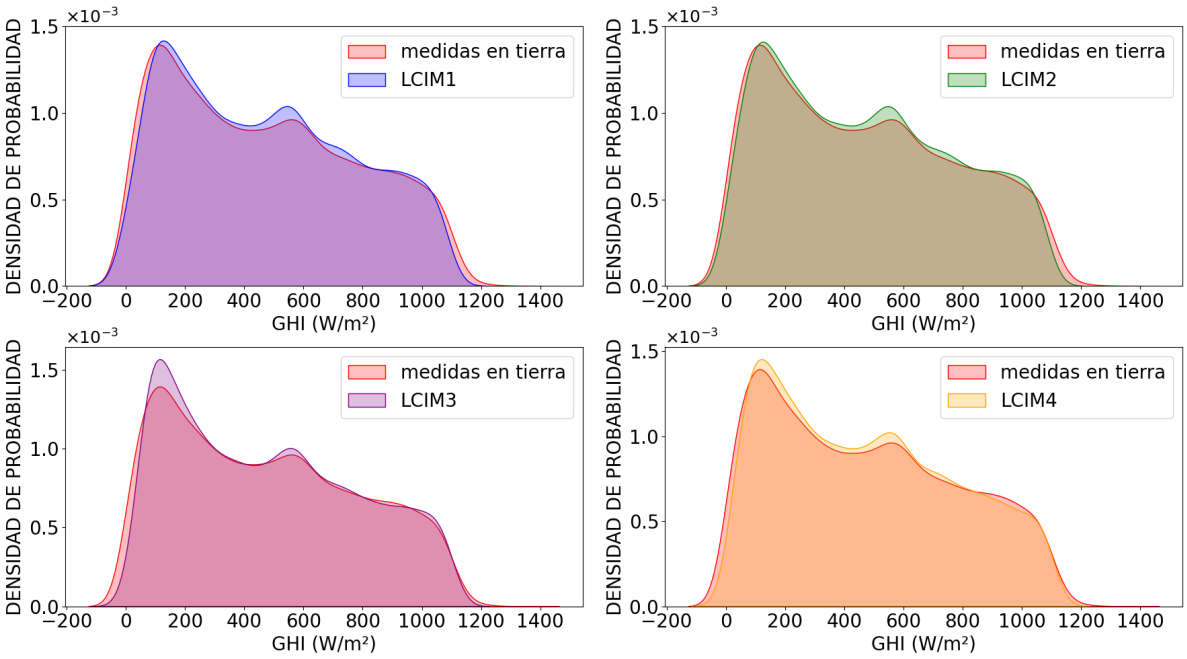


Figura 3: Densidad de probabilidad para toda condición de cielo en LE. AZ no se muestra por ser cualitativamente similar

confirma la dificultad de LCIM1 y LCIM2 para estimar irradiancias en el extremo superior del rango ($\simeq$1200 W/m^2).

En la figura 4 se muestra a modo de ejemplo el comportamiento del los modelos para 3 días consecutivos. En la imagen se puede ver como para el día despejado los cuatro modelos aproximan bien las medidas en tierra, mientras que en los días de alta nubosidad los modelos muestran mayor dispersión con la referencia.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo exploratorio se analizan algunas variantes para parametrizar el factor de atenuación por nubosidad del modelo LCIM. En este caso de estudio se analizan estas parametrizaciones en dos sitios de Uruguay en Salto y Montevideo utilizando un año completo de datos.

La conclusión principal del trabajo es que las cuatro estrategias analizadas para modelar el efecto de la nubosidad no muestran resultados significativamente distintos en términos de la precisión de la estimación de la irradiancia solar global en el plano horizontal promedio a nivel 10-mintual. A nivel general, utilizando coeficientes adaptados a cada sitio, se obtienen desvíos levemente positivos, desviaciones cercanas a 15 % con correlaciones mayores a 0.97 y KSI menores a 11.1 W/m^2. A su vez, todos los modelos subestiman en casos de cielo despejado, y sobre estiman en casos de nubosidad. Sin embargo, hay algunas diferencias a tener en cuenta.

Por su construcción, LCIM2 tiende a subestimar sistemáticamente de forma importante para valores altos de irradiancia, por lo que la variante utilizada hasta ahora, LCIM1, es conveniente por su límite flexible en el rango de η que elimina este problema. En adición LCIM1 por su parte ha mostrado parámetros robustos anteriormente.

La variante LCIM3 muestra indicadores de desempeño iguales o apenas superiores a LCIM1, pero la ganancia de incluir una parametrización cuadrática no tiene impactos significativos en el desempeño del modelo actual.

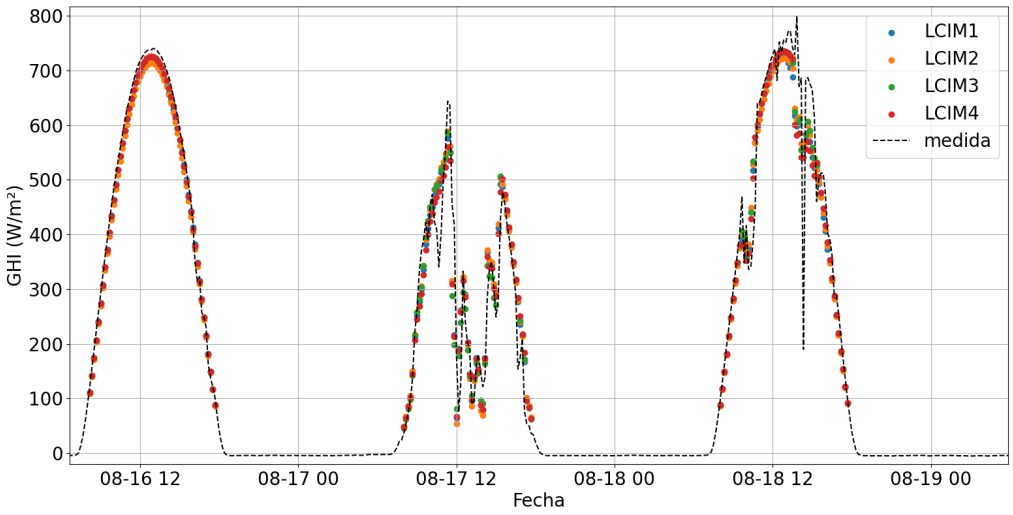


Figura 4: Serie temporal detallada para la estación de Salto. Se muestran tres días consecutivos, siendo el primero un día de cielo despejado.

Por último, la estrategia planteada para LCIM4 debería destacarse en condiciones de ausencia de nubosidad, sin embargo esto no se observa en los resultados obtenidos. El pobre desempeño de este modelo para k_{tp} >0.7 en relación a otras alternativas podría deberse a fallas en la selección de muestras de cielo despejado en la estructura del modelo, ya que el método de distinción utilizando únicamente F_R es perfectible. Para mejorar el desempeño de este modelo en general y en condiciones de ausencia de nubosidad se podría buscar un método más exacto para la selección de muestras claras, así como una mejora del modelo de cielo claro utilizado. Sin embargo, estas tareas son amplias y quedan por fuera del alcance del trabajo realizado.

Los resultados sugieren que una mejora en el modelado de la GHI debe abordarse desde un mayor detalle de la información satelital utilizada para el modelado del efecto de la nubosidad. Por ejemplo incorporando nueva información desde otros canales espectrales del satélite, o incorporando un tratamiento más profundo de la información de entrada en lo que respecta a fenómenos geométricos como el paralaje provocado por la altura de nubes y su desarrollo vertical.

REFERENCIAS

Alonso-Suárez, R. (2017). *Estimación del recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales*. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Tesis de Doctorado en Ingeniería.

Cano, D., Monget, J., Albuisson, M., Guillard, H., Regas, N., y Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37:31–39.

Laguarda, A. (2021). *Modelado de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre: Modelos físicos e híbridos utilizando información satelital sobre la Pampa Húmeda*. Tesis doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. PhD thesis in the Energy Engineer program.

Laguarda, A. y Abal, G. (2016). índice de turbidez de Linke a partir de irradiación solar global en Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20(ISSN 2314-1433):11.35–11.46.

Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2018). Modelo semi-empírico de irradiación solar global a partir de imágenes satelitales goes. En *Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar 2018*, Radiação Solar, pp. 1–9.

Laguarda, A., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2023). Improved estimation of hourly direct normal solar

irradiation (dni) using geostationary satellite visible channel images over moderate albedo areas. *Solar Energy*, 259:30–40.

Laguarda, A., Giacosa, G., Alonso-Suárez, R., y Abal, G. (2020). Performance of the site-adapted CAMS database and locally adjusted cloud index models for estimating global solar horizontal irradiation over the Pampa Húmeda region. *Solar Energy*, 199:295–307.

Laguarda, A., Iturbide, P., Orsi, X., Denegri, M. J., Luza, S., Burgos, L., Stern, V., y Alonso-Suárez, R. (2021). Validación de modelos satelitales Heliosat-4 y CIM-ESRA para la estimación de irradiancia solar en la P ampa Húmeda. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 48:1–9.

Linke, F. (1922). Transmissions-koeffizient und trubungsfaktor. *Meteoreorological Magazine Beitraege zur Physik der AtmosphaereBeitr*, 10:91–103.

Long, C. y Shi, Y. (2008). An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2:23–37.

McArthur, L. (2005). Baseline surface radiation network operations manual. Technical Report WCRP-121/ WMO TD-No. 1274, WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME - WMO.

Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., F., y Vignola (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73:307–317.

Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., y Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. *Solar Energy*, 45(2):111–114.

Perez, R., Schlemmer, J., Hemker, K., Kivalov, S., Kankiewicz, A., y Gueymard, C. (2015). Satellite-to-irradiance modeling - a new version of the SUNY model. En *42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 1–7.

Rigollier, C., Bauer, O., y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, 68(1):33–48.

Rigollier, C., Lefevre, M., y Wald, L. (2004). The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2):159–169.

Sarazola, I., Laguarda, A., Ceballos, J. C., y Alonso-Suárez, R. (2023). Benchmarking of modeled solar irradiation data in uruguay at a daily time scale. *IEEE Latin America Transactions*, 21(9):1040–1048.

Tarpley, J. (1979). Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 18(9):1172–1181.

ANALYSIS OF VARIANTS OF SEMI-EMPIRICAL LCIM SATELLITE MODEL FOR SURFACE SOLAR IRRADIANCE ESTIMATION: A CASE STUDY AT TWO SITES IN URUGUAY

ABSTRACT: Three variants for parameterizing the cloud attenuation factor in the LCIM satellite model for estimating surface solar irradiance are explored. The case study was conducted at two sites in Uruguay, Salto and Montevideo, using one year of irradiance measurements for training. The objective was to improve the empirical modeling of cloudiness while maintaining the simplicity and precision of the model. The results indicate that the variants do not show significant differences in estimation accuracy, with deviations of less than 1 %, dispersions below 15 %, and correlations above 0.97 in each case. The current model proved to be the most robust, especially under high irradiance conditions, while LCIM3, although showing similar performance, does not justify the additional complexity of a quadratic parameterization. LCIM4, designed to perform better under clear sky conditions, did not meet the expected performance, suggesting the need to improve the selection and modeling methods in these conditions. The results suggest that future improvements in solar irradiance modeling could benefit from greater integration of satellite information, including other spectral channels and a more detailed treatment of geometric phenomena such as parallax.

Keywords: solar irradiance, GHI, satellite estimation, Cloud Index, LCIM

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 356-368, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

RECONSTRUCCIÓN DE TRAYECTORIA Y ALIANZAS SOCIO-TÉCNICAS DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SANTA FE (2013-2020)

Jorge Chemes, Santiago Garrido[1], Pablo Bertinat[2], Ignacio Arraña[2]
Instituto de Estudios en Ciencia, Tecnología, Cultura y Desarrollo (CITECDE UNRN)
Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES UTN FRRo)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
chemesj@gmail.com

RESUMEN: Es creciente la presencia de la generación distribuida con energías renovables en agendas políticas, el desarrollo de normativas y programas de promoción. El sistema energético se está transformando hacia una combinación de sistemas de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, incentivado por la vulnerabilidad y las inseguridades asociadas con la infraestructura energética centralizada. En este marco, Santa Fe implementó entre 2013 y 2020 una serie de políticas públicas para desarrollar la generación distribuida. Mediante una metodología analítica descriptiva y explicativa se reconstruyen la trayectoria y alianzas socio-técnicas de la generación distribuida en Santa Fe, dando cuenta de las dinámicas de inclusión y exclusión que generó como así también muestra el sesgo determinista tecnológico que se le imprime a la generación distribuida para democratizar la energía.

Palabras clave: Transición energética, generación distribuida, trayectoria socio-técnica, alianza socio-técnica.

INTRODUCCION

En los últimos veinte años, muchos países de América Latina (AL) avanzaron con políticas públicas que buscaron delinear procesos de transición energética. En las narrativas de estos procesos aparece de forma destacada la generación distribuida con energías renovables (GDER), de hecho, el factor solar distribuido (FSD) en AL es de 50%, con un notable crecimiento en los últimos años; siendo Barbados el país con mayor FSD 90% y Brasil en cuarto lugar con 72% (Onterra, 2024).

El objetivo de este trabajo es realizar una reconstrucción analítica descriptiva y explicativa de las políticas públicas de GDER implementadas en Santa Fe en el período 2013-2020 con el fin de comprender la heterogeneidad actores, artefactos y relaciones que intervinieron en las políticas públicas de GDER en Santa Fe del período en estudio.

Entre los principales aportes al estudio de dinámicas de GDER se encuentran los de David Hess (2013, 2016) en Estados Unidos. Hess (2016) estudia las disputas de poder entre distintos intereses, da cuenta cómo en algunos casos existe resistencia por parte de las empresas de servicios públicos al avance de la GDER y el rol importante que establecen las estrategias de incidencias políticas como así también las normativas y reglamentaciones.

Son escasos los trabajos que existen desde las ciencias sociales en relación con el tema en Argentina. Garrido (2018) analiza desde una perspectiva socio-técnica un caso piloto de GDER en la provincia de Santa Fe, allí da cuenta del potencial que poseen las dinámicas participativas en la elaboración de

1 IESCT-UNQ-CICBA, CONICET

2 OES UTN

proyectos cooperativos de energías renovables. Existe una serie de investigaciones desde perspectivas técnicas en cuanto al comportamiento de las redes eléctricas (Piumetto, 2016), económicos (Arraña et al., 2015; Sergent, 2018), legislativos (Goldfarb, 2020) o como modelos de desarrollo pos fósiles (Kazimierski, 2020). Arraña et al. (2015) concluyen a partir del estudio de implementación de GDER en la provincia de Santa Fe que es importante contar con incentivos diferenciados para iniciar políticas de generación distribuida y en este sentido Goldfarb (2020) reconstruye la aparición de distintas normativas y leyes que aportan al desarrollo de la GDER, resaltando el rol de agente de fomento y regulador por parte del Estado. Del mismo modo lo realiza el trabajo descriptivo de Videla et. al (2023), realizando un detallado desglose de normativas provinciales en Argentina.
Recientemente se han presentado tesis de maestría y doctorado que abordan la generación distribuida en un marco más general de políticas de energías renovables, tratando el caso Santa Fe entre otros, sin profundizar en el caso provincial, siendo principalmente estudios descriptivos, estas investigaciones son desde el desarrollo tecnológico (Ochoa Di Masi, 2018) y desde su relación con la transición energética y el poder (Kazimierski, 2023). Otras investigaciones de Kazimierski (2021) y Ochoa y Magar (2023) también abordan el potencial de democratización de la GDER en Argentina y México respectivamente. También a nivel internacional recientemente se publicó un trabajo de *transnational institute* (Steinfort y Angel, 2023) que resalta ciertos sesgos respecto a la generación distribuida y su relación con las nociones relacionadas a la democratización de la transición energética.

MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

En lo que respecta a la pluralidad de miradas del marco de los estudios en Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS), el trabajo se centra en el análisis socio-técnico de la tecnología, particularmente desde una perspectiva constructivista. El abordaje propuesto, se basa en una matriz conceptual en donde se busca comprender la multidimensionalidad del objeto de estudio. Este enfoque, apunta a evitar los reduccionismos monocausales derivados de los abordajes deterministas sociales o tecnológicos (Thomas, 2008).

Dentro del análisis socio-técnico las dinámicas de cambio tecnológico son abordadas como procesos de co-construcción socio-técnica (Thomas, 2008; y Thomas y Santos, 2015). Donde las alteraciones en alguno de los elementos heterogéneos constitutivos de un ensamble socio-técnico generan cambios tanto en el sentido y funcionamiento de una tecnología como en las relaciones sociales vinculadas. Por lo tanto, artefactos, conocimientos, prácticas, formas de organización, actores humanos y relaciones sociales se encuentran atravesados por relaciones de co-construcción socio-técnica.

En este trabajo, los procesos de co-construcción socio-técnica son abordados de manera diacrónica como trayectorias socio-técnicas. Una trayectoria socio-técnica (Thomas, 1999) es un proceso de co-evolución de productos, procesos productivos y organizaciones, instituciones, relaciones usuario-productor, relaciones problema-solución, procesos de construcción de "funcionamiento" de una tecnología, racionalidades, políticas y estrategias de actores. Este concepto permite ordenar relaciones causales entre elementos heterogéneos en secuencias temporales (Thomas, et al., 2003). La re-construcción de trayectorias socio-técnicas locales permite superar las limitaciones de enfoques que relacionan, de forma descriptiva y estática, a los "fenómenos" con sus "entornos".

El dispositivo metodológico de este marco proporciona además la articulación de la alianza socio-técnica, entendida como una coalición de elementos heterogéneos implicados en el proceso de construcción de funcionamiento–no funcionamiento de un artefacto o una tecnología. Es, asimismo, el resultado de un movimiento de alineación y coordinación de artefactos, ideologías, regulaciones, conocimientos, instituciones, actores sociales, recursos económicos, condiciones ambientales, materiales, etc. que viabilizan o impiden la estabilización de la adecuación socio-técnica de un artefacto o una tecnología y la asignación de sentido de funcionamiento (Thomas y Fressoli, 2009). Este abordaje permite reconstruir los diferentes usos y formas de funcionamiento que los actores le otorgan a los mismos conocimientos y artefactos. Así, un grupo social relevante (GSR) se compone de actores y/o instituciones (singulares o colectivos/as) que asignan el mismo sentido a una tecnología, diferenciándose de otros, que asignan otros sentidos (Bijker y Pinch, 1987)

Se adoptó como estrategia metodológica el estudio de caso, ya que debido a su carácter particularista permite descubrir y analizar situaciones únicas, brindando una detallada descripción cualitativa. El método de estudio de caso permite retener las características significativas y holísticas de los acontecimientos (Stake, 2005). Además Lazzarini (1997) afirma que el estudio de caso o el estudio de caso múltiple son los métodos más apropiados para el estudio de eventos contemporáneos y puede ser, incluso, más poderoso que un análisis histórico.

Las principales técnicas de recolección de información fueron, por un lado, entrevistas en profundidad (Scribano, 2008) y semi-estructuradas. Por otro lado, se utilizó el análisis exploratorio y descriptivo de diversos tipos de documentos. De este modo, se realizaron entrevistas semiestructuradas a personal jerárquico y subalterno de la ex Secretaría de Estado de la Energía de Santa Fe (SEE). También fue entrevistado personal de la empresa provincial de la energía (EPE), empresas, organizaciones no gubernamentales y expertos. Referido a las fuentes documentales se atendió principalmente a informes, normativas y resoluciones técnicas.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA CON ENERGÍAS RENOVABLES EN SANTA FE

La historia legal de las energías renovables en Santa Fe tiene como principales antecedentes la sanción de la Ley Provincial Nº 12 503 de 2005 (Gobierno de Santa Fe, 2005) y la Ley Provincial Nº 12 692 de 2006 (Gobierno de Santa Fe, 2006). Esta última normativa, en su artículo 11, establecía un cargo fijo por usuario de energía eléctrica, ajustable al precio de la tarifa eléctrica de la Empresa Provincial de la Energía (EPE), para la promoción y la financiación de proyectos de producción de energías renovables. Este cargo era establecido por usuario y no por cantidad de energía consumida o por potencia instalada. Esta ley fue reglamentada en 2012 a través del Decreto Nº 2644 (Gobierno de Santa Fe, 2012) Asimismo, un año antes, en 2011, mediante la Ley Provincial Nº 13 240, se había creado la Secretaría de Estado de la Energía (SEE) y con ella la Sub Secretaría de Energías Renovables (SSER).

Primeros pasos para un procedimiento santafesino de interconexión (2013-2016)
En 2013, mediante la resolución 442 de la EPE (EPE, 2013b) se instrumentó el "Procedimiento para el tratamiento de solicitudes de generación en isla o en paralelo con la red" (PRO 103-101) (EPE, 2013a). Esta norma complementaba la resolución 264 de 2008 que regulaba la conexión en isla de generación o autogeneración de grandes usuarios de energía. El PRO 103-101, incorporaba las energías renovables y su posible conexión en paralelo con la red a pequeños usuarios.

El PRO 103-101, en sus anexos consideraba dos aspectos, por un lado la conexión en isla de sistemas de generación y por otro la generación conectada en paralelo. En este último, las opciones se instrumentaban por potencia y ello determinaba el tipo de protecciones que se debían incorporar para ser habilitada una instalación. Previo a la aprobación del PRO 103-101, la EPE analizó diversas normativas mundiales de GDER, principalmente europeas. A partir de este estudio y las demandas del Sindicato de Luz y Fuerza, se decidió implementar un transformador de aislación galvánica, para disminuir la probabilidad de accidentes eléctricos. En este mismo sentido, se estableció la exigencia de protección anti isla para los inversores de tensión, por tal motivo el sistema de energías renovables no brinda servicio de electricidad ante un corte de energía eléctrica. No menos importante, y un elemento que trajo controversias, son las normas que exigieron a los inversores para ser aprobados para la interconexión en paralelo, ya que, en una primera instancia, el PRO 103-101 se circunscribía a algunas normativas, dejando gran parte del mercado de inversores existentes en Argentina (importados) fuera de la posibilidad de ser aprobados, y de este modo tener que adquirir inversores de tensión que se fabricaban en Alemania o Estados Unidos.

El modelo que implementó el PRO103-101 es del tipo *net billing* (NB). Es decir, netea la energía con una conversión al costo de la energía consumida a precio minorista y con un costo a precio mayorista para la generación renovable. Este sistema era sumamente desfavorable desde el punto de vista del retorno de la inversión del sistema de energías renovables, más aún en ese momento histórico en Argentina, donde desde comienzos del siglo XXI, debido a las crisis económicas, el país contaba con un importante subsidio a la energía para el usuario final que en el orden nacional representaba el 2,9%

del PBI para el año 2014 (Murras et al., 2015). En este contexto, entre el año 2013 y 2015 solo habían solicitado conexión a la red de energías renovables cinco usuarios.

En términos técnicos, el PRO 103-101 requería la incorporación de un doble medidor de energía en el pilar de las instalaciones. Uno de esos medidores era bidireccional, mientras que el restante era unidireccional. Esta condición era necesaria para poder implementar el modelo tipo *net billing*, es decir, para lograr discriminar exclusivamente la energía generada. Esta situación de doble medidor requiere que exista un cableado desde la generación hasta el pilar de medición. Normalmente este cableado es extenso, más aún si es una instalación rural. Además, se debía realizar una modificación de mampostería en el pilar si la instalación se realizaba en una propiedad previamente construida.

Debates y controversias sobre el PRO 103-101.
Por los motivos antes descriptos, la organización Taller Ecologista (Arraña et al., 2015), en relación con investigadores del OES-UTN, presentaron un trabajo que daba cuenta del extenso período de amortización (98 años) bajo la modalidad NB que implementa el PRO 103-101. Este informe habilitó el debate entre distintos actores locales, EPE, SSER, académicos, miembros de IRESUD y empresas. Los debates se daban de forma presencial grupal, organizados por la ONG Taller Ecologista y también en reuniones bilaterales entre los diversos actores. Los principales ejes se centraban en: la exigencia redundante de protecciones eléctricas que incluía el PRO 103-101, derivado de lo anterior, los pocos inversores de tensión que habilitaba, principalmente de primeras marcas europeas, el modelo de tipo *net billing* y con ello el uso de doble medidor para el registro de la energía y la conexión en el tablero pilar y relacionado a lo anterior, fuertes e intensos debates relacionados al valor agregado de distribución (VAD), esta variable es eje central de debate hasta la actualidad en todas las normativas del país y también en otras partes del mundo.

Generalmente, en las reuniones donde se debatían los ítems descriptos anteriormente, la centralidad la tomaba la empresa distribuidora, donde la misma imponía su trayectoria técnica, jerarquizando el conocimiento técnico específico por sobre otros saberes ante la heterogeneidad de actores. En palabras de los actores entrevistados, se apelaba a la noción de "en palabras lo que dicen está muy lindo", pero "técnicamente no saben, y eso no se puede hacer". Otro elemento clave que se destaca son las opiniones encontradas dentro de la propia distribuidora, en reuniones grupales existía una opinión homogénea por parte de los representantes de la empresa; mientras que en reuniones bilaterales solo con una persona de la empresa, se expresaban en dirección contraria a la opinión empresarial.

En la Figura 1 se observa la alianza socio-técnica donde la EPE y los debates referidos a la seguridad de los trabajadores en relación con la protección galvánica alinean el modelo de GDER. Del mismo modo la posibilidad de que la distribuidora pueda mantener su rentabilidad a partir del cobro del VAD alinea la reglamentación para un modelo de reconocimiento del tipo *net billing* y la obligatoriedad de tener que instalar dos medidores de energía. Como así también, la creación de la SSER y el rol activo por parte de la sociedad y el proyecto IRESUD alinean a la EPE para crear el PRO 103-101. También posee un rol destacable el informe técnico que mostró la dificultad de amortización de los sistemas de GDER.

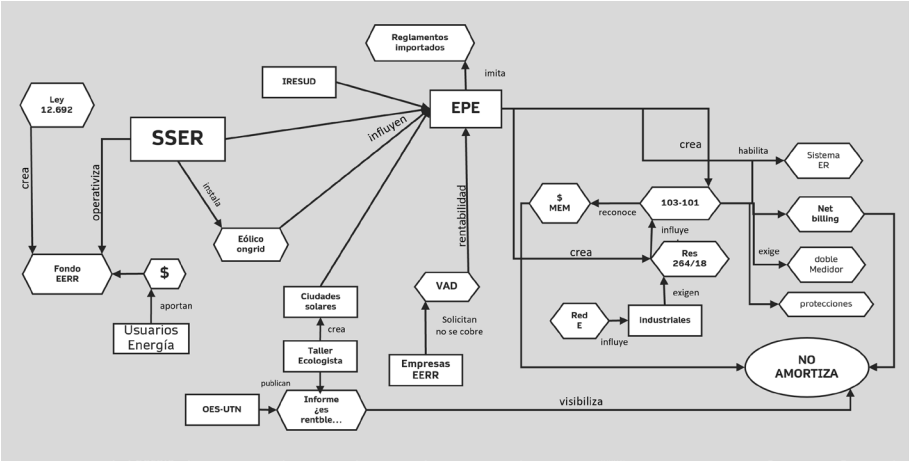


Figura 1: Alianza socio-técnica de la etapa PRO103-101, fase 0. Elaboración propia

Durante el año 2015 suceden varios hitos relacionados a la GDER; entre 2013 y 2015, como ya se mencionó, se sumaron más provincias a tener su propio marco de interconexión a la red para energías renovables, en algunos casos imitando la trayectoria santafesina. El tema ya no solo estaba en la agenda política y socioambiental, sino también en los debates técnicos, por tal motivo la Asociación Electrotécnica Argentina lanza la reglamentación AEA 90 364-7-712 (AEA, 2015) que brinda condiciones técnicas para la instalación de sistemas solares. También, en el mismo año inicia el proyecto "Generación distribuida con Energías Renovables. Aportes tecnológicos, sociales, ambientales y económicos de su aplicación en la Red Inteligente de Armstrong" (PRIER) financiado, por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, mediante un programa del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC).

En el año 2016, y luego de todos los sucesos acontecidos durante el año anterior, la SSER por su cuenta y sin convocar instancias participativas, solicitó, a un consultor económico de la Universidad Nacional de Rosario, la confección de un informe que analizó las condiciones de un precio preferencia de la energía que permitiera que la instalación de un sistema solar fotovoltaico se amortice entre 6 y 8 años. Así, durante el primer trimestre de 2016, la SSER contaba con parte de los actores vinculados a la GDER movilizados por los tiempos de amortización y con un estudio técnico que determinaba que con un modelo de precio preferencial de la energía (FiT bruto) de 5,5 $/kWh inyectado[3] se lograba una amortización entre 6 y 8 años dependiendo de variables técnicas de la instalación solar fotovoltaica.

El programa PROSUMIDORES (2016-2018).

El 30 de junio de 2016, mediante el Decreto Nº 1564 (Gobierno de Santa Fe, 2016) se lanzó el programa PROSUMIDORES orientado a pequeñas demandas residenciales urbanas y rurales de la EPE, brindando posibilidad de adhesión a las cooperativas eléctricas de la provincia y priorizando proyectos provenientes del norte de la provincia, situación donde la calidad de servicio es inferior al resto de la provincia y simultáneamente con mejores niveles de radiación solar. El programa instauró un modelo FiT bruto que pagaba 5,5 $/kWh inyectado durante un período de 8 años[4] y luego de ese plazo se continuaba con el sistema NB establecido por el PRO 103-101. Además de estas condiciones, también imponía un límite de energía inyectada, hasta el 80% del consumo anual, con el fin de que no se convierta solo en un negocio para poder comercializar energía a un precio preferencial. Esta situación de límite del 80% también iba en desmedro de políticas de eficiencia energética (EE) que un hogar pudiera implementar, ya que si bajaba su consumo por EE podría superar ese porcentaje de 80% y perder los beneficios del programa, ya que aquel PROSUMIDOR que pasara tres meses consecutivos una generación del 80% perdía los beneficios del programa. Además de estas dos condiciones, también existía un cupo máximo de 100 prosumidores por año. Otra restricción era que la potencia máxima del inversor de tensión sea de 1,5 kW, de este modo se limitaba a instalaciones hogareñas por la potencia permitida. Estos elementos fueron implementados por un lado para controlar los fondos que se ponían a disposición para el programa, pero por otro, y de mayor importancia, era

3 Con la totalidad de la energía generada inyectada, es decir, sin contemplar autoconsumo.

4 5,5 $/kWh fijos durante los 8 años.

para conformar a la distribuidora, con el objeto de que el programa sea un proyecto piloto, con baja potencia de GDER incorporada a la red y con puntos de generación de muy baja potencia.

La composición final de la tarifa que recibía un prosumidor se conformaba de dos partes, por un lado, un aporte de la EPE proveniente del modelo NB que instauró el PRO 103-101 y otro aporte lo hacía la SSEE, el monto sería el necesario para llegar a los 5,5 $/kWh y cuyos incentivos provenían del fondo para energías renovables que establecía el artículo 11 de la Ley Provincial Nº 12 692. Se destaca que en este período no se implementaron mecanismos de financiamiento específicos para acceder al programa.

En el año 2016, el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), emitió la norma IRAM 210 013: Inversores para conexión a la red de distribución – Requisitos generales (2016). Situación que, utilizada por la SSER, empresarios y académicos, apaciguó los debates respecto a los inversores que aprobaba la EPE para poder conectarse en paralelo con la red de distribución, ampliando de este modo la posibilidad de marcas, varias de fabricación china a un precio menor que europeas y estadounidenses. La evolución del número de instalaciones fue incrementándose de 6 en 2014, 23 en 2016 a 197 en 2018 (EPE, 2018).

Para el año 2017, la SSER implementó un programa de capacitación dirigido a electricistas con el fin de que más personas aprendan a instalar sistemas solares fotovoltaicos. Las capacitaciones fueron financiadas por la SSER y ejecutadas por un equipo de profesionales del OES-UTN y realizadas en todo el territorio de la provincia de Santa Fe. Según los docentes, en las jornadas se encontraban, en su mayoría, con personas que no eran electricistas; en algunos casos docentes de escuelas técnicas secundarias, entusiastas ambientales, interesados en hacer una instalación propia, público en general, entre otros, durante el año 2017 se realizaron cinco capacitaciones.

En 2017, también se inauguró el laboratorio de ensayos de calidad de inversores en la CNEA (Energía Estratégica, 2017), instrumento que junto a la norma IRAM 210 013 antes mencionada completan un respaldo para ampliar la cantidad de inversores de tensión que la EPE admitirá en relación al PRO 103-101 para habilitar sistemas conectados a la red. En este mismo año, los primeros prosumidores, que fueron ingresados durante el 2016, recibieron su primera facturación eléctrica donde daba cuenta de la medición de energía generada por el sistema solar y con ello el reconocimiento monetario; casi después de un año se regularizó y comenzó a funcionar fluidamente la recepción de dinero y facturación eléctrica. Inicialmente todos los prosumidores recibían la recompensa económica mediante el estipendio de un cheque.

Sobre finales del año 2017 se aprobó la Ley Nacional Nº 27 424, a la que Santa Fe decidió no adherir, alegando que se entrometía “en la soberanía energética de la provincia”, ya que la misma imponía un sistema *net metering* (NM) para autoconsumo y NB para inyección a la red con un solo medidor de energía bidireccional; además proponía que el modelo local santafesino “era sumamente superior al modelo propuesto por la ley nacional”. Durante el período 2017-2019 se produjeron devaluaciones de la moneda nacional que afectaron considerablemente la amortización de los sistemas fotovoltaicos bajo el régimen PROSUMIDORES, ya que el Decreto Nº 1564 instauraba un FiT fijo de 5,5 $/kWh.

Entre los años 2017 y 2018 se intensificaron la cantidad de capacitaciones brindada por los mismos actores y con la misma diversidad y falencia de participación. Uno de los principales reclamos al programa PROSUMIDORES era la dificultad de presentar los trámites en dependencias de EPE, y el desconocimiento por parte de empleados por fuera de las ciudades principales de la provincia. También, que las oficinas de la SSER de encontraba en Rosario y hacía engorroso la presentación presencial de los trámites. Otro elemento que se ha destacado era la demora del tiempo de habilitación de las instalaciones de 3 a 6 meses, situación que, por las corridas cambiarias, podía modificar el monto de inversión de un interesado, además de crear una incertidumbre en la espera relacionada a la continuidad del programa.

El nuevo presidente de la EPE, en 2018 crea una dependencia de energías renovables, con personal técnico específicamente abocado a cuestiones relacionadas a esta temática. Previo a esta instancia, las

conexiones y habilitaciones de PROSUMIDORES la realizaba personal que tenía otras tareas y que se le habían adicionado las habilitaciones de instalaciones de energías renovables. Esta nueva área de energías renovables dentro de la EPE, entre otras cuestiones comienza lentamente a bajar el tiempo de habilitación de las interconexiones.

Con un sistema fotovoltaico de 1,5 kW de potencia se cubre aproximadamente el 80% de la energía demandada por un grupo familiar de aproximadamente cuatro personas. Entre 2017/18 este tipo de sistema costaba aproximadamente USD 3500 (materiales e instalación en una vivienda urbana). Una inversión considerable, por tal motivo podían acceder al programa quienes disponían de esa capacidad de inversión. No era el único impedimento poder invertir, sino también debía tener una buena exposición solar (acceso al sol) o disponibilidad de espacio físico para disponer los artefactos. En algunos casos, quien poseía esa capacidad de inversión, no era propietario del sitio donde vivía y le resultaba engorroso hacer la instalación para luego retirarla (en caso de mudanza), o el dueño de la propiedad no le permitía hacer una intervención civil en el techo de la vivienda. Estas situaciones generaban una serie de excluidos del programa PROSUMIDORES, familias que aportaban a un fondo común para las energías renovables (por la Ley 12 692), pero que se veían imposibilitadas de acceder a los beneficios de una política pública que promovía estas energías. También estaban excluidos usuarios de cooperativas eléctricas, ya que durante este período solo se sumó la CELAR de Armstrong y desde ya, otros excluidos eran todos aquellos usuarios de energía eléctrica que no eran residenciales.

También estaban excluidos implícitamente todos los artefactos de generación de energía renovable que no fueran sistemas fotovoltaicos. Ya que la escasa publicidad del momento solo se refería a esta tecnología solar. Respecto a ello, los secretarios de energías renovables refirieron que optaron por desarrollar en principio una cadena de valor y que el recurso solar posee mayor estabilidad de densidad energética que la energía eólica.

En la Figura 2 se plasma la alianza socio-técnica donde intervienen acciones, requerimientos, condicionantes, actores y tecnologías. De la fase anterior, se destaca el rol del informe presentado por Taller Ecologista y OES-UTN en el año 2015 sobre las limitaciones del PRO 103-101, que junto al proyecto IRESUD logran influir en la SSER. Ésta a través de un estudio tecno económico y una clara decisión política tanto de gobernación como de los diferentes SecER logran instrumentar un programa de promoción de la GDER inédito en Argentina. También se destacan los arreglos de limitación de potencia que debieron establecer para permear la resistencia de la distribuidora antes las trabas técnicas que imponían como la estabilidad de la red ante una penetración considerable de energías renovables de baja potencia en la red. Esta política apaciguó los debates por el VAD en los vendedores/instaladores, ya que el tema seguía en agenda, pero con menor intensidad.

El objetivo principal de la SSER era dinamizar un sector inexistente (o muy minúsculo) en el mercado santafesino y no generar dinámicas de inclusión social a partir del uso de energías renovables. En este sentido el programa logró la creación de empresas dedicadas total o parcialmente a la energía solar, como así también fortalecer a las ya existentes. Es llamativo que la SSER no posea datos concretos de puestos de trabajos generados, fortalecimiento y/o crecimientos de las empresas preexistentes, lo que puede denotar la falta de consistencia respecto a los objetivos planteados. Lo único que observaban era como crecía la potencia instalada de sistemas fotovoltaicos y lo realizaban a partir de la información que les brindaba EPE derivado de los trámites aprobados.

En este último sentido, toma relevancia la falta de personal dedicado tanto en la SSER como en la EPE al programa PROSUMIDORES, además de la precarización laboral expresada por los empleados. Situación que complejizaba el seguimiento de un sector de servicios nuevo con múltiples variables en juego. Esta falta de personal y conocimiento respecto del programa se manifestó en el primer año en la falta de información, entrega de facturas y reconocimiento económico a los primeros adherentes al programa. Situaciones coyunturales como dinamizar un sector que posee un alto grado de artefactos importados, donde la devaluación de la moneda nacional juega un rol importante, quedó manifiesto en esta fase de estudio.

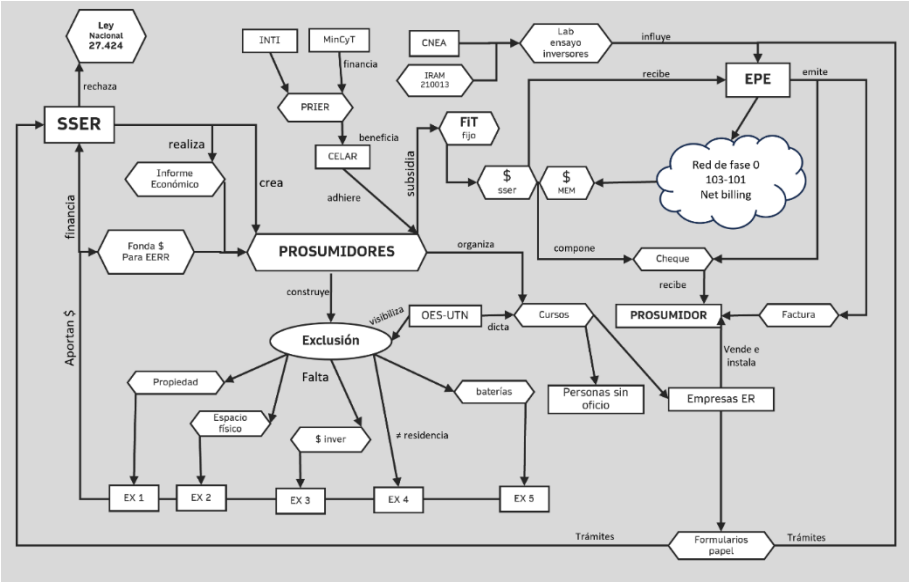


Figura 2: Alianza socio-técnica de la fase 1. Elaboración propia

También se destaca la representación y filiación que logró la política pública en las empresas santafesinas del sector, las mismas, en esta fase, se alinearon con la SSER defendiendo el programa provincial ante la aparición y supuestos beneficios de la Ley Nacional Nº 27 424 que no tuvo mayor presencia en el discurso de las empresas. En ningún caso, las empresas manifestaron malestar respecto a esta posición identitaria que tomó el gobierno de Santa Fe.

Finalmente, es importante mencionar el diseño de tipo *top-down,* cerrado y hermético de la política pública en esta fase. La SSER no convocó a actores con trayectoria en el sector para el diseño del programa, no obstante, el programa generó pertenencia en la mayoría de los GSR. Tampoco promovió grupalidad o comunidad respecto a los prosumidores que se fueron adhiriendo al programa. No se los puso en contacto, no se generaron vínculos, reuniones de trabajo, etcétera.

PROSUMIDORES 2020 (2018-2020).
El 28 de junio de 2018 se lanza el programa PROSUMIDORES 2020 (P2020) mediante el Decreto 1710/18 (Gobierno de Santa Fe, 2018), el mismo con validez hasta el 31 de diciembre de 2019. Este proceso también fue marcado por un diseño cerrado y hermético, más aún que la etapa anterior, ya que la fase 1 del programa fue acompañada por las dinámicas de reuniones respecto a las falencias del PRO 103-101; P2020 fue una sorpresa para la mayoría de los actores. El mismo implicó una inversión de $25 000 000[5] en el primer año y entre los principales cambios que se realizaron al programa original se encuentran: tarifa FiT ajustable cada 6 meses, incorporación de nuevos actores además del sector residencial y cada uno con límite de potencia diferenciado y un FiT diferenciado, brindaba un nuevo cupo con límite total de 500 kW para residenciales, 100 kW para rurales y 400 kW para el resto de los actores, dispuso una plataforma web para el registro, es decir digitaliza la tramitación y expedientes, esta nueva web centralizaba el proceso de capacitación con la creación de la "Academia de las renovables" y también disponía una lista de vendedores/instaladores capacitados en función de las distintas regiones de la provincia, habilitaba a los prosumidores de la primera etapa para que puedan pasarse a la modalidad de P2020 y percibir los nuevos beneficios. También se incorporaron más cooperativas eléctricas a P2020, aproximadamente treinta.

Por otro lado, también se intensificó la divulgación con presencia en redes sociales, como canal de *Youtube* donde emite una serie de publicidades animadas sobre el programa y brindando experiencia de otros prosumidores. En este sentido, se realizaron presentaciones públicas en todo el territorio provincial con elaboradas puestas en escena, emulando reuniones del tipo TEDx. Así se construyó la narrativa de "ENERGÍA MODELO SANTA FE"[6] para disputar sentido ante el avance territorial de la

5 USD 900.000 aproximadamente

6 http://energiamodelosantafe.com.ar/articulos/produmidores

Ley Nacional Nº 27 424. Finalmente, y muy importante, se implementaron mecanismos de financiamiento a través del Banco Municipal de Rosario, entre otros modos, con tasas de recupero de 6 años.

Durante el año 2019, la EPE realiza una modificación al PRO 103-101 (EPE, 2019), donde el principal cambio es sobre las protecciones eléctricas en sistemas de 15 kW, ello debido a que los inversores ya contaban con dichas protecciones internamente, el rol de la norma IRAM antes mencionada y el laboratorio de ensayo de calidad de inversores de CNEA fueron centrales para instrumentar la adecuación. Estas acciones tomadas por la SSER tuvieron un impacto concreto en el crecimiento de la potencia instalada en la provincia de Santa Fe, en la Figura 3 se observa el crecimiento exponencial a partir de P2020 y también en la figura se desagregan las conexiones en el marco del programa y fuera de él, tomando a partir de 2018 mayor porcentaje las instalaciones en el marco de P2020.

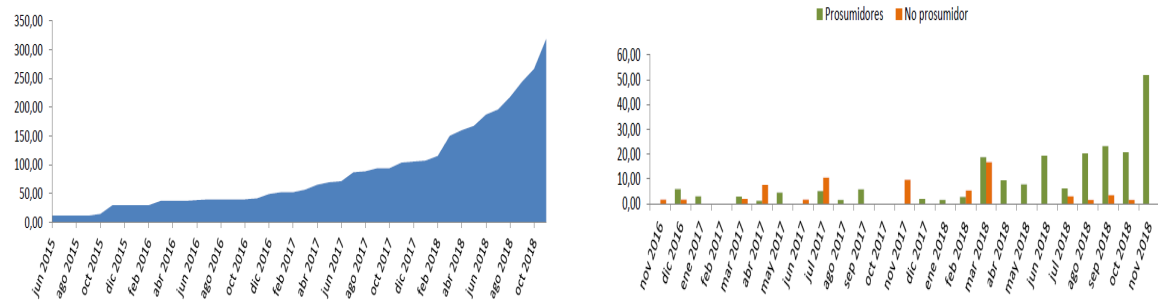


Figura 3: Crecimiento de potencia en kW instalado de GDER en Santa Fe. Fuente: (EPE, 2018, p. 5)

Otros aspectos relevantes de la fase P2020, es que las ciudades más pobladas de la provincia toman el protagonismo, a diferencia de la fase anterior, en la que Rosario no contaba con residencias adheridas al programa.

De forma unánime, todas las empresas entrevistadas resaltaron el rasgo positivo en la mejora del proceso de habilitación de P2020, siendo más ágil que la fase anterior. Ello aportado por la posibilidad de realizar los trámites de forma remota a través del nuevo sitio web. Fue resaltado por expertos y trabajadores de la SSER, la heterogeneidad de conocimientos técnicos que se encontraba al momento de revisar la información técnica presentada, como así también al momento de ejecutar las obras. Esto daba cuenta de la falta de exigencia de profesionalización respecto al tema, ya que no intervenía ningún colegio técnico en el proceso (por ejemplo, el colegio de ingenieros especialista). En este mismo sentido, la impresión de los capacitadores a cargo del programa daba cuenta que se perseguía incrementar la cantidad de personas capacitadas, aunque las mismas no fueran electricistas. Esta variable quedó manifiesta al momento del lanzamiento de "la academia de las renovables", donde se pasó de un cupo de 40 personas en un aula, a 400 personas en un teatro con una puesta en escena imponente.

Respecto a los excluidos del programa, P2020, logró incorporar gran cantidad de cooperativas eléctricas y también amplió el cupo a usuarios no residenciales. No obstante, respecto a los usuarios residenciales, el programa continuó con la misma lógica de no brindar posibilidades a otros actores tales como inquilinos, personas sin acceso al sol entre otros que fueron mencionadas en la fase anterior.

En esta fase fue importante la aceptación de nuevos inversores de tensión que habilitaba el PRO 103-101 como así también el rol estratégico de los cuadros políticos en la SSER y en la presidencia de la EPE que lograron alinear a parte de la distribuidora para poder aumentar las cuotas de potencia y con ello parte de las trabajas técnicas que implementaban en la fase 0 y fase 1 de la GDER en Santa Fe.

Los SecER destacaron como una falla del diseño de PROSUMIDORES que contemplaron un programa único para toda la extensión territorial de la provincia de Santa Fe. Principalmente un mismo FiT para toda la provincia. Para expertos en el sector, una de las principales fallas del proceso de

GDER en Santa Fe, fue no haber planificado una salida del modelo FiT. Este GSR destacaba que el mayor desafío de un modelo FiT es planificar la salida de la tarifa preferencial sin destruir la cadena de valor creada.

Con un mercado de energía solar fotovoltaica incipiente, en esta instancia, el problema para las empresas era que no podían incorporar acumulación (baterías eléctricas), ya que no lo habilitaba el PRO 103-101, y ello alejaba algunos clientes cuya inquietud era tener energía eléctrica en los momentos que el servicio comercial sufría interrupciones. Es decir, ya con un mercado en movimiento, la preocupación radicaba en cómo lograr nuevos clientes. No se puede pasar por alto que, en algunos casos, vendedores instalaban inversores de tensión híbridos (que habilitan la conexión de baterías), y luego de habilitada la instalación por la EPE, el vendedor incluía la batería en el sistema para brindar este servicio; claramente fuera de la reglamentación. Por este motivo y otros, la EPE comenzó a implementar inspecciones posteriores (luego de un año) a la habilitación de la instalación. Una de las principales razones por la cual en un modelo FiT, la acumulación puede ser contra producente es que una persona puede cargar una batería con energía que proviene de la red y paga una tarifa por ello, y luego vende esa energía a la red a un precio preferencial como si fuese generada por fuentes renovables. La posibilidad de fraude es crucial en el análisis de estas situaciones. En la Figura 4 se muestra la alianza socio-técnica de la fase 2.

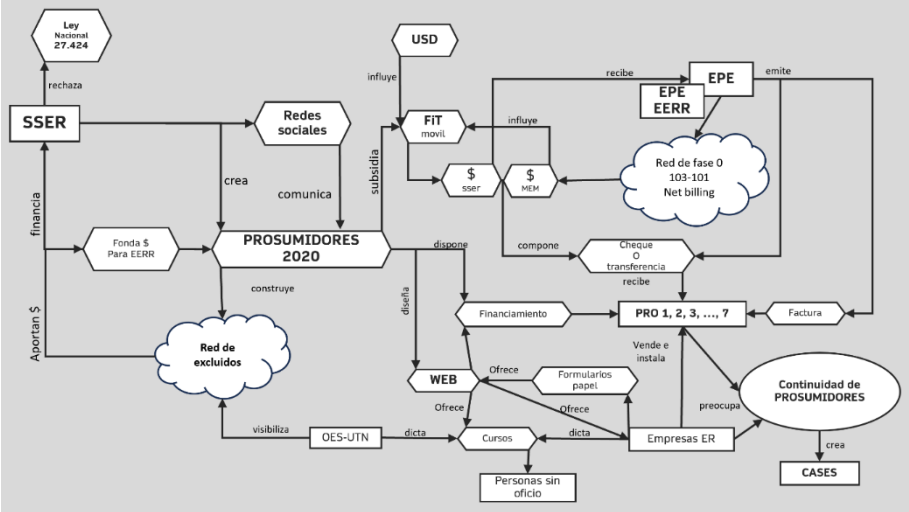


Figura 4: Alianza socio-técnica de la fase 2. Elaboración propia

CONSIDERACIONES FINALES.

En función a las re configuraciones de las alianzas socio-técnicas se constituyeron tres fases que dieron origen a las distintas versiones del programa PROSUMIDORES que marcó la impronta de la GDER en Santa Fe y el país durante 2013-2020. Las mismas fueron, fase cero referida entre 2013 y 2016, fase 1 que dio origen a PROSUMIDORES entre los años 2016 y 2018 y finalmente la fase 2 entre 2018 y el 19 de diciembre de 2019 donde se desarrolló PROSUMIDORES 2020. En la Figura 5 se sistematizan estas fases y las dinámicas que fueron aconteciendo.

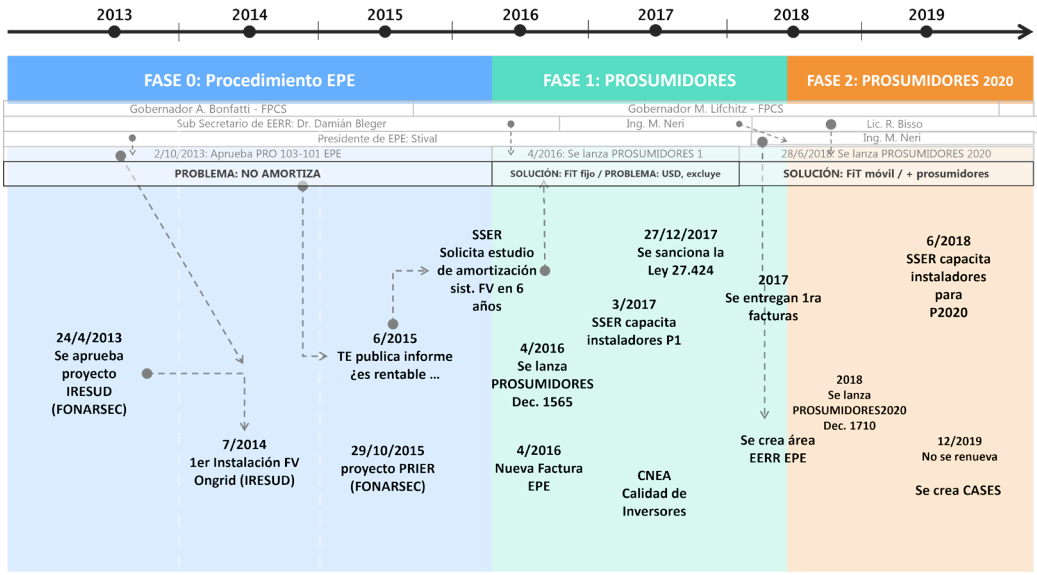


Figura 5: Trayectoria socio-técnica del período en estudio. Elaboración propia.

Se encontró similitudes con el trabajo realizado por Hess (2016) respecto a las resistencias de las distribuidoras para el desarrollo de la GDER. La distribuidora en Santa Fe, en la fase cero, alegando la pérdida del negocio y las disputas por el VAD fueron similares a las estrategias implementadas por la distribuidora de California durante 2013 y 2014 o por el Estado de Indiana en 2015. Estas mismas distribuidoras también utilizaron el mismo justificativo para no habilitar la acumulación en baterías. También, al igual que en Santa Fe, la distribuidora de California durante 2015 disputó los modos de medición y reconocimiento de la energía. El Estado de Hawai, como barrera a la GDER contraponía en 2013 los riesgos y seguridad de la red eléctrica. Michigan en 2015 planteó el reconocimiento de la energía entregada a la red a la tarifa del precio mayorista de la energía. En Virginia durante 2014 las distribuidoras intentaron cambiar las normativas de GDER.

Otro elemento que se destaca es cómo en algunas investigaciones se incurre en un sesgo de determinismo tecnológico, al otorgarle la agencia a la GDER de democratizar la energía. En esta investigación quedó manifiesto que no necesariamente la GDER imprime por sí una dinámica de inclusión social o de participación social en el diseño y toma de decisión de una política pública. Dependiendo del diseño la GDER puede ser un elemento más que incremente la brecha de desigualdades respecto al acceso a la energía, generando como es el caso de Santa Fe una dinámica de subsidios cruzados.

Esto última habilita la reflexión sobre la dificultad y falta de planificación en la salida de dinámicas tipo feed in tariff (FiT) o reconfiguraciones de las mismas para que atiendan diversos sectores. Ya que como se demostró, este modelo desarrolló el sector solar fotovoltaico en la provincia de Santa Fe, pero dejándolo vulnerable a la continuidad de esta política.

El marco teórico y metodologías implementadas demostraron el potencial para realizar una reconstrucción analítica descriptiva y explicativa de políticas públicas de GDER en Argentina. Resulta de interés a futuro analizar si otros modelos de GDER tales como los cooperativos, colaborativos o comunitarios implementados desde 2021 a la actualidad poseen la misma impronta de favorecer a sectores con capacidad de inversión o si los diseños de políticas públicas de GDER pueden concebirse de una lógica para el desarrollo inclusivo sustentable.

REFERENCIAS

AEA. (2015). Sistemas de suministro de energía mediante paneles solares fotovoltaicos (Arraña, I., Chemes, J., Koffman, L., Mori, C., y Saenz, J. (2015). ¿Es rentable inyectar energía fotovoltaica a red en santa fe?

Bijker, W., y Pinch, T. (1987). The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other.
Energía Estratégica. (2017, diciembre 28). Generación Distribuida: La importancia de realizar ensayos en los sistemas.
EPE. (2013a). Procedimiento para solicitudes de generación en isla o en paralelo con la red.
EPE. (2013b, octubre 2). Resolucion 442.
EPE. (2018). Informe mensual conexiones en paralelo con la red EPE.
EPE. (2019). Procedimiento para solicitudes de generación en isla o en paralelo con la red.
Garrido, S. (2018). Por un futuro sustentable y una gestión democrática de la energía": La experiencia de construir un sistema de generación alternativa en la ciudad de Armstrong, Argentina.
Gobierno de Santa Fe. (2005, diciembre 27). Ley 12503: Energías renovables alternativas
Gobierno de Santa Fe. (2006, diciembre 19). Ley 12.692: Ergías renovables, alternativas o blandas.
Gobierno de Santa Fe. (2012). Decreto No 2644.
Gobierno de Santa Fe. (2016, junio 30). decreto 1565—Programa PROSUMIDORES.pdf.
Gobierno de Santa Fe. (2018, junio 28). DECRETO 1710-18—Programa PROSUMIDORES 2020.pdf.
Goldfarb, M. A. (2020). Energías renovables y generación distribuida en Argentina: Aspectos regulatorios fomento e incentivos. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, 11(1),
Hess, D. (2013). Industrial fields and countervailing power: The transformation of distributed solar energy in the United States. Global Environmental Change, 23, 847-855.
Hess, D. (2016). The politics of niche-regime conflicts: Distributed solar energy in the United States.
IRAM. (2016). IRAM 210013: Inversores para conexión a la red de distribución
Kazimierski, M. A. (2020). La energía distribuida como modelo post-fósil en Argentina.
Kazimierski, M. A. (2021). Generación distribuida de energía renovable ¿una oportunidad para la desconcentración del sistema energético argentino? 5(2), 20.
Kazimierski, M. M. (2023). Transición, energía y poder. Una aproximación a las trayectorias y disputas detrás de la desfosilización, la generación renovable y su aprovechamiento distribuido en Argentina. Universidad de Buenos Aires.
Lazzarini, S. G. (1997). Estudos de caso para fins de pesquisa: Aplicabilidade e limitaçoes do método.
Murras, R., Melamud, A., R., y Einstoss, A. (2015). Los subsidios energéticos en argentina.
Ochoa Di Masi, B. (2018). Alcance de un modelo de generación distribuida de energías renovables integrada a la red eléctrica pública en la República Argentina.
Ochoa, R. G., y Magar, V. (2023). Generación de electricidad distribuida y renovable: Una opción para la democratización energética en México. En Transición energética justa y sustentable:
Onterra. (2024). GD y otros recursos energéticos en América Latina y el Caribe PERSPECTIVA 2024.
Piumetto, M. (2016). Estudio de las influencias y aportes de la generación distribuida para controlar y optimizar el funcionamiento de las Redes Eléctricas de Distribución
Scribano, A. (2008). Entrevista en profundidad. En El proceso de investigación social cualitativo. Prometeo.
Sergent, A. (2018). Generación distribuida: ¿En vísperas de una revolución copernicana? RADEHM Revista Argentina de Derecho de la Energía, Hidrocarburos y Minería, 187-196.
Stake, R. (2005). Investigación con estudio de casos. Morata.
Steinfort, L., y Angel, J. (2023). LOS MITOS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA El desmantelamiento de los seis mitos políticos que amenazan la descarbonización. TNI.
Videla, M., Krautner, A., Eyras, I., Durán, J., y Plá, J. (2023). Estado actual del desarrollo de la generación fotovoltaica distribuida en argentina. Ciencia e Investigación, 73(1), 54-71.

RECONSTRUCTION OF THE TRAJECTORY AND SOCIO-TECHNICAL ALLIANCES OF THE DISTRIBUTED GENERATION IN SANTA FE (2013-2020)

ABSTRACT: The use of renewable energy for distributed generation has become increasingly important in political agendas. This has been accompanied by the development of regulatory frameworks and promotional programs. The energy sector is transitioning to a combination of top-down and bottom-up systems, driven by the vulnerabilities and uncertainties associated with centralized energy infrastructure. In this context, the province of Santa Fe implemented a series of public policies between 2013 and 2020 to promote distributed generation. This study uses a descriptive, explanatory, and analytical methodology to reconstruct the trajectory and socio-technical alliances of distributed generation initiatives in Santa Fe taking into account the dynamics of inclusion and exclusion generated, and highlighting the technological and deterministic bias in the efforts to democratize energy through distributed generation.

Keywords: Energy transition, distributed generation, socio-technical trajectory, socio-technical alliance.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 369-380, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

COMUNIDADES ENERGÉTICAS EN ARGENTINA. RELEVAMIENTO DE NORMATIVAS Y PROYECTOS

Jorge Chemes, Santiago Garrido[1], Diego Aguiar, Pablo Rullo[2]
Instituto de Estudios en Ciencia, Tecnología, Cultura y Desarrollo (CITECDE UNRN)
Observatorio de Energía y Sustentabilidad (OES UTN FRRo)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
chemesj@gmail.com

RESUMEN: El avance de la generación distribuida con energías renovables en Argentina ha tomado en los últimos años un lugar en las agendas políticas y académicas, aunque ello no se ha visto plasmado en el avance de la potencia instalada, siendo Argentina uno de los países más retrasados en América Latina. No obstante, recientemente se ha dado un avance en marcos normativos para promover y desarrollar comunidades energéticas. El objetivo de este trabajo es mapear, caracterizar y analizar experiencias de comunidades energéticas desarrolladas en Argentina a partir de sistemas de generación distribuida con energías renovables. Se ha observado que cuatro provincias poseen marcos normativos al respecto y solo dos de ellas han implementado proyectos, por otro lado también hay dos provincias sin marco normativo pero con proyectos implementados. También se destaca el rol que están tomando las cooperativas eléctricas en Argentina para avanzar en la promoción de comunidades energéticas.

Palabras clave: comunidades energéticas, energías comunitarias, energía colaborativa, energía cooperativa

INTRODUCCION

En las últimas dos décadas, el avance hacia un proceso de transición energética se ha instalado como un objetivo a alcanzar en la mayoría de los países de América Latina bajo la influencia de un contexto global centrado en el cambio climático y que propone transformar los sistemas de generación, distribución y de consumo energético vigentes. Asimismo, el desarrollo de energías renovables es presentado como una alternativa superadora, no sólo en términos ambientales, sino también que ofrecen la posibilidad de nuevos modelos de desarrollo más democráticos e inclusivos. Una de las alternativas más relevantes en este sentido ha sido el impulso de sistemas de Generación Distribuida (GD). El concepto de GD se asocia en la mayoría de los casos con la producción de energía que se ubica próxima a los puntos de consumo (Ackerman *et al*., 2001). En particular, la GD basada en fuentes de Energía Renovable (GDER) tuvo un gran crecimiento en los últimos años a nivel mundial y en América Latina y el Caribe (REN21, 2022; Onterra, 2024).

El principal esquema bajo el cual se desarrolló la GDER es la de usuarios generadores individuales que son propietarios del sistema de generación eléctrica. Estos pueden ser proyectos de generación desarrollados por empresas, industrias, el Estado (a nivel nacional, provincial o municipal) o usuarios residenciales. Sin embargo, existen otros modelos de generación distribuida con el objeto de compartir la energía producida (GDERC), ya sea con fines privados, para uso comunitario o solidario; y estos modelos se pueden categorizar como energías con fines colaborativos o comunitarios. En estos casos, la generación de energía se comparte, se reparte, se dona, se gestiona o se co-gestiona. Este tipo de

1 IESCT-UNQ, CONICET

2 OES-UTN

modelo de propiedad variada (privada, co-propiedad, estatal, mixta o cooperativa) adquiere diferentes nombres que, con matices, dan cuenta de experiencias equivalentes y que para este trabajo agrupamos como Comunidades Energéticas (CEs).

El objetivo de este trabajo es mapear, caracterizar y analizar experiencias de GDERC o CEs desarrolladas en Argentina. Para ello, se propone realizar un mapeo de las diferentes políticas públicas y experiencias de comunidades energéticas existentes en el país, analizar los procesos de implementación en cada caso, y generar algunas reflexiones acerca del proceso de co-construcción de tecnologías, conocimientos, formación de recursos humanos especializados, políticas públicas y dinámicas de desarrollo productivo asociados a la implementación de sistemas GDERC.

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la sección *Discusión teórica* se presentan los principales conceptos y herramientas del marco teórico, luego se realiza un estado de la cuestión antes de dar lugar a la sección *Operación de una comunidad energética*, donde se desarrollan las ideas generales sobre la definición y caracterización de la CEs; en la sección *La GDERC en Argentina* se da un panorama detallado del recorrido de experiencias de GDERC en el país, el marco normativo existente a nivel nacional y provincial y un mapeo de estas experiencias en el territorio nacional. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones del trabajo.

DISCUSIÓN TEÓRICA

El discurso oficial sobre la transición energética en América Latina está centrado en un cambio de matriz energética en términos de sustitución de tecnologías y como región proveedora de materias primas para la transición energética del Norte Global (Siroit, 2024). De este modo, este tipo de interpretaciones (que además orienta la política pública) no tienen en cuenta otro tipo de aspectos que forman parte de los sistemas socio-técnicos.

Desde la década de 2000, los estudios sobre Transiciones a la Sustentabilidad, que proponen comprender los procesos de cambio en términos sistémicos combinando tecnologías, prácticas sociales, infraestructuras, regulaciones, mercados y valores culturales (Elzen y Wieczorek, 2005). En este trabajo, se propone utilizar algunos conceptos desarrollados en la perspectiva multinivel (*Multi-level perspective*-MLP) (Geels, 2011), principalmente la articulación de los conceptos de nicho, régimen socio-técnico y paisaje socio-técnico o *Landscape*. Los nichos, definidos como espacios protegidos en los que no operan las reglas convencionales de mercado, por lo tanto, se tratan de ámbitos que permiten desarrollar y experimentar con innovaciones radicales (basadas en principios de sustentabilidad, por ejemplo). Por otro lado, el concepto de régimen socio-técnico se refiere al conjunto de reglas e instituciones (formales e informales), valores culturales, prácticas sociales que operan en un sistema socio-técnico determinado. El paisaje socio-técnico se refiere a los elementos de gran escala que pueden influir y afectar la dinámica de los regímenes socio-técnicos y en los cuales los actores que participan en los procesos de cambio no tienen influencia. Los estudios realizados desde este enfoque entienden las transiciones como fruto de las interacciones entre estos tres niveles (Figura 1).

A lo largo de dos décadas, el campo de los estudios sobre transiciones ha crecido sostenidamente desarrollando múltiples trabajos de investigación sobre sectores clave como energía, agricultura, vivienda o transporte. En este marco se desarrollaron nuevos debates y reflexiones para profundizar en temas como las relaciones de poder en los procesos de transición, la gobernanza, equidad y justicia a nivel local, regional y global, entre otros (Avelino y Rotmans, 2009).

En este mismo sentido, una de las críticas que se le suelen realizar a los estudios de Transiciones es su excesivo apego a los modelos de la economía de la innovación fuertemente asociados a las dinámicas de mercado como única racionalidad. De este modo, la adopción de una nueva tecnología (como puede ser el caso de los sistemas de GDER) dependen de su éxito en términos de rentabilidad con relación a las tecnologías competidoras.

Como alternativa, algunos autores proponen explorar otras formas de innovación. En Seyfang y Smith (2007), los autores analizan las "*grassroots innovation*" como las innovaciones sociales desarrolladas a nivel comunitario como procesos de generación de soluciones *bottom-up* adecuadas a situaciones locales y basadas en intereses y valores de esas comunidades. Basados en esta definición, los autores proponen distinguir *grassroots innovation* orientadas al desarrollo local de las innovaciones dirigidas al mercado y la generación de ganancia.

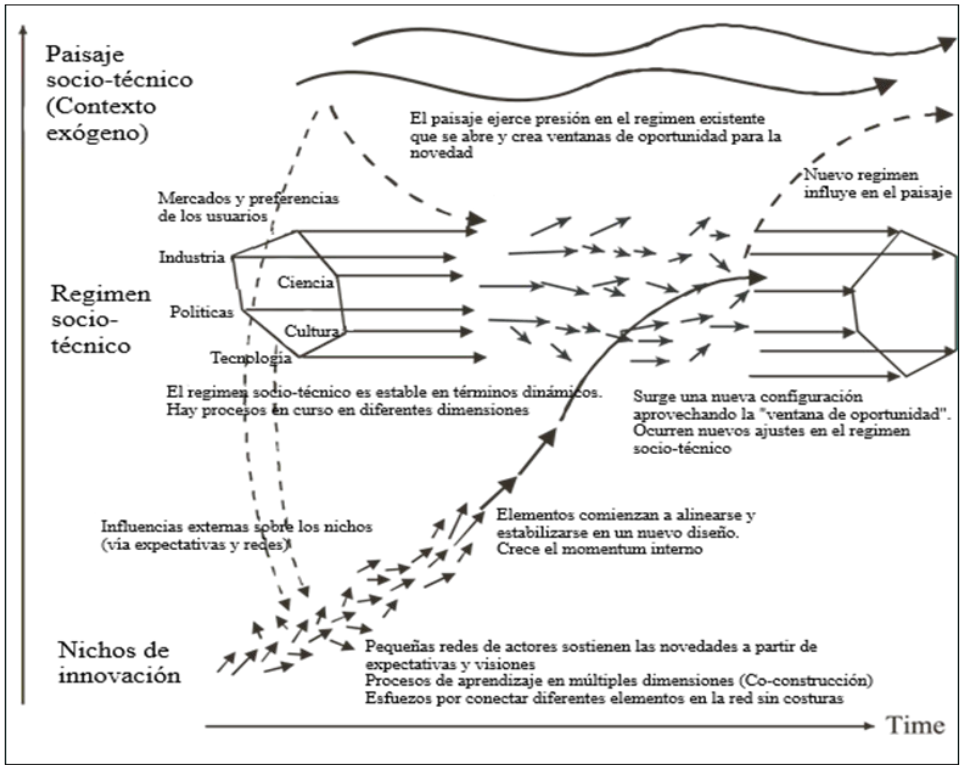


Figura 1: Transiciones a la sustentabilidad. Perspectiva multinivel. Fuente: Elaboración propia a partir de Geels y Schot (2007)

A su vez, en dicho trabajo se diferencia entre innovación convencional basada en las reglas de mercado y las *grassroots innovations* desarrolladas por mutuales, cooperativas y empresas sociales. Este tipo de innovaciones son desarrolladas en el marco de nichos en los que las reglas y los incentivos difieren de las reglas de mercado. Por esta razón, los autores enfatizan que estas instituciones son mucho más abiertas a procesos de experimentación y no tienen miedo a tomar mayores riesgos.

El concepto de transición energética y la implementación de sistemas de GDER fueron diseñados originalmente por y para los países desarrollados. En países como los de América Latina, llegaron como ejemplos a imitar. Por este motivo, es importante tener en cuenta que los procesos de adopción de tecnologías están usualmente atravesados por diversas tensiones entre los generadores y promotores de las tecnologías y los potenciales usuarios. Contrariamente a la noción de transferencia, que presume la identidad permanente de un artefacto, independientemente del escenario socio-histórico concreto en el que se lo inserta, la adecuación socio-técnica implica procesos de producción y de construcción social de la utilidad y funcionamiento de las tecnologías donde participan diferentes actores (usuarios, beneficiarios, funcionarios públicos, integrantes de ONG, etc.) (Thomas, 2009).

Para ajustar el foco analítico en este tipo de actores es necesario utilizar un modelo analítico-explicativo diferente para poder captar la heterogeneidad de estos diversos grupos de organizaciones y su rol en el proceso de producción de innovaciones. Tecnologías y sistemas son co-construidos con los usuarios y productores con los consumidores, los sistemas de producción y distribución con las regulaciones, y las empresas con su equipamiento tecnológico. Porque en el mismo proceso socio-técnico en el que las tecnologías son diseñadas, producidas y usadas, las

relaciones sociales de producción, de trabajo, de comunicación, de poder, de compartir, son construidas.

De este modo, la investigación se basa en una metodología cualitativa de estudio múltiple e instrumental de casos para analizar y comparar diferentes experiencias y la incidencia de políticas públicas y diseños institucionales en dichos procesos (Stake, 2005). Con el fin de alcanzar estos objetivos se desplegaron diferentes operaciones técnicas de investigación como el relevamiento y análisis de políticas públicas, relevamiento de fuentes primarias y secundarias, entrevistas en profundidad con *policymakers*, funcionarios/as de cooperativas y desarrolladores de proyectos.

ESTADO DEL ARTE

Si bien la GDERC o CEs en Argentina son muy recientes, el país cuenta con diversas trayectorias de cooperativas prestadoras de servicios eléctricos que además generan parte de su demanda con energías renovables. Diferentes trabajos analizaron algunas de estas experiencias desde un abordaje socio-técnico (Garrido, 2011; Garrido y Moreira, 2013). Asimismo, algunas de estas experiencias, como la desarrollada por la cooperativa eléctrica de Armstrong en el marco del proyecto PRIER, fueron analizadas en profundidad para comprender su potencial y dinámicas de desarrollo local que pueden tener la GDER en un marco cooperativo (Garrido, 2018). Por su parte, el equipo del Observatorio de Energía y Sustentabilidad de la Universidad Tecnológica Nacional (OES-UTN) estudió el mismo proyecto observando las dinámicas de participación ciudadana (Salerno et al., 2017). Cabe destacar que estos estudios no caracterizan los análisis en términos de comunidades energéticas. En Tandil, provincia de Buenos Aires se implementó un proyecto titulado Comunidades Energéticas I, Flensborg et. al (2023) lo mencionan en sus investigaciones sin profundizar en los pormenores del proyecto. Existen dos trabajos más recientes sobre el estudio de las comunidades energéticas, donde evalúan el marco normativo latinoamericano reciente (Martínez et al., 2023) y el potencial y experiencia en la provincia de Córdoba (Rodríguez y Anuzis, 2021).

En el marco latinoamericano la investigadora chilena Gloria Baigorrotegui ha desarrollado sustanciales aportes tanto de estudios de casos como en debates respecto a las formas de clasificar las comunidades energéticas (Baigorrotegui, 2018a, 2018b; 2019; 2021; Baigorrotegui y Chemes, 2023). Además, reportes estadísticos energéticos regionales ya desglosan como sector a las dinámicas CEs entre sus datos (Onterra, 2024).

Por otro lado, existe un amplio debate en el marco de las comunidades energéticas referido a las formas de definir y clasificar qué son y qué no las comunidades energéticas. En este sentido, y luego de un trabajo de bibliometría[3] (a partir de contemplar 3039 artículos publicados y capítulos de libros donde los mismos contengan en el título *community energy* o *energy communities* o *Consumer Co-Ownership* o *Energy sustainable communities)* se destaca que las investigaciones más relevantes en este sentido son las realizadas por Seyfang et. al (2013) y Koirola et. al (2016, 2018), donde en ambos casos desglosan ampliamente la posibilidad de clasificaciones, en la Figura 2 se aprecia un mapa de calor donde se resaltan las investigaciones más citadas.

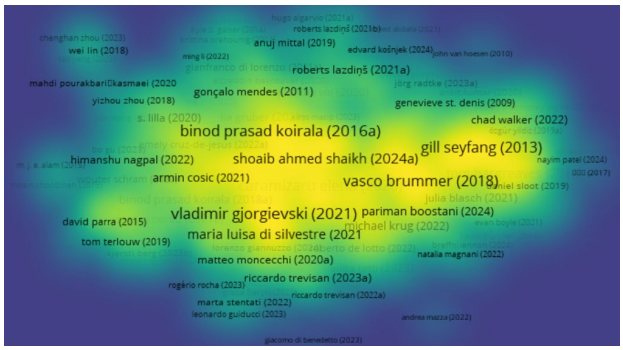


Figura 2: Mapa de calor bibliométrico contemplando investigaciones sobre comunidades energéticas.

3 Realizado con VOSviewer y la base de datos abierta OpenAlex

Según Seyfang (2013), a partir de cuantiosos estudios se da cuenta de la dificultad de catalogar estos proyectos de CEs en los comienzos de la década de 2010, resaltando su variabilidad en las definiciones y con ella la dificultad de precisar alcances. Con el paso del tiempo distintos organizamos han propuesto y estandarizado definiciones y/o alcances (WWEA, 2011; IRENA, 2018; Unión Europea, 2018; IRENA Coalition for Action, 2020, 2021; Revuelta, 2023). No obstante ello, en la actualidad sigue siendo un desafío la denominación de proyectos de GDER para compartir energía o CEs (Leonhardt et al., 2022) y de aquí la dificultad de pensar, de forma articulada, políticas públicas y mecanismos de fomento para dichas prácticas (Karytsas y Theodoropoulou, 2021). Tal es esta dificultad que existen debates e investigaciones respecto a las palabras y formas de concebir lo común (Atutxa y Zubero, 2019) y dónde está la idea de comunidad en las comunidades energéticas (Unnikrishnan, 2024). Por su parte, Hess (2013), a partir de estudiar distintas iniciativas en Estados Unidos, sistematiza cuatro posibilidades de organización para implementar proyectos con algún grado de asociativismo para la gestión de proyectos, estos son: 1) Sistemas públicos municipales 2) Sistemas de créditos PACE (*Property Assessed Clean Energy*) 3) Sistemas de cooperativas de generadores 4) Sistemas con financiamiento de terceros (alquiler de techos).

Solo cabe destacar que la gran mayoría de las definiciones y caracterizaciones de las comunidades energéticas provienen del Norte Global, para atender necesidades de esas sociedades. Si bien son recientes las diferentes categorías sobre las formas de organización para compartir energía (energías comunitarias, energía ciudadana, energía cooperativa, energía colaborativa, comunidades energéticas, entre otras); y con ellas la creación de distintas normativas o programas promocionales. El discurso dominante actual de la GDER para compartir energía se encuentra exclusivamente enfocado en la generación distribuida con energías renovables de electricidad y conectadas a la red, relacionada meramente con las infraestructuras de distribución de electricidad y con la energía solar fotovoltaica.

Las comunidades energéticas en América Latina, pre existentes a los debates y discursos dominantes de transición energética, se encuentran asociadas al desarrollo y el cuidado de la vida y las comunidades, las cooperativas de leñeros para obtener y distribuir biomasa, la gestión de redes eléctricas comunitarias (Pascual y Izzo, 2016), las cooperativas vecinales por fuera de las redes de transmisión nacionales (Garrido y Moreira, 2013: Vilas, 2014), la generación eléctrica minihidráulica y la gestión de redes de distribución de forma aislada a partir de la organización autónoma (Rativa Gaona y Cruz, 2022), entre otras formas y cosmovisiones previas al neocolonialismo eurocéntrico energético (Baigorrotegui y Chemes, 2023).

OPERACIÓN DE UNA COMUNIDAD ENERGÉTICA

A partir del análisis de distintas fuentes (Amigos de la Tierra et al., 2020; DGRV & IEP, 2020; GIZ, 2020; Gobierno de Córdoba, 2021; Gobierno de Santa Fe, 2021; Secretaría de Energía de la Nación, 2023) se puede sintetizar, como muestra la figura 3 que la GDERC puede concebirse a partir de la asociación de un grupo de personas (empresas, cooperativas o un municipio) para instalar una central de generación de energía renovable (cumplimentando las normativas respectivas en cuanto a potencia, energía, fuentes, etc.) en un sitio a convenir entre las partes interesadas; y la energía generada se asigna por cuota partes previamente acordadas entre los asociados.

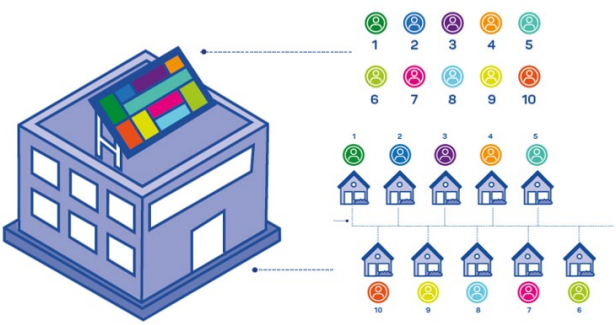


Figura 3: Asignación de cuota parte de participantes de una CE. Fuente: (Energía colectiva, 2023)

Este sistema de gestión de asignación de energía generada y compartida entre socios, lo realiza la distribuidora de energía comercial. Es importante aclarar que la energía que consumirá un socio (o cuotapartista) no es necesariamente la generada por la central instalada entre las partes. Sino que la misma inyecta energía a la red comercial, y el administrador de la red, la mide y le adjudicará a cada socio-usuario-generador una cantidad de energía convenida, es un equilibrio del sistema eléctrico comercial centralizado. También se destaca que los usuarios no necesariamente tienen que ser linderos, vivir en el mismo barrio o ciudad; lo indispensable es que sean atendidos por una misma distribuidora eléctrica (según la mayoría de las normativas). La instalación puede estar en el techo de una vivienda, en el galpón de una industria, en el terreno de uno de los participantes o un terreno/techo alquilado para tales fines.

A su vez, a esta dinámica de compartir energía se la puede gestionar por los modelos existentes de reconocimiento de energía generada: de balance neto (*net metering* o *net billing*), de tarifa preferencial (*feed in tariff*) o una combinación entre estos. De ello dependen las normativas aplicadas en cada región.

Las razones para optar por este tipo de organización con el objeto de compartir energía pueden ser diversas, ello dependiendo de factores como la región geográfica, la cercanía a redes de distribución, factores como el acceso al sol, ser o no propietario del hogar donde se reside, facilitar gestiones o inversiones, generar prácticas autogestivas y de participación democrática en torno a la energía, entre otras posibilidades que se abordarán a partir de las diferentes caracterizaciones que existen en las formas de compartir energía (Karytsas y Theodoropoulou, 2021).

Respecto a las formas de clasificar los modos de compartir energía existe un amplio debate como se mencionó anteriormente. No es objeto de este trabajo ahondar en las formas que adopta en Argentina esta clasificación, sino atender al desarrollo normativo existente y los proyectos ejecutados en este marco o previo a los mismos.

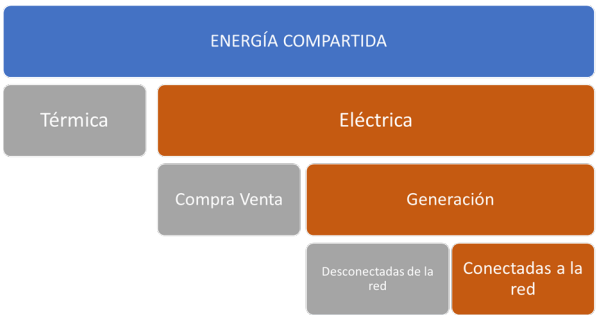


Figura 4: Estructura de fuentes y modos para compartir energía y beneficios.

Cabe destacar que CEs se pueden clasificar no solo por la generación o consumo de energía eléctrica, sino también de energía térmica. En lo que respecta a la parte eléctrica, pueden existir dinámicas de CEs solo para comprar o vender energía o para generar y autoconsumir energía eléctrica. En el segundo caso, se pueden encontrar sistemas aislados, no conectados a las redes comerciales, como ser el caso de poblaciones dispersas y también en sistemas conectados a la red. Aquí solo se atenderán a las CEs en Argentina conectadas a la red, en la Figura 4 se aprecia resaltado donde se enfoca la investigación.

LA GDERC EN ARGENTINA

En Argentina es muy reciente el desarrollo de marcos normativos que impulsan y promueven las comunidades energéticas, más allá que previamente al desarrollo de dichos marcos, hayan existido proyectos con la impronta de compartir energía. Son cuatro las provincias que iniciaron esta dinámica de promoción normativa, Mendoza lo reglamentó mediante la Ley 9084 en 2018 creando el usuario/generador “colectivo”. Por otro lado, la provincia de Córdoba reglamentó la figura de

"Generación distribuida comunitaria de energía renovable integrada a la red eléctrica" el 3 de Mayo de 2021 mediante la Resolución 01/2021 de la Secretaría de Biocombustibles y Energías Renovables; durante el mismo año avanzó en experiencias piloto a partir de la suscripción de convenios específicos, entre el Ministerio de Servicios Públicos de la provincia de Córdoba, ERSEP, EPEC y las federaciones FECESCOR y FACE. Recientemente, el 26 de junio de 2024 Córdoba aprobó la resolución 9/2024 donde adecúa y nomencla nuevos usuarios comunitarios y también genera la posibilidad de inter-jurisdicción respecto a la pertenencia de una única prestadora de servicio eléctrico para implementar una CE. En el caso de la provincia de Santa Fe, desde el 2021 está impulsando las CEs, inicialmente con el programa "ERA Energía Colaborativa" con su respectivo marco normativo Resolución 316/2021, y desde el cambio de gobierno, desde 2024 el programa PROSUMIDORES 4.0 mediante la Ley 14.259. Finalmente, Río Negro a través de la Ley Nº5617 crea la categoría de usuario generador colectivo.

Las provincias de Córdoba y Santa Fe son las únicas que implementaron proyectos de comunidades energéticas. Aunque en las provincias de Buenos Aires y Corrientes existen experiencias de proyectos bajo la impronta de comunidades energéticas sin que exista un marco normativo; ello fue posible debido a que se realizaron en localidades atendidas por cooperativas eléctricas, las que habilitaron dicha posibilidad.

Respecto a las experiencias de Santa Fe y Córdoba (ambas con marco normativo provincial) se resalta que poseen dos modelos diferentes de medición y reconocimiento de la energía para compartir. El caso de Córdoba utiliza el modelo Usuarios Generadores Comunitarios (UGC), aquí, toda la energía generada es dividida entre las partes según se estipule en la conformación de la sociedad (no necesariamente es en partes iguales, sino que puede ser en función al porcentaje de inversión u otro acuerdo) y el paquete energético es adjudicado a los usuarios, independientemente del horario en el que fue generada la energía. Es decir, no requiere un sistema de medición inteligente (que puede discriminar hora de consumo y hora de generación de energía), la curva de generación de energía y de consumo de energía no interactúan.

Por otro lado, Santa Fe utiliza el modelo de Usuarios Generadores Comunitarios Virtuales (UGCV). A diferencia del caso anterior, se requiere un sistema de medición de la energía inteligente y que pueda registrar el consumo y generación de energía en franjas horarias. De este modo, las curvas de generación y consumo de energía se relacionan, este sistema promueve el auto consumo. Cabe destacar que esta provincia tuvo problemas de habilitar instalaciones debido a la falta de ingreso de medidores inteligentes al mercado local por barreras en las importaciones; situación que luego de un tiempo fue salvada.

Finalmente, luego del desarrollo provincial, la Secretaría de Energía de Nación lanzó en el año 2023 la Resolución 608/23 de Generación Distribuida Comunitaria que complementa la Ley 27.424, generando de este modo un marco para todas las provincias adheridas y tomando como base las experiencias de Santa Fe y Córdoba, reconociendo de este modo los modelos UGC y UGCV y dicha resolución los define con las siguientes características:

UGC:

- Refiere a la conformación de un grupo de 2 o + usuarios con Puntos de Suministros diferentes.
- Demandas abastecidas por el mismo Distribuidor.
- Energía renovable podrá estar vinculado o no a alguno de los puntos de suministro de dichos usuarios.

UGCV:

- Conformación de un grupo de 2 o + usuarios con las mismas características que los Usuarios Generadores Comunitarios.
- Demanda e inyección total monitoreada en tiempo real.
- Balance entre las energías demandadas e inyectadas del sistema comunitario.
- Distinguir la inyección del autoconsumo total del conjunto de usuarios y valorizar la energía autoconsumida, demandada e inyectada de manera independiente.

En la tabla 1 se resumen las provincias, normativas y formas de llamar al usuario generador o la práctica de compartir energía. También se manifiesta la existencia de proyectos y el modelo de medición de energía requerido.

Tabla 1: Normativas provinciales y nacionales

Provincia	Año	Normativa	Categoría	Medición inteligente	Modo
Mendoza	2018	Ley 9084	UG colectivo	no especifica	no especifica
Córdoba	2021 2024	Res1/2021 Res9/2024	GD comunitaria	No	UGC
Santa Fe	2021 2024	Res 316/2021 Ley 14259/2024	GD colaborativa	Si	UGCV
Río Negro	2022	Ley 5617	UG colectivo	no especifica	no especifica
Nación	2023	Res 608/23	GD comunitaria	opcional	UGC / UGCV

Mapeo de proyectos en argentina y su caracterización

Actualmente Argentina cuenta con 18 proyectos bajo la lógica de comunidades energéticas[4]. Los proyectos se encuentran dispersos entre las provincias de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires y Corrientes (Figura 5). Las lógicas de compartir la energía se dividen en proyectos en cooperativas eléctricas, colaborativos entre privados, institucionales y municipales, estos con dinámicas de propiedad privada, co-propiedad, propiedad institucional, propiedad pública y acceso por acciones (privada).

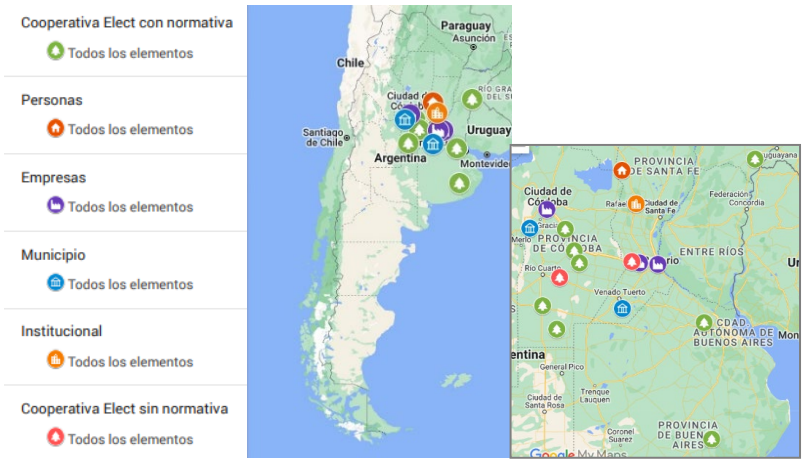


Figura 5: Mapa de proyectos de energía compartida en Argentina. Fuente: elaboración propia.

Seguidamente se observan los proyectos dispersos en el territorio nacional y gráficas que dan cuenta de la potencia instalada y la cantidad de proyectos por provincia. La provincia con mayor potencia instalada y cantidad de proyectos es Córdoba. Predominan en esta provincia experiencias del tipo cooperativas tanto en cantidad como en potencia instalada (ver Figura 6). También cabe resaltar que un solo proyecto colaborativo privado en Córdoba influye en la estadística con una potencia de 800 kW. En Santa Fe la tendencia es distinta, hay mayor presencia de proyectos y potencia en el modo colaborativo, aunque también existen iniciativas cooperativas. En todos los casos los modos municipales son muy pocos en potencia y cantidad, siendo Córdoba también quien se destaca en esta modalidad. Respecto a la provincia de Buenos Aires es incipiente su participación en la estadística con algunos casos cooperativas y colaborativos[5]. En la Tabla 2 se sintetiza la impronta que poseen los proyectos desarrollados en Argentina, donde la totalidad son centrales fotovoltaicas.

4 Aquí se cuentan solo los proyectos ejecutados y no los que están en evaluación; de estos existen en análisis tanto en Córdoba como Santa Fe, ello implica que en poco tiempo se incrementarán la cantidad de proyectos de CEs en Argentina.

5 No se contemplan aquí las centrales fotovoltaicas implementados por el PROINGED en cooperativas eléctricas.

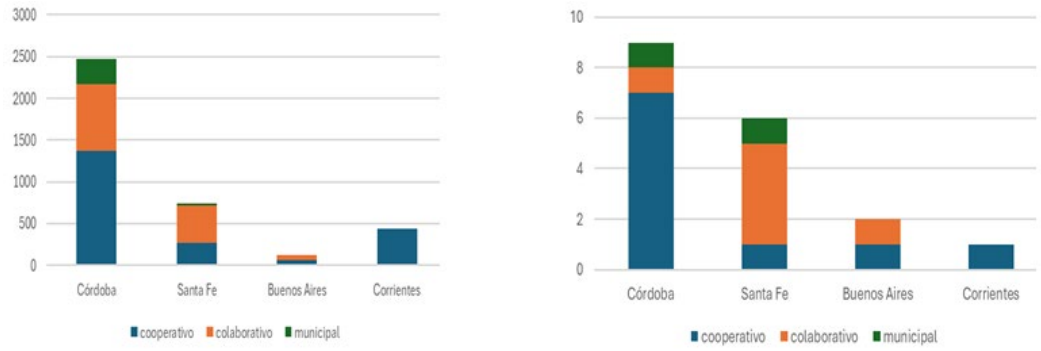


Figura 6: Potencia instalada en kW y tipo de proyecto (izquierda) y cantidad de proyectos (derecha)

Tabla 2*: Proyectos de CEs desarrollados en Argentina*

Provincia	**Localidad**	**Potencia kW**	**Modo**	**Actores**	**Característica**	**Propiedad**
Buenos Aires	Azcuénaga	64	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Buenos Aires	Tandil	60	Colaboradores energéticos	Cooperativa + Privados	Compra anticipada	Privada
Córdoba	Mundo Maipú	800	Colaboradores energéticos	Empresa	beneficio repartido	Privada
Córdoba	Reducción	600	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	Morteros	340	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	La Cumbrecita	300	Comunidad Energética ciudadana	Municipio	Beneficio compartido	Estatal
Córdoba	La Laguna	130	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	Vicuña Mackenna	127,4	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	Jovita	101,92	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	Oncativo	76,4	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Córdoba	Arroyo Cabral	63,7	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Corrientes	Colonia Libertad	435	Energía cooperativa	Cooperativa	Beneficio compartido	cooperativa
Santa Fe	Cañada de Gómez	340	Colaboradores energéticos	Empresa	beneficio repartido	privada
Santa Fe	Armstrong	270	Comunidad Energética	Cooperativa	participación ciudadana	cooperativa
Santa Fe	Ibarlucea	100	Energía cooperativa	empresa	beneficio repartido	privada
Santa Fe	María Teresa	24	Comunidad Energética ciudadana	Municipio + Instituciones	Beneficio compartido	Estatal
Santa Fe	San Guillermo	5	Colaboradores energéticos	Familias	beneficio repartido	privada
Santa Fe	Rafaela	3	Colaboradores energéticos	Institucional	beneficio repartido	Institucional

CONCLUSIONES

En el marco del relevamiento realizado para este trabajo, se pudieron identificar experiencias de comunidades energéticas en Argentina distribuidas en cuatro provincias, en dos de ellas existe marco normativo para dinámicas de CEs (Córdoba y Santa Fe) y en otras dos no (Buenos Aires y Corrientes). Estas experiencias se pueden clasificar a partir de diferentes lógicas de compartir la energía entre proyectos cooperativos, colaborativos, institucionales y municipales. Asimismo, las dinámicas de propiedad van desde privada-empresarial, privada en co-propiedad, institucional, pública municipal y de acceso por acciones.

La mayoría de estas experiencias no depende necesariamente de la existencia de regulaciones específicas previas. Es así que, en Argentina, surgieron proyectos y experiencias que presentaban una impronta de comunidad energética a pesar de no contar con normativa que las regule como tales, como los casos del proyecto PRIER en Armstrong, Santa Fe y el caso de la Usina Popular Tandil en provincia de Buenos Aires.

Para pensar los problemas y desafíos que enfrentan las experiencias de comunidades energéticas en contextos como el argentino, resulta valioso el aporte de los estudios sobre transiciones a la sustentabilidad. Principalmente el de la perspectiva multinivel, y los estudios de las condiciones de nicho. En general, los trabajos desarrollados desde esta perspectiva identifican como nichos sustentables a los espacios de investigación y desarrollo (laboratorios, universidades, instancias experimentales), sobre todo porque cumplen con la premisa de ser espacios protegidos en los que las reglas de juego son diferentes (rentabilidad, eficiencia, performance). En este sentido, las comunidades energéticas pueden ofrecer condiciones de nicho, sobre todo en los casos de cooperativas que priorizan aspectos como el acceso y la calidad del servicio a sus usuarios que además son socios de las mismas. En este sentido, la investigación realizada refuerza las conclusiones de Seyfang y Smith (2007) respecto a que las cooperativas suelen ser organizaciones abiertas a innovaciones, siendo hasta el momento en estudio las cooperativas eléctricas quienes han avanzado de forma contundente en la implementación de dinámicas de CEs.

De la investigación se desprende que el análisis de las CEs en Argentina es un ámbito de vacancia desde diversos campos de estudio. También merece acentuar la necesidad de comenzar a estudiar casos con una marcada trayectoria como ser el proyecto PRIER y el proyecto Comunidades Energéticas I de la Usina Popular Tandil (UPT). Este último merece una atención particular, ya que el modelo de negocio implementado es el de compra de energía anticipada de los socios por un período de 10 años, siendo la propiedad de la UPT y no de los cuotapartistas; este modelo es único en Argentina hasta el momento. Otros proyectos que merecen una especial atención son las centrales fotovoltaicas instaladas en cooperativas eléctricas en el ámbito del PROINGED en la provincia de Buenos Aires. Un último rasgo distintivo de las CEs en Argentina y que requiere profundizar los estudios al respecto, es la dominancia por parte de la energía solar fotovoltaica para la implementación de estos proyectos.

REFERENCIAS

Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition. Electric Power Systems Research, 57(3), 195-204. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8

Amigos de la Tierra, Friend of the earth Europe, Rescoop.es, & Energy Cities. (2020). Comunidades energéticas. Una guía práctica para impulsar la energía comunitaria.

Atutxa, E., & Zubero, I. (2019). El paradigma de lo común para la transición eco social: Prácticas democráticas para la recuperación ciudadana de la energía. Revista Iberoamericana de Economía Solidaria e Innovación Socioecológica, 2(1), Article 1. https://doi.org/10.33776/riesise.v2i1.3661

Avelino, F., & Rotmans, J. (2009). Power in Transition: An Interdisciplinary Framework to Study Power in Relation to Structural Change. European Journal of Social Theory - EUR J SOC THEORY, 12, 543-569. https://doi.org/10.1177/1368431009349830

Baigorrotegui B., G. (2019). Destabilization of Energy Regimes and Liminal Transition through Collective Action in Chile. Energy Research & Social Science, 55, 198-207. https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.05.018

Baigorrotegui, G. (2018a). Comunidades energéticas en la Patagonia: Tan lejos y tan cerca del extractivismo. Estudios Avanzados. https://www.revistas.usach.cl/ojs/index.php/ideas/article/view/3400

Baigorrotegui, G. (2018b). Comunidades energéticas en Latinoamérica. Notas para situar lo abigarrado de prácticas energocomunitarias. En ¿Conectar o Desconectar? Comunidades energéticas y transiciones hacia la sustentabilidad (pp. 197-222).

Baigorrotegui, G. (2021). Comunidades energéticas y pensamiento amerindio desde las roturas del COVID-19. Revista Polis e Psique, 11(SPE), 177-203. http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2238-152X2021000200010&lng=pt&nrm=iso&tlng=es

Baigorrotegui, G., & Chemes, J. (2023). Comunidades energéticas latinoamericanas. Sostenedoras de transiciones que mantienen y reparan la vida. Energía y Equidad, 7.

DGRV, : Confederación Alemana de Cooperativas, & IEP, I. de E. P. (2020). Cooperativas de energía: Guía para la creación de cooperativas de generación distribuida comunitaria. https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2020/10/guia-coops-energia.pdf

Elzen, B., & Wieczorek, A. (2005). Transitions Towards Sustainability Through System Innovation. Technological Forecasting and Social Change, 6, 651-662. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.04.002

Energía colectiva. (2023). ACTIVIDADES CLAVE PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PROYECTOS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA DE PROPIEDAD CONJUNTA. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICA Y MICRO HIDRO.

Flensborg, K. I., Nogar, M. L., Clementi, L. V., Caballero, G., Jacinto, G. P., & Villalba, M. S. (2023). En transición hacia las energías renovables: El caso de Tandil (Provincia de Buenos Aires, Argentina). https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/232611

Geels, F. W. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. Environmental Innovation and Societal Transitions, 1(1), 24-40. https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002

GIZ. (2020). Guía: Cooperativas de energía sustentable en México. COOPERATIVAS DE CONSUMO DE ENERGÍA SOLAR (PROSUMIDORAS). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/730658/Guia_coop_Ene_Sust_MX_VERSION_DIGITAL.pdf

Gobierno de Córdoba. (2021). Resolución 1/2021—Generación distribuida y cooperativa colaborativa. https://ministeriodeserviciospublicos.cba.gov.ar/wp-content/uploads/2021/07/Generaci%C3%B3nDistribuidaComunitaria-Res001-2021-MSP.pdf

Gobierno de Santa Fe. (2021, noviembre 12). Resolución 316 Programa ERA 2021—Colaborativa.

Hess, D. (2013). Industrial fields and countervailing power: The transformation of distributed solar energy in the United States. Global Environmental Change, 23, 847-855. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.01.002

IRENA. (2018). COMMUNITY ENERGY: BROADENING THE OWNERSHIP OF RENEWABLES. https://www.rescoop.eu/toolbox/irena-community-energy-broadening-the-ownership-of-renewables

IRENA Coalition for Action. (2020). Community Energy. Stimulating Investment: Broadening the ownership of renewables. (International Renewable Energy Agency). https://irena.org/publications/2020/Dec/Stimulating-investment-in-community-energy-Broadening-the-ownership-of-renewables

IRENA Coalition for Action. (2021). Community Energy Toolkit: Best practices for broadening the ownership of renewables.

Karytsas, S., & Theodoropoulou, E. (2021). Determinants of Citizens' Participation and Investment in Energy Community Initiatives.

Koirala, B. P., Koliou, E., Friege, J., Hakvoort, R. A., & Herder, P. M. (2016). Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56, 722-744. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.080

Koirala, B. P., van Oost, E., & van der Windt, H. (2018). Community energy storage: A responsible innovation towards a sustainable energy system? Applied Energy, 231, 570-585. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.163

Leonhardt, R., Noble, B., Poelzer, G., Fitzpatrick, P., Belcher, K., & Holdmann, G. (2022). Advancing local energy transitions: A global review of government instruments supporting community energy. Energy Research & Social Science, 83, 102350. https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102350

Martínez, M. C. J., Forero, J. M. E., Quiroz, J. G., & Tovar, A. M. R. (2023). Desarrollo de proyectos comunitarios de energía mediante esquemas de generación distribuida en Iberoamérica. ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe, VII(2), 137-155.

Onterra. (2024). Generación distribuida y otros recursos energéticos distribuidos en América Latina y el Caribe PERSPECTIVA 2024. Onterra.

Pascual, M., & Izzo, M. (2016). Luz de agua. Impacto de las Hidroeléctricas Comunitarias en la Isla Hispaniola. Guakía ambiente. https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00248.pdf

REN21. (2022). RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT.

Revuelta, I. (2023). Comunidades energéticas: Desafíos jurídicos para los entes locales. Anuario de Derecho Municipal, 16, 77-103. https://doi.org/10.37417/ADM/16-2022_2.02

Rodríguez, C. R., & Anuzis, A. J. (2021). Potencialidad para la implementación de comunidades energéticas sustentables en la provincia de Córdova, Argentina. ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe, 5(2), Article 2. http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/183

Secretaría de Energía de la Nación. (2023, julio 18). Resolución 608-23-Generacion Distribuida Comunitaria. https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/290631/20230720

Seyfang, G., Hielscher, S., Hargreaves, T., Martiskainen, M., & Smith, A. (2013). A grassroots sustainable energy niche? Reflections on community energy case studies. 3S Working Paper. https://core.ac.uk/download/pdf/17209211.pdf

Seyfang, G., Park, J. J., & Smith, A. (2013). A thousand flowers blooming? An examination of community energy in the UK. Energy Policy, 61, 977-989. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.030

Siroit, G. (2024, enero 25). Minerales críticos para las transiciones energéticas de américa latina y el caribe. https://www.olade.org/noticias/america-latina-y-el-caribe-destaca-en-el-mercado-global-de-minerales-criticos-segun-estudio-de-olade/?fbclid=IwAR2sdK6_Q8-nEMymT3tsukOtqWVAFfchfF1lHK4Z1Lchs6_If0qxyOruRUA

Stake, R. (2005). Investigación con estudio de casos. Morata.

Thomas, H. (2009). Tecnologias para inclusão social e políticas públicas na América Latina.

Unión Europea. (2018). Energía renovable para un desarrollo rural sostenible: Posibles sinergias significativas, pero en su mayoría no materializadas en la práctica. https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_05/SR_Renewable_Energy_ES.pdf

Unnikrishnan, H. (2024). Where Is the Community in Community Energy? (pp. 45-70). https://doi.org/10.1007/978-3-031-57938-7_3

WWEA. (2011, mayo 23). WWEA defines Community Power. World Wind Energy Association. https://wwindea.org/communitypowerdefinition/

ENERGY COMMUNITIES IN ARGENTINA. SURVEY OF REGULATIONS AND PROJECTS

ABSTRACT: In recent years, the advance of distributed generation with renewable energy sources in Argentina has gained prominence in political and academic discussions. However, there has been limited growth in installed capacity, and Argentina is among the least advanced countries in Latin America in this regard. Nonetheless, there have been notable developments in regulatory frameworks for the promotion and expansion of energy communities. This study aims to map, characterize, and analyze the experiences of energy communities in Argentina that utilize distributed generation of renewable energy (DGRE). It has been observed that four provinces have established regulatory frameworks for this purpose, yet only two have actively implemented related projects. On the other hand, there are two other provinces which have also implemented projects, but without a regulatory framework. The study also highlights the significant role of electric cooperatives in advancing energy communities in Argentina.

Keywords: energy communities, community energies, collaborative energy, cooperative energy

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 381-392, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS BIODIGESTORES EN FORMATO KIT Y SU APLICACIÓN DIDACTICA PARA LA ENSEÑANZA EN NIVEL MEDIO

Lucia V. Soltelo Galfrascoli [1], Noemi Sogari [2], Silvia C. Coronel[2]
[1,2 y 3]Grupo de Investigación, Desarrollo y Transferencia Tecnológica de las Energías Sustentables y Medio Ambiente (GIESMA). Dpto. de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la UNNE.
Av. Libertad 5460, CP 3400. Corrientes. Argentina
e-mail: luciavanesa.sotelogalfrascoli@gmail.com

RESUMEN: En este trabajo se presenta el análisis del funcionamiento de biodigestores en formato de kit como herramientas para la enseñanza de contenidos relacionados con las energías renovables en la educación básica. El objetivo fue evaluar el diseño, el funcionamiento y la efectividad de esta tecnología para lograr un aprendizaje integral. Los destinatarios fueron docentes y alumnos de 3er. año de secundaria, de entre 14 y 17 años, que asisten a una institución educativa de la cuidad de Corrientes. La metodología consistió, inicialmente, en la construcción de prototipos en el laboratorio de la universidad y en una intervención en el aula para evaluar la motivación, el aprendizaje y la participación de los estudiantes en clases de fisicoquímica. Los resultados indicaron que los biodigestores presentan un alto potencial pedagógico para la comprensión de conceptos relacionados con la naturaleza de los compuestos químicos. Los estudiantes pudieron vincular este conocimiento a la composición química del biogás y reconocer su importancia en la producción de energía renovable. En conjunto, estos hallazgos sugieren que el uso de biodigestores en el aula contribuye a fomentar un aprendizaje integral y desarrollar una mayor conciencia ambiental entre los estudiantes.

Palabras clave: biogás, biodigestor, didáctica energética.

INTRODUCCION

La creciente degradación del entorno natural, impulsada por la contaminación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, exige que las nuevas generaciones estén equipadas con el conocimiento y las habilidades necesarias para abordar estos desafíos. Para ello, no solo es crucial mantener una actualización constante sobre las cuestiones ambientales, sino también adaptar las estrategias educativas a los diferentes niveles de enseñanza. (Plaza *et al*, 2012).

A nivel global, el sistema educativo desempeña un papel crucial en la educación ambiental de la sociedad. En la actualidad, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, el reto educativo consiste en integrar la educación ambiental para el desarrollo sostenible en los currículos de los diferentes niveles educativos. Esto debe abordarse como un proceso sistémico y organizado que involucre todas las disciplinas y saberes existentes (Simões *et al*, 2019).

Aguilera, J (2022) menciona que existe la necesidad de que el proceso de enseñanza de las energías alternativas se promueva mediante el uso de prototipos o elementos que permitan experimentar cómo funcionan estos sistemas. Es por ello, que esta investigación se centra puntualmente en el estudio del funcionamiento de biodigestores en formato kit escolar que pueden ser utilizados como herramientas efectivas para facilitar este proceso educativo.

El biogás generado en estos dispositivos está formado principalmente por metano y dióxido de carbono, además de otros gases en cantidades menores. El metano, principal componente del biogás,

es el gas que le confiere las características combustibles al mismo, bastante eficiente que puede ser utilizado directamente (Hidalgo Osorio *et al*., 2019).

Por otro lado, el proceso de fermentación anaeróbica brinda otros subproductos: abono orgánico rico en nutrientes como nitrógeno fosforo y potasio un material sólido (digestato) que puede usarse como acondicionador del suelo; agua de proceso o biol que es un líquido que, tras un tratamiento adecuado, puede reutilizase en el proceso o ser descargado en cuerpos de agua.

Los biodigestores pueden ser construidos con diversos materiales como ladrillos y cemento, metales o plásticos, y diseñarse a diferentes escalas, según los objetivos y los recursos de los interesados, la cantidad de materia prima disponible como sustrato y las demandas energéticas de los beneficiarios (García Páez, s.f., p. 10).

En este sentido, los reactores discontinuos o de tipo Bach a escala de laboratorio son los que mejor se ajustan al entorno educativo ya que se cargan una sola vez de forma total, son de fácil construcción y manejo. Generalmente, se componen de tanques sellados con una salida de gas que se conecta a un gasómetro flotante, donde se guarda el biogás. Este sistema es adecuado cuando los materiales a procesar están disponibles de manera irregular como, por ejemplo, una industria que utiliza materia prima agrícola, como frutas o verduras, que solo están disponibles en temporadas específicas. Así, el sistema de producción debe adaptarse a la disponibilidad intermitente de esos recursos para poder operar eficientemente. (Hidalgo Osorio *et al*., 2019).

En Latinoamérica, se han realizado aportes vinculados al uso de biodigestores para la enseñanza de contenidos relacionados con las energías renovables en escuelas de nivel básico (Quintero, 2016; Barboza *et al., 2021;* Cartaxo *et al*., 2020). En Argentina, si bien no se han realizado estudios específicos a gran escala que documenten la implementación generalizada de biodigestores en escuelas, existen experiencias aisladas y proyectos piloto en diversas instituciones educativas del país. Como antecedente, se menciona un trabajo llevado a cabo por Plaza G *et. al*. (2017) en la provincia de Salta, que lleva por título: "El biodigestor como recurso didáctico en la educación", proyecto en el cual se propuso diseñar y construir un modelo de biodigestor escolar de tipo discontinuo, simple, económico y de fácil operación para trabajar dentro y fuera del aula. Las estrategias desarrolladas evidenciaron que la comunicación y educación ambiental se efectivizan con diversos mecanismos de articulación como es el uso de un modelo demostrativo de digestión anaeróbica y material gráfico con información general y específica de la temática abordada.

Por otra parte, en la provincia de Corrientes, el grupo de Investigación Desarrollo y Transferencia de las Energías Sustentables y del Medio Ambiente (GIESMA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensora (FaCENA) de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), dirigido por la Dra. Noemí Sogari, desde el año 1998, ha participado en proyectos de investigación y extensión, construyendo, instalando y ensayando distintos tipos de sistemas generadores de biogás utilizando distintas materias orgánicas provenientes de medios rurales y urbanos, con finalidad educativa y productiva (Sotelo *et al*, 2023). En esta ocasión, se hace mención a una propuesta de extensión llevada a cabo en escuelas rurales, pertenecientes a localidad del Chaco, sobre el uso de las energías renovables, mediante el desarrollo de talleres de difusión y capacitación para docentes y alumnos con el objetivo de proporcionar el uso de las energías renovables, en particular la generación de biogás a partir de la degradación de efluentes de corrales y tambos. La experiencia se basó en la realización de una práctica de laboratorio sencilla, que consistió en el armado de equipos reactores simples usando botellas, mangueras, selladores. Esta actividad permitió abordar conceptos fisicoquímicos como: volumen, principio de Arquímedes, presión, entre otros; lo que logró un aprendizaje integral en los estudiantes (Monzón, Sogari, 2018).

La aplicación de los biodigestores anaeróbicos como elemento didáctico implica adaptar su construcción y manejo a diferentes escenarios educativos, lo que permite desarrollar proyectos prácticos y participativos. Esto fomenta la conciencia ambiental y la sostenibilidad en los estudiantes.

Teniendo en cuenta la necesidad de consolidar la relación causal entre educación, energía y ambiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial educativo de los biodigestores discontinuos en formato kit para la enseñanza en el nivel medio de la educación.

METODOLOGIA

Se evaluó el desempeño de dos diseños de biodigestores, para lo cual se consideraron aspectos claves que abarcan tanto la funcionalidad técnica como la aplicabilidad educativa.

Etapa 1. Etapa de construcción y manejo de prototipos de biodigestores en formato kit

Se analizó la facilidad de construcción, de montaje y control de los biodigestores considerando cuán sencillo es ensamblar el biodigestor en un entorno escolar, y el método de medición de producción de biogás.

Para esto, se construyeron dos series de reactores de tipo Bach a partir de materiales reutilizables en el Departamento de Física de la FaCENA de la UNNE.

Serie 1: constituido por 5 reactores elaborados con botellas de plástico PET (250ml) y jeringas descartables (5 ml y 10ml), como se observa en la Figura 1.



Figura 1. Minibiodigestores de tipo Bach

Los reactores fueron alimentados por diferentes cantidades de sustrato (cáscaras de papa) con la misma cantidad de agua (90ml) (Tabla 1)

Tabla 1. Cantidad de sustrato que se utilizaron para cada muestra.

Muestra	1	2	3	4	5
Cantidad de sustrato en gramos (grs)	4	6	8	10	90

La producción de biogás se midió mediante el desplazamiento del émbolo de la jeringa que indica el volumen de gas producido.

Serie 2: 3 sistemas reactores fabricados a partir de frascos de vidrio de café de las mismas dimensiones (800ml), mangueras y botellas de tipo PET (Figura 2). Cada sistema consistió en dos partes fundamentales: la cámara de digestión o digestor propiamente dicho, donde los microorganismos degradan la materia orgánica generando el biogás, y el gasómetro donde se acumula el biogás generado. Se utilizó el mismo sustrato que la serie 1.

Además, se estudió el efecto de la composición del sustrato y de la temperatura en el proceso, y que los/as estudiantes se familiaricen con el uso del termómetro, además de representar la variación de la temperatura en función del tiempo, se realizaron algunas modificaciones en cada uno de los equipos: el sustrato del sistema 1 (Figura 2a) se mezcló con agua a temperatura inicial de aprox. 38ºC, para el equipo 2 (Figura 2b) se empleó biol (líquido obtenido de una fermentación anaeróbica anterior de restos vegetales y frutas) en lugar de agua; al equipo 3 (Figura 2c) se le adicionó un termómetro para medir la temperatura interna de la mezcla durante el proceso.



a) *b)* *c)*

Figura 2. Biodigestores discontinuos. a) Reactor 1, b) Reactor 2; c) Reactor 3

Durante 21 días se controló la producción de biogás en cada reactor observando el desplazamiento del líquido almacenado en el gasómetro, la temperatura externa y la temperatura interna en el equipo 3.

Etapa 2. Intervención áulica

En esta etapa, se examinó el uso de sistemas reactores para enseñar conceptos relacionados con energías renovables, química y sostenibilidad al grupo de alumnos (28 integrantes) de 3er año de secundaria, con edades que oscilan entre los 14 y 17 años, que asisten al Colegio "José María Ponce" de la ciudad de Corrientes.

La propuesta educativa tuvo como objetivo desarrollar e implementar un programa que incorpora metodologías activas y participativas, como el uso de tecnologías sostenibles, con el fin de aumentar la motivación de los estudiantes en las clases de ciencias. Esta iniciativa surgió a partir de la identificación de una problemática por parte del equipo docente del departamento de ciencias de la institución, quien observó que los alumnos mostraban desmotivación ante las clases tradicionales. Esta falta de interés se traduce en una escasa participación en los debates en el aula, actitudes apáticas y el incumplimiento de las tareas asignadas.

La intervención se llevó a cabo en dos fases: uno de exploración y otro de intervención propiamente dicho, las cuales se detallan a continuación:

A. El periodo de exploración se realizó mediante una encuesta de Google Formas a docentes y alumnos del 3er. año de secundaria de la institución educativa considerada. La misma tuvo como objetivo evaluar el nivel de conocimientos previos sobre la temática abordada, para obtener información desde la mirada docente, y desde la perspectiva del alumno.

El cuestionario para los docentes incluyó preguntas relacionadas con las tecnologías y los recursos utilizados para la enseñanza, contenidos relacionados con el biogás y a los biodigestores. La encuesta para los alumnos abordo cuestiones vinculadas con la contaminación ambiental por residuos sólidos, energías renovables, biogás y biodigestores.

B. En la fase de intervención áulica se desarrolló una propuesta didáctica que consistió en una clase presencial de dos horas cátedras (80min).

La clase tuvo como inicio la explicación expositiva del tema "Compuestos Covalentes", por parte de la docente a cargo, utilizando una presentación interactiva elaborada con la herramienta digital Genially, que incluyó un video de Educaplay sobre compuestos covalentes, brindando ejemplos, como el metano, el dióxido de carbono, entre otros. Esta actividad tuvo una duración aproximada de 40min.

El colegio intervenido cuenta con tecnologías de la información y comunicación (TIC) y conectividad. Sin embargo, si no se dispone de estos recursos, se pueden considerar alternativas como el uso de material impreso, la realización de experimentos simples para ilustrar conceptos de compuestos covalentes mediante modelos moleculares con esferas de poliestireno o plastilina, y el uso de pizarras

para dibujar estructuras moleculares y explicar conceptos en tiempo real, promoviendo la participación activa de los estudiantes.

Posteriormente, con el propósito de facilitar la comprensión de los procesos físico-químicos que ocurren en la producción de compuestos covalentes en la naturaleza, así como de promover habilidades interpersonales, estimular el aprendizaje activo y reforzar el compromiso con el trabajo en equipo, se propuso a los alumnos formar grupos de 4 o 5 integrantes para la construcción de biodigestores con el diseño de la serie 1 (mediante botellas de plástico, jeringas y globos). Este modelo se elige porque es un sistema simple que permite introducir la temática de manera efectiva.

Como cierre de la clase se llevó a cabo una puesta en común sobre los contenidos abordados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Etapa 1. Serie 1. Como se observa en la Figura 3 se logró la producción de biogás en los 5 mini reactores de la serie 1.



Figura 3. Minibiodigestores de tipo Bach con producción de biogás

La cantidad de biogás generado por cada equipo se resume en la Tabla 2.

Tabla 2: Volumen de biogás obtenidos por los reactores del set 1

Muestra	1	2	3	4	5
Volumen de biogás generado en ml	2, 2	10	2,7	0,5	10

Serie 2. Se evidenció la producción de biogás en dos de los equipos de la serie. El volumen total de biogás acumulado por el equipo 1 fue de 20ml (Figura 4a), y por el equipo 3 de 110ml (Figura 4c). Estas diferencias observadas en la producción pudieron ser ocasionadas por las variaciones bruscas de temperatura en el digestor 1 que dio lugar a la desestabilización del proceso. Es por esto que se debe garantizar una temperatura homogénea en el digestor (Varnero Moreno, 2011).

Por otra parte, no se observó producción de biogás en el equipo 2 (Figura 4b), y se infiere que la mezcla inicial (sustrato con biol, en vez de agua) presentó las condiciones necesarias para el desarrollo de los microrganismos implicados en la fermentación anaeróbica.



a) *b)* *c)*

Figura 4. Producción de biogás en reactores de la serie 2

Respecto de la variación de la temperatura en función del tiempo, en la Figura 5 se observa que en el sistema 3 la temperatura interna indicó un mínimo de 20,1ºC y un máximo de 30,50ºC (rango mesofílico); y la temperatura externa estuvo comprendida entre 15ºC y 25ºC.

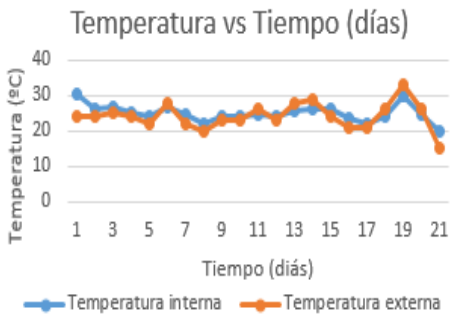


Figura 4: Variación de Temperatura en función del tiempo

La producción de biogás en biodigestores demuestra su efectividad y viabilidad como tecnología para la transferencia educativa en escuelas de nivel medio. Para escalar su producción hacia el almacenamiento y uso, se propone varias acciones: instalar tanques de almacenamiento seguros, implementar medidores de flujo para gestionar el biogás, generar energía eléctrica a partir del biogás para alimentar sistemas de iluminación y otros equipos, adaptar cocinas escolares para usar biogás como fuente de energía, y utilizarlo en sistemas de calefacción para mejorar el confort en climas fríos. Además, se sugiere realizar talleres educativos para enseñar a estudiantes y docentes sobre el manejo y aplicaciones del biogás, promoviendo así el aprendizaje práctico y la conciencia sobre energías renovables.

Etapa 2. Intervención áulica

A) Periodo de exploración de conocimientos sobre la temática abordada.

El formulario *Google forms* a docentes proporcionó la siguiente información:

El total de docentes encuestados (100%) considera que es muy importante la utilización de recursos tecnológicos para el aprendizaje de distintas temáticas, (Figura 5).

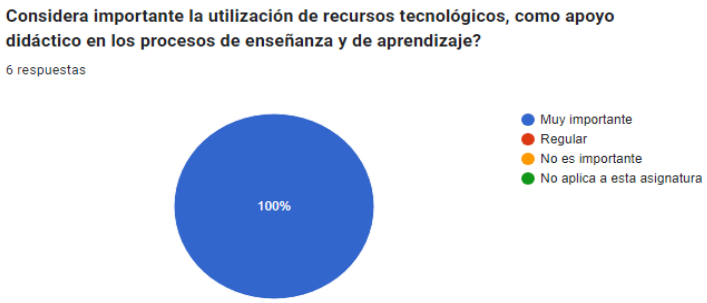


Figura 5. Importancia sobre utilización de recursos didácticos tecnológicos

Entre las herramientas utilizadas por estos docentes para el desarrollo de sus clases se encuentran: los videos, presentaciones, juegos, simuladores, videos interactivos, infografías, experimentos, plataformas digitales como Canva y dossier, entre otros (Figura 6).

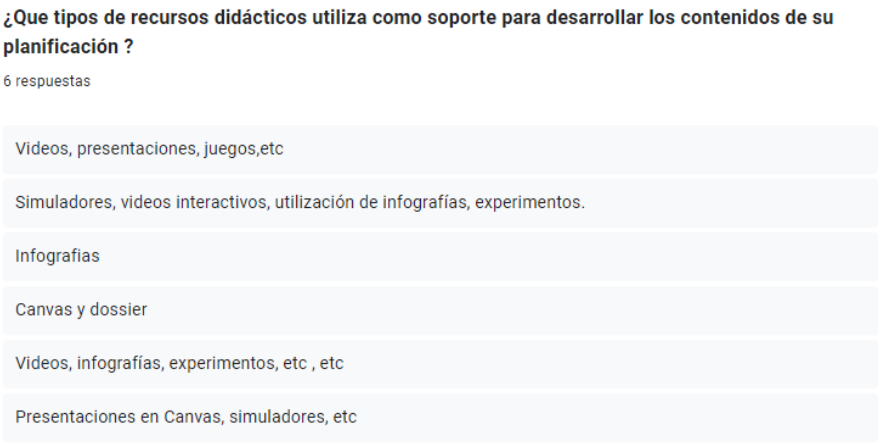
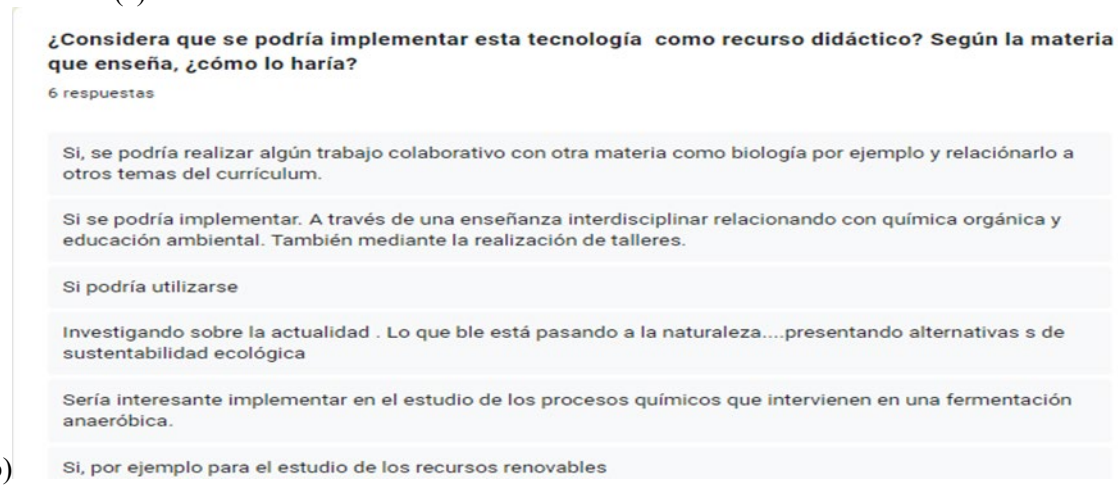


Figura 6. Recursos que los docentes utilizan como soporte para desarrollar sus clases

La mitad de encuestados (50%) (Figura 7a) reportó que presentaba cierta información previa acerca del biogás y de los biodigestores. Sin embargo, el total de participantes considera la posibilidad de implementar el uso del biodigestor como recurso didáctico en la enseñanza, por ejemplo, realizando trabajos colaborativos con otras materias mediante talleres, o como tema de investigación para los alumnos sobre los problemas ambientales actuales, y sustentabilidad ecológica, o para el aprendizaje de temas tales como: el estudio de reacciones químicas, los recursos renovables, etc. (Figura 7b).



(a)



(b)

Figura 7. a) Conocimientos previos sobre biogás y biodigestor; (b) formas posibles de implementar el uso del biodigestor en el aula.

El total de docentes encuestados consideran que mediante de uso de los sistemas digestores, como soporte didáctico, los alumnos podrían adquirir competencias y aprendizajes sobre el tratamiento de

los residuos sólidos, la construcción y el uso de biodigestores, su importancia para el ambiente; además de poder formar alumnos con un pensamiento crítico que les permita actuar frente a situaciones problemáticas de la actualidad como es la contaminación ambiental (Figura 8).

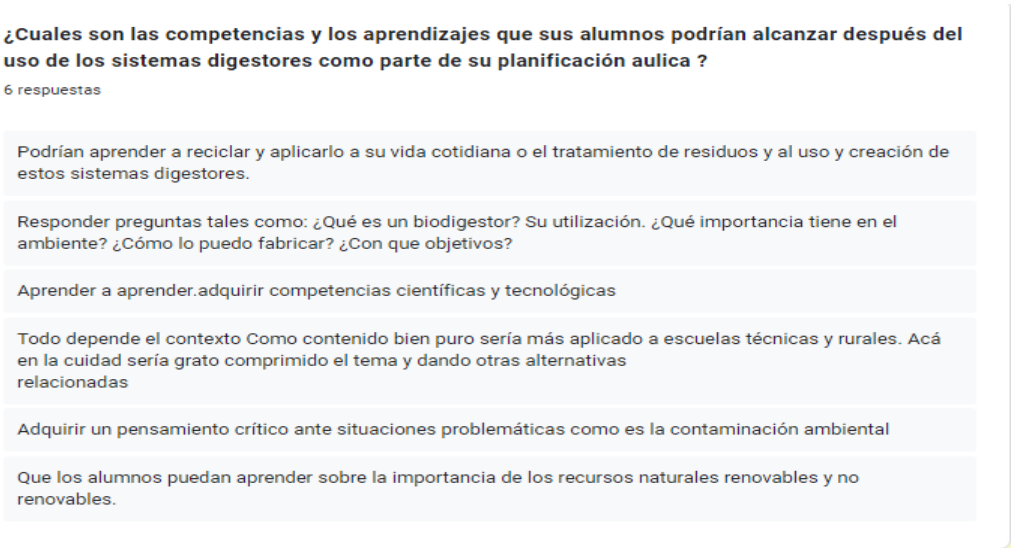
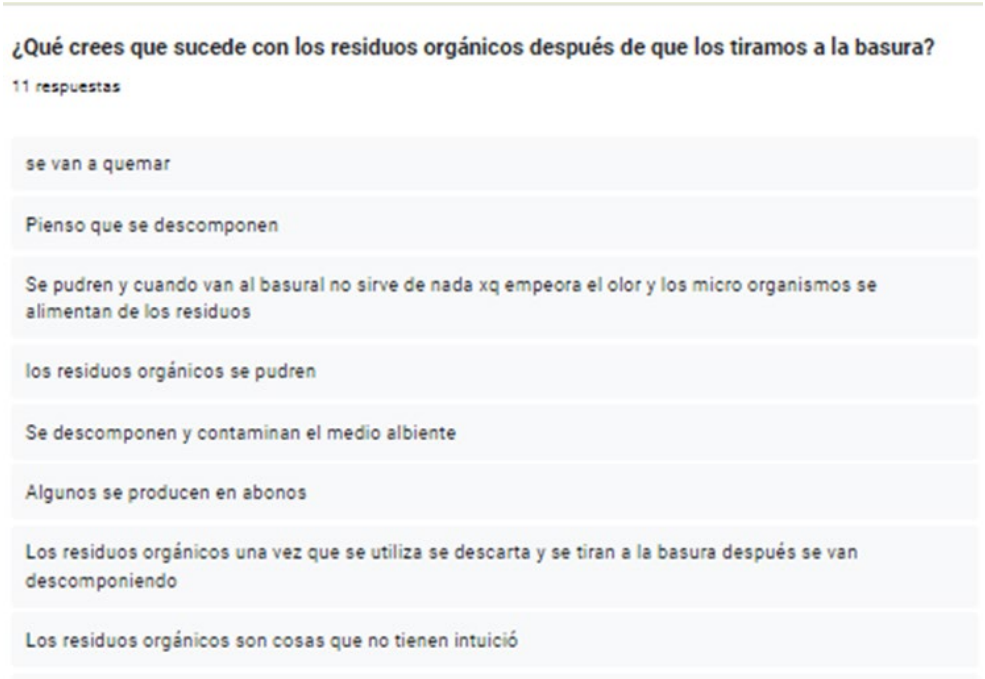


Figura 8. Competencias y aprendizajes que los alumnos podrían adquirir luego de la construcción y uso de los biodigestores.

Por otra parte, en el formulario de Google forms participaron 14 alumnos, de entre 14 y 17 años, de los cuales 7 fueron del género masculino y 5 del género femenino.

Ante la pregunta "¿Qué crees que sucede con los residuos orgánicos después de que lo tiramos a la basura?", los alumnos demostraron tener conocimiento variado respecto de lo que sucede con los residuos orgánicos tras su disposición inicial (Figura 9). En general, los estudiantes entienden que los residuos orgánicos atraviesan una etapa de descomposición que produce mal olor, y la aparición de microorganismos. Algunos mencionan que esto trae como conciencia la contaminación del ambiente; y otros indican que estos desechos se transforman en abono para las plantas.



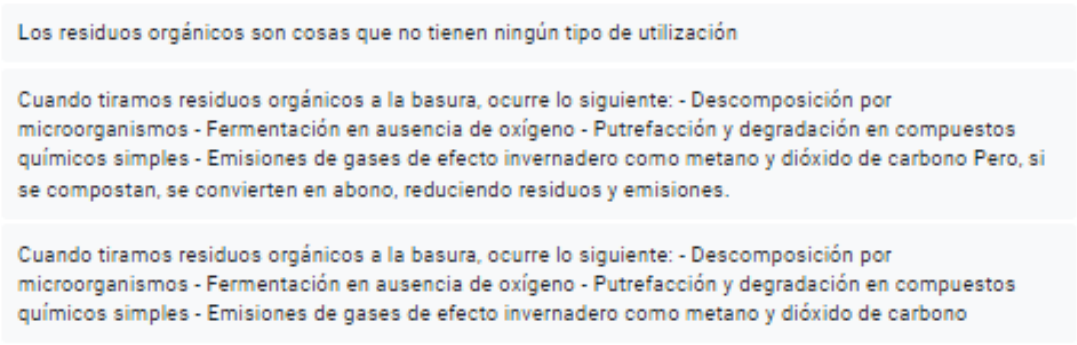


Figura 9. Disposición final de los residuos sólidos.

El 75% de los estudiantes conoce algún problema ambiental relacionado con los desechos (Figura 10)



Figura 10. Porcentaje de alumnos con conocimientos

Como se observa en la Figura 11, el 54,5% del total de estudiantes encuestados, tiene noción de que algunos residuos pueden producir un gas, llamado biogás, y que presenta propiedad comburente.

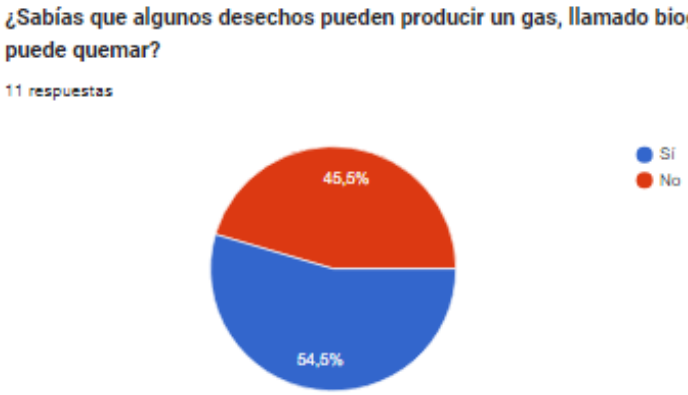


Figura 11. Porcentaje de alumnos con conocimientos de la producción de biogás

En esta línea, el 36,4% de los participantes cree que la producción de biogás, además puede ayudar a reducir la contaminación ambiental, sin embargo, el 9,1 % opina que no. (Figura 12). En este punto, sería interesante organizar un debate guiado sobre este tema, señalando que, si el biogás producido no se utiliza de manera efectiva y se libera a la atmósfera, puede ser mucho más contaminante que el CO_2.

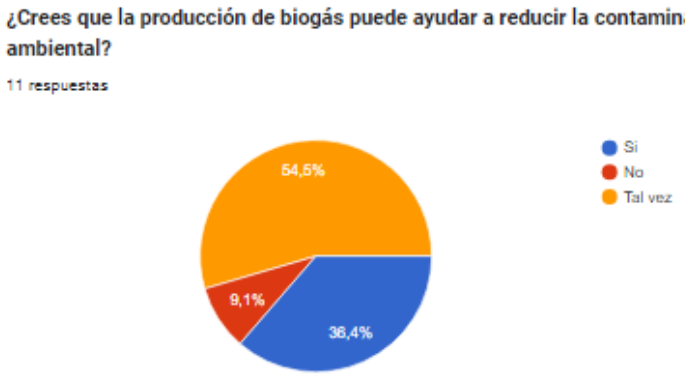


Figura 12. Porcentaje de alumnos con conocimientos de la producción de biogás

La Figura 13 evidencia que al 83,3% de los alumnos les interesaría aprender cómo se pueden aprovechar los residuos para generar energía limpia. En línea con esto, sería conveniente guiar una discusión sobre lo que significa "energía limpia" y el impacto ambiental del biogás fundamental para promover una comprensión crítica entre los estudiantes sobre las energías renovables. Al guiar a los alumnos hacia una reflexión profunda sobre estos conceptos, se fomenta un diálogo educativo enriquecedor que puede llevar a soluciones más sostenibles y responsables en el manejo de residuos y producción energética.



Figura 13. Porcentaje de alumnos con conocimientos de la producción de biogás

B) Intervención áulica

Mediante la utilización de los recursos digitales para el desarrollo del tema “Compuestos Covalentes” se logró la construcción del conocimiento por medio de la participación activa del alumnado (Figura 14)



Figura 14. Presentación del tema “Compuestos Covalentes”

Además, los alumnos lograron construir biodigestores utilizando botellas PET de 500 ml, globos y jeringas de 5 y 10 ml, como se observa en la Figura 15. Con esto se consiguió que los alumnos logren

vincular los contenidos curriculares con temas relacionados con las energías renovables, específicamente el biogás y su importancia como recurso sostenible. A través de esta conexión, los estudiantes comprendieron la relevancia de compuestos como el dióxido de carbono y el metano en la producción de biogás y en los procesos de digestión anaeróbica que ocurren en los biodigestores. Esta comprensión se evidenció en el debate generado en clase, donde los alumnos presentaron argumentos sobre la importancia de estos compuestos en la naturaleza.



Figura 15. Construcción de Biodigestores en formato kit

CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación revelan que los biodigestores en formato kit tienen un alto potencial educativo, superando las clases tradicionales expositivas que utilizan fibra y pizarra. Al permitir a los estudiantes interactuar directamente con conceptos científicos, se fomenta un aprendizaje más profundo y se promueve una mayor conciencia ambiental. Estos sistemas son fáciles de construir y manejar, lo que facilita la realización de experiencias áulicas y permite abordar diversas temáticas, integrando áreas como tecnología, física, química, matemática, biología, ecología y educación ambiental.

Además, el biogás producido por estos biodigestores puede aprovecharse como combustible para cocinar o calentar agua en las instalaciones educativas, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles y proporciona una fuente de energía renovable. Este recurso representa una parte significativa de la matriz energética eléctrica del país y su desarrollo no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también fortalece la economía local. Por lo tanto, que estas actividades insertadas en el sistema educativo contribuyen a la concientización de los jóvenes brindándoles nuevas oportunidades para su inserción laboral ante las nuevas necesidades del sistema energético.

REFERENCIAS

Aguilera, J (2022). Enseñanza de las energías alternativas como modelo praxeológico en la educación ambiental. Revista Electrónica de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Territorial de Maracaibo. Vol. 9 Nº1, 29-44. http://recitiutm.iutm.edu.ve/index.php/recitiutm/article/view/230/html

Barbosa de Lima, Cerílio; Monskolski, Alexandre;Galvão deFrança, Jakeline; Mendes, Marciane Maria. Uso de biodigestor didáctico e técnica de animação para ensino de Química aos educandos indígenas. Revista Educação Pública, v. 21, nº 1, 12 de janeiro de 2021. https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/21/1/uso-de-biodigestor-didatico-e-tecnica-de-animacao-para-ensino-de-quimica-aos-educandos-indigenas

Cartaxo, A.D., Leite, V.D., Albuquerque, M.V., Lopes, W.S., & Cartaxo, M.A. (2020). Biodigestor caseiro como ferramenta metodológica para o ensino de educação ambiental nas escolas. R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 9, n. 2, p. 214-230. https://www.semanticscholar.org/reader/866a99722397d6b8ebb1e1886be7d42a5e53e9b9

García Páez, Virginia (s.f.). MANUAL DE BIOGÁS. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. Direccin de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. Provincia de Buenos Aires. https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf

Hidalgo Osorio, W. A., Vásquez Carrera, P. J., Espinosa Cunuhay, K. A., & Morales Tamayo, Y. (2019). Desechos orgánicos que generan gas a través de un biodigestor diseño experimental en la parroquia Guasaganda de la ciudad de la Maná. Ciencia Digital, 3(2.6), 190-205. https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.6.558

Monzón V, Sogari N (2018) Biogás: Una alternativa sustentable para su implementación en laboratorios escolares rurales. Revista Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica. V5.2018/2019.

Pereira, M. (2015). Las energías renovables ¿Es posible hablar de un derecho energético ambiental? Elementos para una discusión. Jurídicas CUC, 11(1), 221-242. doi: http://dx.doi.org/10.17981/juridcuc.11.1.2015.10

Plaza, G., Otero, M. del C., y Ruiz, C. (2012). El biodigestor como recurso didáctico en la educación. Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 9–14. https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/2381

Quintero Puentes, J. D. (2016). Construcción de un biodigestor y sus implicaciones en la enseñanza de la química: una experiencia de aula basada en una cuestión socio científica (CSC). P.P.D.Q. Boletín, (54). https://doi.org/10.17227/PPDQ.2015.num54.4049

Simões Cacuassa, A. S., Yanes López, G., & Álvarez Díaz, M. B. (2019). Transversalidad de la educación ambiental para el desarrollo sostenible. Revista Universidad y Sociedad, 11(5), 25-32.

Sotelo Galfrascoli, L.;Sogari, N y Ricciardi, E. (2023). Diseño, construcción y funcionamiento de biodigestores en formato kit para su implementación en laboratorios escolares. Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica. 8. 29-42. 10.30972/fac.3306842.

Varnero Moreno, M. T (2011). “Manual de Biogás”. Mineregía /PNUD/FAO/GEF. Chile 2011. ISBN 978-95-306892-0. Recuperado de: https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf.

STUDY OF THE OPERATION OF KIT FORMAT BIODIGESTERS AND THEIR DIDACTIC APPLICATION FOR TEACHING AT THE SECONDARY SCHOOL

ABSTRACT: This paper presents the analysis of the operation of biodigesters in kit format as tools for teaching content related to renewable energies in basic education. The objective was to evaluate the design, operation and effectiveness of this technology to achieve integral learning. The target audience were teachers and students in the 3rd year of secondary school, between 14 and 15 years old, attending an educational institution in the city of Corrientes. The methodology consisted, initially, in the construction of prototypes in the university laboratory and in a classroom intervention to evaluate the motivation, learning and participation of students in physicochemistry classes. The results indicated that the biodigesters present a high pedagogical potential for understanding concepts related to the nature of chemical compounds. Students were able to link this knowledge to the chemical composition of biogas and recognize its importance in the production of renewable energy. Taken together, these findings suggest that the use of biodigesters in the classroom contributes to fostering comprehensive learning and developing greater environmental awareness among students.

Key words: biogas, biodigester, energetic didactic.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 393-405, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

HORIZONTES POLÍTICOS DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA: UN ACERCAMIENTO DESDE LOS MEDIOS DE COMUNICACIÓN DE LA PROVINCIA DE SALTA (2022-2024)

Melanie L. Pedraza[1], Belisario Mendieta Albarracín[2], Rachuan F.G. Elías[3], Federico M. Ramos[4], Facundo D.F. Gonzalez[5]
[1]Instituto de Investigaciones en Ciencias Sociales y Humanidades (ICSOH-CONICET) Universidad Nacional de Salta (UNSa) - C.P.4400 Salta
[2,3,4]Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa) - C.P.4400 Salta
[5]Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO-CONICET) Universidad Nacional de Salta (UNSa) - C.P.4400 Salta
Tel. +54 9 387 452-0872 –e-mail: melanielutpedraza@gmail.com

RESUMEN: En la presente investigación se analizan los imaginarios sociotécnicos de transición energética que circularon en los medios digitales de la Provincia de Salta durante enero de 2022 y julio de 2024. El objetivo es analizar los horizontes políticos del proceso de transición haciendo foco en las diferentes expectativas creadas antes y después del cambio de gobierno nacional en la República Argentina. La técnica de relevamiento fue la investigación documental a través de fuentes secundarias y la técnica de análisis se basó en el análisis de contenido y la codificación teórica. Los resultados dieron cuenta de un giro en las expectativas creadas en torno al proceso de transición producto del cambio de gobierno nacional. En el primer período de análisis, previo a la asunción del nuevo presidente, la hegemonía de sentidos definía la transición como un proceso de cambio tecnológico clave para el desarrollo socioeconómico, político e industrial del país. En contraste, desde diciembre de 2023 la transición energética es concebida desde una dimensión material economicista preocupada por la competitividad económica, la atracción de inversiones y la inserción del país en el seno de la geopolítica como proveedor de bienes y servicios primarios.

Palabras clave: medios digitales, transición energética, análisis de contenido.

INTRODUCCIÓN

Los medios de comunicación: vehículos para la proliferación de sentidos

Históricamente, los medios de comunicación participaron -y aún participan- de los procesos de aprehensión de la realidad de las personas (González *et al*., 2022) y se constituyen como actores sociales claves en los procesos de construcción de sentido de las sociedades mediatizadas (Saintout, 2013). Esto se corresponde, además, con su rol y deber de comunicar asuntos de interés público a la ciudadanía (Binda Galíndez y Javi, 2022). Sin embargo, resulta imperioso recordar que los medios son, ante todo, empresas. El sistema mediático en su conjunto es una parte sustancial del sistema económico de un país y, por ende, posee fuertes lazos comunicantes con el poder político. La producción de noticias no es inocente, aséptica ni meramente referencial, sino que es parte de un complejo proceso donde confluyen factores socioculturales, económicos, políticos y de disputas ideológicas (Fernández Pedemonte, 2018). En suma, los medios construyen y presentan la información de manera que sea funcional a sus propios intereses (Saintout, 2013).

En este marco, la transición energética (TE) constituye un asunto de interés público y un Problema Sociotécnico y Ambiental Relevante (Gonzáles *et al.,* 2023) que demanda la atención no sólo de los medios de comunicación sino de la sociedad toda. En la actualidad, la TE es un fenómeno con amplio terreno ganado en la agenda política global de organismos internacionales, empresas privadas, estados

nacionales e instituciones diversas (Bertinat *et al*., 2020). Esto se debe al agotamiento de combustibles fósiles que se vive a nivel global, la importancia que adquirieron la crisis climática y la agenda ecológica en los últimos años, sumado a los debates sociales, políticos y filosóficos que la realidad energética viene impulsando desde finales del siglo XX (Svampa y Bertinat, 2022). Por tanto, la TE emerge como la principal iniciativa global para dar respuesta a las metas de mitigación del cambio climático y encarar el rumbo hacia un nuevo paradigma energético, dependiente de fuentes naturales de energía (Kazimierski, 2021).

Empero, si bien el fenómeno TE incluye las energías renovables (ER), no se limita a ellas. No existe una interpretación uniforme ni universalmente aceptada acerca de lo que se entiende por TE, sino que, en cambio, se observa, en círculos académicos y políticos, que existen diversas miradas sesgadas sobre el fenómeno (Garrido, 2022). La concepción predominante de TE se presenta en términos de una progresiva reducción de la participación de fuentes energéticas fósiles en la oferta primaria de energía y su reemplazo por fuentes alternativas renovables. Esta propuesta, conocida como descarbonización, surgió como un desafío a futuro y estuvo directamente influida por la crisis del petróleo de 1973 y las conclusiones de la 1° Cumbre de la Tierra llevada a cabo en Estocolmo en 1972[1] (Garrido, 2022).

No obstante, la propuesta de descarbonización resulta demasiado simplista, sesgada e insuficiente ya que desconoce todas las aristas que hacen a la complejidad del fenómeno. Presentando la TE como una simple sustitución técnica, esta concepción reproduce una mirada determinista tecnológica de los procesos de cambio social, económico y cultural (Garrido, 2022). En este trabajo de investigación, por su parte, se considera la energía, en general, y la TE, en particular, como un objeto de estudio de carácter esencialmente socio-técnico. En concordancia, se adopta la postura de Ariztía *et al*. (2017) quienes sostienen que el análisis de la problemática energética requiere ser pensado desde una perspectiva integral que abarque los diferentes aspectos técnicos, sociales, económicos, políticos y culturales que la comprenden y las formas variadas de implicación que existen entre energía y sociedad. En esta misma línea, Garrido (2022) plantea que, si bien las tecnologías juegan un papel relevante en todas las actividades de la vida cotidiana, estas no operan de forma aislada, sino que actúan como parte de procesos heterogéneos en los que se vinculan conocimientos, prácticas sociales, relaciones de poder e intereses económicos.

En suma, la TE está lejos de tener un significado unívoco. Es un concepto cargado de aspectos políticos, socioculturales y económicos, dotado de intereses y sentidos en disputa (Svampa y Bertinat, 2022). Desde empresas petroleras y representantes políticos internacionales hasta movimientos ecologistas y equipos científicos, actualmente coexisten diversas miradas de TE con igualmente diversos objetivos e intereses (Bertinat *et al*., 2020). Los significados de TE se (re)construyen durante el transcurso de un proceso de mediatización de la sociedad (Svampa y Bertinat, 2022).

En esta investigación, se consideran los medios de comunicación y la (re)producción de noticias como espacios claves de proliferación de sentidos de TE. El estudio de la producción de sentido posibilita comprender, parcialmente, las perspectivas e intereses que se ponen en juego al pensar un proyecto de país que contemple el proceso de cambio energético y social al que se dirige el mundo. La política energética llevada adelante por el Estado puede brindar pistas para conocer perspectivas políticas de la TE. Por lo expuesto, el objetivo de esta investigación es analizar los horizontes políticos de la TE a partir de los imaginarios sociotécnicos que circularon en los medios de comunicación digitales de la Provincia de Salta durante enero de 2022 y julio de 2024. Para ello, se toman como punto de partida los resultados de la investigación de Pedraza (2024) que analiza sentidos de TE durante enero de 2022 y septiembre de 2023. De este corpus inicial, se amplía el período de análisis -hasta julio de 2024- con el fin de poner en diálogo las diferentes expectativas creadas antes y después de la asunción de Javier Milei como presidente de la República Argentina.

DISEÑO TEÓRICO-METODOLÓGICO

Enfoque conceptual

El trabajo se apoya en el estudio de la producción de sentidos y, específicamente, en el concepto de *imaginarios sociotécnicos* como vía de acceso a los sentidos (Pedraza, 2024; González *et al.,* 2023*)*. La

noción de imaginarios sociotécnicos fue propuesta por Jasanoff y Kim (2009) para analizar la regulación de energía nuclear entre Estados Unidos y Corea del Sur. Para los autores, El concepto refiere a "visiones colectivamente imaginadas de vida y orden social que se inscriben en el diseño y puesta en marcha de proyectos tecnocientíficos a escala nacional" (p.120) y consideran, además, que el respaldo del concepto se basa en el creciente reconocimiento de la capacidad de imaginar futuros como un elemento constitutivo crucial de la vida social y política. Más aún, agregan que la imaginación -antes considerada mera fantasía e ilusión- es un importante recurso cultural que permite nuevas formas de vida al proyectar objetivos positivos y tratar de alcanzarlos.

Posteriormente, el concepto ha sido utilizado en numerosos estudios que abordan cuestiones del sistema energético en general. Hubert y Spivak L'Hoste (2021) retoman los imaginarios sociotécnicos para comprender, analizar y comparar los diferentes modelos energéticos deseables por los actores de una sociedad. En su investigación, los autores abordan las políticas de producción de energía eléctrica en Argentina en las últimas dos décadas a partir del rastreo de argumentos expertos. En ese marco, el concepto de imaginarios sociotécnicos aporta al estudio el abordaje múltiple de las especificidades políticas, sociales, culturales, económicas, ambientales y científicas-tecnológicas en torno a las políticas. Los autores consideran que varios imaginarios sociotécnicos coexisten en un mismo país y distinguen -en su análisis- tres que modelaron y orientaron las decisiones tecnológicas en energía eléctrica en Argentina: el imaginario mercantil, el desarrollista y el de la justicia socioambiental.

En el primer caso, el mercantil es un imaginario orientado por y para el mercado y se caracteriza por la concepción de la energía como bien de cambio de condición *commodity*. El interés apunta a definir y regular las condiciones de mercado que permiten el incremento de la competitividad económica y del atractivo del país para los inversores. En el imaginario mercantil, la necesidad de reducir la emisión de GEI opera como argumento para justificar la creación de oportunidades económicas para empresas privadas. Dentro de esta lógica, el rol del Estado en la producción de energía se ve subordinado a los criterios que establece el mercado. El sector privado se alza como el responsable en la toma de decisiones y el Estado se limita a generar instrumentos para regular los mercados y estimular la participación del sector privado.

Por su parte, el imaginario desarrollista postula al sector energético como un instrumento clave para el desarrollo socioeconómico e industrial del país. Es un imaginario que supone la necesidad de un Estado Nacional con visión estratégica y un proyecto de país orientado al objetivo de soberanía. En este marco, el interés está dirigido a alcanzar el autoabastecimiento energético, buscar la soberanía nacional y la autonomía para decidir cómo generar energía. Las tecnologías privilegiadas son aquellas que habilitan mayor participación de industrias locales, buscando generar nuevas capacidades técnicas y crecimiento del empleo. Siguiendo esa idea, el apoyo a la investigación y el desarrollo -a través de colaboraciones con laboratorios públicos, financiamientos de proyectos de innovación tecnológica, etc.- son centrales para desarrollar el sector energético y promover la intervención de la industria local en el sector. El interés común reside en fomentar las capacidades técnicas y humanas formadas en el país, definir las necesidades nacionales, apoyar la industria local y sostener la I+D+i local. Dentro de este imaginario, la exigencia de reducir las emisiones de GEI es responsabilidad de los países que se industrializaron con anterioridad.

Por último, el imaginario de la justicia socioambiental sostiene la necesidad de alcanzar una TE que no solo se asiente en una diversificación de la matriz energética, sino que se oriente a desmercantilizar, democratizar y desconcentrar el sistema energético. Asimismo, se erige un enfoque político orientado a hacer equitativas, democráticas, sanas y duraderas la producción y el consumo de energía. En esta misma línea, desde este imaginario se impulsa iniciativas respetuosas por el medioambiente, se critica procesos productivos (neo)extractivistas y se promueve la participación en la toma de decisiones de las poblaciones afectadas por los emprendimientos energéticos.

En esta investigación, y en línea con la propuesta de Jasanoff y Kim (2009) y Hubert y Spivak L'Hoste (2021), se partió de la premisa que los imaginarios sociotécnicos constituyen abstracciones de un universo de sentidos que subyacen a lo aparente. Esto es, parte de una red de significaciones

reconstruidas a través de la investigación empírica y de novedosa relevancia para los estudios CTS ya que contribuyen a comprender la adopción, la regulación y el impacto de la tecnología en la sociedad.

Enfoque metodológico

La estrategia metodológica abordada teje sus cimientos en el marco de la tradición aristotélica de investigación, bajo la lógica cualitativa y la construcción dialéctica de los procesos sociales. Asimismo, la lógica de investigación cualitativa demanda de un análisis holístico integral que sitúe el fenómeno en su contexto (Vasilachis de Gialdino, 1992). Para esta investigación fue preciso tener en cuenta el contexto sociocultural, ambiental y político alrededor de la problemática de la TE ya que, de otro modo, no se hubiera podido abordar enteramente su complejidad. Por lo expuesto, resulta necesario fundamentar las causas que propiciaron el recorte espacial y temporal del objeto de estudio.

En principio, la Provincia de Salta se erige como el terreno de la investigación. Específicamente, los medios de comunicación digitales que se asumen -autoconstruyen/autoperciben- como salteños. Este recorte espacial se debe a la consideración de la Provincia de Salta como región estratégica en recursos naturales valiosos para la TE. El boom del litio posiciona a la región como un actor clave en la industria minera y en la geopolítica de la energía. El rol del litio en la movilidad de las ER vincula directamente la industria minera litífera con la TE. En Salta, esto resulta aún más importante debido a la potencialidad de energía solar en la Puna y los Valles Calchaquíes. De allí que el recorte de textos periodísticos que alcanza el trabajo incluya noticias que mencionan el litio desde su rol en la movilidad. Asimismo, se realizó el análisis en medios digitales en vez de medios tradicionales en papel debido al aumento en la oferta informativa producto de la irrupción de internet. Esto permitió relevar una mayor cantidad de noticias producidas por diferentes portales. Además, los diarios digitales son, en la actualidad, más consumidos que los diarios en papel (Ministerio de Cultura de la República Argentina, 2023).

Ahora bien, el recorte temporal del objeto de estudio obedece a dos cuestiones. En primer lugar, la publicación de los *Lineamientos para un Plan de Transición Energética al 2030* por parte de la Secretaría de Energía del Ministerio de Economía de la Nación Argentina el día 1 de noviembre de 2021. En segundo lugar, la pertinencia del contexto electoral y la asunción de un nuevo presidente que prometía un giro en las expectativas creadas en materia energética.

Como se mencionó anteriormente, el corpus inicial tomado de Pedraza (2024) fue recuperado y ampliado a fin de abarcar los primeros meses del mandato de Javier Milei y establecer una comparación entre las expectativas creadas en torno al proyecto de TE antes y después de la asunción. De este modo, el recorte temporal quedó establecido hasta el 31 de julio del 2024.

Pasando a la dimensión técnica del trabajo, y al tratarse de textos periodísticos como unidades de análisis, la técnica de relevamiento de la información se basó en la investigación documental a través de fuentes secundarias (Yuni y Urbano, 2006) y siguió la propuesta metodológica de Sánchez Sabaté *et al.* (2019) para la creación de grandes corpus temáticos de noticias digitales. Las herramientas de búsqueda avanzada de *Google* y los buscadores internos de cada medio resultaron centrales en esta etapa. La selección de noticias incluyó a todas aquellas que establezcan la TE como temática central mediante mención directa, mención a las ER y mención al litio como recurso clave para la movilidad. De manera simultánea al rastreo y relevamiento de noticias, se realizó el correspondiente registro de datos en un instrumento diseñado para tal fin. El instrumento de registro (Tabla 1) tuvo por objetivo facilitar la sistematización y consignar la información general de cada noticia: título, autoría, fecha de publicación y medio donde se publicó. Estos datos sirvieron para caracterizar de forma general cada cuerpo noticioso y conocer el contexto de su procedencia. Luego, cada noticia fue descargada y convertida en documento Word para su posterior análisis.

Tabla 1: Instrumento de registro de noticias (recorte parcial)

N°	Título	Autor/a	Fecha	Medio
1	Avanza el interés de India por el litio y la movilidad	-	16/01/22	El Tribuno Salta
2	El litio con baja huella de carbono	-	29/01/22	El Tribuno Salta
3	"Queremos alentar la inversión en exploración"	-	12/02/22	El Tribuno Salta
4	La millonaria inversión que llega a Salta y generará cientos de puestos de trabajo	-	13/02/22	Que Pasa Salta
5	Cómo la crisis energética global impactará en Argentina	-	27/02/22	Diario Crónica del NOA

Por su parte, la técnica de análisis de la información se basó en la metodología del análisis de contenido (Krippendorff, 1990) con aportes de la codificación teórica (Yuni y Urbano, 2006) y, principalmente, de la codificación axial (Strauss y Corbin, 2002). Las noticias fueron codificadas mediante la utilización del software de análisis cualitativo de datos ATLAS.ti. Este programa permite organizar, segmentar y gestionar los datos y códigos (San Martin, 2014). Los datos se obtienen marcando fragmentos de texto con los códigos generados, convirtiendo el fragmento en cita -según la terminología del programa-, un segmento significativo que contiene el fenómeno estudiado.

Los imaginarios propuestos por Hubert y Spivak L'Hoste (2021) -mercantil, desarrollista y de la justicia socioambiental- actuaron como parámetros de significados y ayudaron a orientar la creación de códigos. Trabajos previos (Duran *et al.,* 2024; González *et al*., 2023) demostraron que los imaginarios de Hubert y Spivak L'Hoste son demasiado generales para comportarse como códigos de análisis ya que abarcan, al mismo tiempo, múltiples aspectos de la TE. En línea con esta cuestión, estas investigaciones plantearon que esos aspectos serían mejor apreciados y analizados si se constituyeran como subcódigos de análisis específicos de una sola dimensión de la TE. De este modo, los imaginarios de Hubert y Spivak L'Hoste sirvieron al análisis, pero en carácter de grupos de códigos que agrupaban códigos más específicos. Además, siguiendo lo propuesto por Pedraza (2024) se agregó un cuarto imaginario sociotécnico de carácter transversal al resto: el imaginario de transformación de la matriz energética. Según la autora, la creación de este cuarto imaginario se debe a que el objetivo de diversificación de la matriz energética es abordado desde los tres imaginarios de Hubert y Spivak L'Hoste, pero desde lógicas distintas. Posteriormente, con los códigos delimitados, se procedió a elaborar el libro de códigos (Tabla 2). El libro de códigos es el resultado de la codificación axial y se constituye como el principal parámetro de análisis de los textos noticiosos.

Tabla 2: Libro de códigos

Grupos de códigos	Códigos
Imaginario mercantil	TE como oportunidad de inversión
	TE como oportunidad de posicionarse en el mercado minero global
	TE como estrategia geopolítica
	TE como crecimiento económico
	TE como expresión de la agenda del Norte Global
Imaginario desarrollista	TE como impulso al desarrollo socioeconómico de la región
	TE como fuente de empleo
	TE como soberanía energética
	I+D+i local como fomento a la TE
	TE como responsabilidad de los países del Norte Global
	Gas como recurso clave de la TE
	TE como responsabilidad del Estado
	TE como acciones para mitigar el cambio climático

Imaginario de la justicia socioambiental	TE como acceso a la energía
	TE como soberanía energética popular
	TE como cambio sociocultural del modelo civilizatorio
	TE como eficiencia energética
	Crítica al extractivismo
Imaginario de transformación de la matriz energética	Litio como recurso clave para la TE
	TE como descarbonización

RESULTADOS

Los resultados del trabajo de campo dieron cuenta de 23 medios digitales salteños que tematizaron sobre la TE durante el periodo seleccionado. Asimismo, el universo quedó conformado por 306 noticias (Tabla 3). Uno de los primeros resultados denota la amplia hegemonía de *El Tribuno Salta* en la producción de noticias sobre TE, con un total de 83 publicaciones. Desde esta investigación, y en conformidad con Pedraza (2024) y Binda Galíndez y Javi (2022), se atribuye este resultado a la realización del ciclo multiplataformas "*Hablemos de lo que viene"* denominado "*Energías renovables: el camino de la transición*" realizado en junio del 2022. Este evento no solo derivó en la publicación de múltiples noticias relacionadas a la cobertura del evento, sino que también instaló -durante ese lapso- la temática de la TE en la agenda del medio.

Tabla 3: Cantidad total de noticias por medio

Medio digital	Cantidad de noticias	%
El Tribuno Salta	83	27,1%
Diario Crónica del NOA	27	8,8%
Que Pasa Salta	26	8,5%
Cable a Tierra	17	5,6%
Todo Salta	16	5,2%
Salta/12	15	4,9%
Informate Salta	15	4,9%
Aries On line	14	4,6%
Salta 4400	13	4,2%
FM Profesional de Salta	12	3,9%
Opinorte	11	3,6%
El Nuevo Diario de Salta	11	3,6%
La Hora de Salta	9	2,9%
Diario Punto Uno	8	2,6%
Copenoa	8	2,6%
Cuarto Poder Salta	5	1,6%
Salta Mining	5	1,6%
Cuarto Salta a Diario	3	1,0%
Noticias de Minería	3	1,0%
Datasa	2	0,7%
Diario Salta	1	0,3%
Voces Críticas	1	0,3%
El Intra Salta	1	0,3%
TOTAL	**306**	**100%**

A continuación, a modo de facilitar la comparación entre los períodos pre y post cambio de gobierno, se divide el análisis en dos. En primer lugar, se toma el período comprendido desde enero de 2022 hasta noviembre de 2023. Este abarca el corpus de Pedraza (2024) y amplia con los meses de octubre y noviembre a fin de completar la etapa previa a la asunción de Javier Milei como presidente de la República Argentina. Luego, en segundo lugar, se toman los meses desde diciembre de 2023 hasta julio de 2024 como el período post Javier Milei, a fin de cubrir los primeros ocho meses de su mandato.

Transición energética para el desarrollo nacional: sentidos previos al cambio de gobierno nacional

Los resultados de la investigación, durante enero de 2022 y noviembre de 2023, encuadraron los sentidos de TE, mayoritariamente, dentro de los imaginarios desarrollista y de transformación de la matriz energética (Tabla 4), ubicando el sistema energético como instrumento clave para el desarrollo social, económico e industrial del país.

Tabla 4: Cantidad de citas por imaginario en el período pre Milei

Grupos de códigos	Cantidad de citas	
	Fa	%
Imaginario desarrollista	316	31,9%
Imaginario de transformación de la matriz energética	290	29,3%
Imaginario mercantil	220	22,2%
Imaginario de la justicia socioambiental	165	16,6%
TOTAL	**991**	**100,0%**

El fuerte componente político nacionalista del imaginario desarrollista se ve representado en la voz de los mandatarios. Los políticos -en este período- fueron los actores sociales que más (re)produjeron sentidos de TE vinculados al desarrollo de las economías regionales, el crecimiento de la industria local y la soberanía energética. Las nociones de desarrollo y progreso subyacen en estos discursos donde la TE emerge como una oportunidad de instalar un nuevo modelo de acumulación volcado a la industrialización y no sólo a la producción de materia prima, a fin de garantizar la independencia energética y, por ende, la soberanía nacional. Estos sentidos se pueden apreciar en los códigos que registran mayor frecuencia de aparición en el periodo seleccionado (Tabla 5).

Tabla 5: Cantidad de citas por código en el período pre Milei

Códigos		Cantidad de citas	
		Fa	%
1	Litio como recurso clave para la TE	157	15,8%
2	TE como descarbonización	133	13,4%
3	TE como impulso al desarrollo socioeconómico de la región	114	11,5%
4	TE como fuente de empleo	81	8,2%
5	TE como oportunidad de inversión	78	7,9%
6	TE como oportunidad de posicionarse en el mercado minero global	55	5,5%
7	TE como acciones para mitigar el cambio climático	50	5,0%
8	TE como estrategia geopolítica	46	4,6%
9	TE como soberanía energética	45	4,5%
10	I+D+i local como fomento a la TE	34	3,4%
11	TE como acceso a la energía	32	3,2%
12	TE como eficiencia energética	29	2,9%
13	TE como crecimiento económico	26	2,6%
14	TE como soberanía energética popular	24	2,4%
15	TE como responsabilidad del Estado	19	1,9%

16	Crítica al extractivismo	16	1,6%
17	TE como expresión de la agenda del Norte Global	15	1,5%
18	Gas como recurso clave de la TE	15	1,5%
19	TE como cambio sociocultural del modelo civilizatorio	14	1,4%
20	TE como responsabilidad de los países del Norte Global	8	0,8%
TOTAL		**991**	**100,0%**

La alta frecuencia de los códigos respectivos al litio y la descarbonización es previsible ya que, como se mencionó antes, estos códigos son parte del imaginario de transformación de la matriz energética, de carácter transversal al resto. Asimismo, los sentidos que disputan estos códigos se enriquecen al hacerlos dialogar con los códigos del imaginario desarrollista. De este modo, adquiere fuerza y se pone en valor la TE como impulso a las economías regionales, fuente de puestos trabajo y posicionamiento del sistema científico-tecnológico como actor clave del proceso, priorizando la formación de las capacidades técnicas y humanas nacionales, y la participación y el crecimiento de las industrias locales. A continuación, se cita un ejemplo donde se aprecian estos sentidos:

> "El mandatario destacó la importancia de este mineral clave, que tiene la potencialidad para desarrollar la industria minera y convertirse en un gran dinamizador de las economías regionales, generando empleo y desarrollo de proveedores a lo largo de toda su cadena de valor" (*Cable a Tierra*, 10/08/23).

Otro emergente valioso de este período es la concepción del gas como combustible puente de la TE. Este código, aunque no registre demasiada frecuencia, resulta enriquecedor para el análisis ya que es un código emergente del objeto empírico. La secretaria de Energía de la Nación durante este período, Flavia Royón, destacó, en las noticias analizadas, que Argentina definió el gas como el combustible de la TE debido a que es un recurso que el país posee -gracias a Vaca Muerta- y con el que se proyecta afrontar el futuro del paradigma energético nacional. Asimismo, la ex funcionaria destacó la potencialidad del gas para generar financiamiento, contribuir a la descarbonización, crear puestos de trabajo, garantizar el desarrollo endógeno y autoabastecer el sector energético del país. Más aún, significó el gas como una ventana de oportunidades para el país respecto al abandono del rol de importador de recursos para pasar a ser un jugador exportador, de presencia y relativa independencia en el comercio internacional. A continuación, se presenta una cita donde subyacen estos sentidos:

> "Argentina definió que el gas es el combustible de la transición energética, porque genera muchas menos emisiones que otros tipos de combustibles. Y Argentina tiene la segunda reserva de gas en el mundo […] El desarrollo de Vaca Muerta y el desarrollo del crudo en Argentina es clave: porque para la transición, es necesario financiamiento. Cuando se encara un proyecto de parque solares o eólicos, también hay que mirar la necesidad de productos importados que estos requieren" (*Diario Crónica del NOA*, 18/05/23).

Por último, interesa poner en valor otro código emergente del objeto empírico*: TE como responsabilidad del Estado*. Este código pone de manifiesto como desde funcionarios públicos hasta personas del mundo académico abogan por la presencia del Estado en problemáticas de actual relevancia -y urgencia- como la TE. Desde estos enunciados se concibe el fenómeno como una tarea a abordar que el Estado debe llevar a cabo, ya que, sin apoyo y financiamiento, sin políticas públicas de fomento, la TE en Argentina no tendrá piso donde pararse y quedará subordinada a los intereses de los países dominantes, sin voz ni voto en la toma de decisiones. A continuación, se cita un fragmento donde estos sentidos se aprecian:

> "Sáenz remarcó acerca de la falta de obras que ayuden al desarrollo de la minería y se dirigió al próximo gobierno: 'Independientemente de quién gobierne el país y las provincias, estos proyectos deben continuar. En la mesa deben estar la Nación, las provincias, los empresarios y todos los que quieren que esto siga creciendo. De Jujuy, Salta y Catamarca saldrán las baterías que necesita el mundo para la transición energética'" (*El Nuevo Diario de Salta*, 29/05/23).

Giro en las expectativas creadas: sentidos posteriores al cambio de gobierno nacional

En contraste con el período anterior, las noticias publicadas durante diciembre de 2023 y julio de 2024, encuadraron los sentidos de TE, ampliamente, dentro de los imaginarios mercantil y de transformación de la matriz energética (Tabla 6). Estos sentidos definen la TE desde una dimensión material economicista preocupada por la competitividad económica, el atractivo del país para atraer inversiones y la consolidación de empresas privadas en el seno de las relaciones internacionales. Por su parte, los sentidos correspondientes al imaginario desarrollista quedaron muy por debajo, con sólo un 18%.

Tabla 6: Cantidad de citas por imaginario en el período post Milei

Grupos de códigos	Cantidad de citas	
	Fa	%
Imaginario mercantil	102	36,7%
Imaginario de transformación de la matriz energética	100	36,0%
Imaginario desarrollista	50	18,0%
Imaginario de la justicia socioambiental	26	9,4%
TOTAL	**278**	**100,0%**

Como se señaló en el apartado anterior, resulta previsible la alta frecuencia de los códigos del imaginario de transformación de la matriz energética. Sin embargo, el dato que llama la atención es la fuerte presencia del código *TE como estrategia geopolítica* (Tabla 7). Estos sentidos, si bien tenían cierta presencia en el período 2022-2023, no eran los hegemónicos. En este período, en contraste, el cambio de gobierno nacional le dio fuerza a los discursos que pregonan por una visión mercantilista y corporativa de la TE y ven en el fenómeno una oportunidad de acumulación de riqueza, concentración del poder y posicionamiento hegemónico geopolítico.

Tabla 7: Cantidad de citas por código en el período post Milei

Códigos		Cantidad de citas	
		Fa	%
1	Litio como recurso clave para la TE	63	22,7%
2	TE como estrategia geopolítica	40	14,4%
3	TE como descarbonización	37	13,3%
4	TE como oportunidad de inversión	28	10,1%
5	TE como oportunidad de posicionarse en el mercado minero global	26	9,4%
6	TE como fuente de empleo	19	6,8%
7	TE como impulso al desarrollo socioeconómico de la región	15	5,4%
8	TE como acciones para mitigar el cambio climático	14	5,0%
9	I+D+i local como fomento a la TE	8	2,9%
10	TE como soberanía energética	6	2,2%
11	TE como expresión de la agenda del Norte Global	4	1,4%
12	TE como crecimiento económico	4	1,4%
13	TE como acceso a la energía	4	1,4%
14	TE como cambio sociocultural del modelo civilizatorio	2	0,7%
15	TE como responsabilidad de los países del Norte Global	2	0,7%
16	Crítica al extractivismo	2	0,7%
17	TE como soberanía energética popular	2	0,7%
18	TE como eficiencia energética	2	0,7%
19	Gas como recurso clave de la TE	0	0,0%
20	TE como responsabilidad del Estado	0	0,0%
TOTAL		**278**	**100,0%**

Estos sentidos se asientan en un fuerte sesgo eurocéntrico y economicista. No se interesan por cuestionar el paradigma energético dominante ni poner en consideración las asimetrías entre Norte y Sur globales, sino que, al contrario, ven en las tecnologías de ER una herramienta para perpetuar el actual modelo de desarrollo centralizado. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

> Durante las discusiones, se abordó el papel fundamental que desempeña Argentina, no solo en la transición energética, sino también en la estrategia europea para la diversificación de proveedores (Aries On Line, 02/02/24).

> Es fundamental potenciar las inversiones en litio para que Argentina coopere con minerales críticos de cara a la transición energética y que crezcan las exportaciones para poder acumular reservas (Cuarto Salta Diario, 22/01/24).

Lo dominante en estos discursos asocia la TE al crecimiento económico, las oportunidades de inversión y el fortalecimiento de la posición del país como actor estratégico en la nueva era post-fósil a la que se dirige la humanidad. Retomando esto último, desde estos sentidos se puede connotar una fuerte adscripción al proyecto de TE impulsado por los países del Norte, sin tomar en cuenta las particularidades de los territorios del Sur.

> Salta sigue liderando el ranking de las principales provincias como destino de las inversiones mineras. También agregó que la provincia sigue mostrando al mundo entero que es un proveedor seguro de los minerales críticos para la transición energética (Salta Mining, 02/03/24).

Un emergente de este período es la nula presencia de los códigos *Gas como recurso clave de la TE* y *TE como responsabilidad del Estado.* Como se señaló anteriormente, Gustavo Sáenz y Flavia Royon eran quienes promulgaban por llevar a cabo la transición con el gas como combustible puente y con el apoyo del Estado Nacional. En este nuevo período, en cambio, la TE ya no es más un deber estatal, sino que queda, ahora, en mano de las empresas privadas y sus intereses.

Mientras que en el período enero 2022-septiembre 2023, los *códigos TE como impulso al desarrollo socioeconómico de la región* y *TE como fuente de trabajo* disputaban la hegemonía de sentidos, en el período diciembre 2023-julio 2024 son apenas marginales, con apenas un 5,4% y 5,0% de representatividad, respectivamente. Este dato demuestra cómo se corrió el eje en el proyecto nacional de TE, pasando de una TE preocupada por el desarrollo endógeno de las economías regionales a una TE interesada en explotar al máximo los recursos disponibles a fin de tener peso en la arena internacional y contribuir al objetivo de descarbonización a gran escala llevado adelante por las principales naciones del mundo. Sin embargo, vale aclarar, esta contribución se plantea en términos de una inserción subordinada y dependiente del país como proveedor de materias primas. No se habla más de industrializar en territorio nacional, con componentes nacionales y mano de obra local. No se tiene como objetivo autoabastecer el sistema energético nacional y buscar una suerte de soberanía. No se habla más de Vaca Muerta. Los discursos actuales en torno a la TE problematizan el litio y los beneficios económicos de su explotación.

CONCLUSIONES

En esta investigación se problematizaron los sentidos de TE que circularon en los medios digitales salteños durante enero de 2022 y julio de 2024. Los resultados dieron cuenta de la correspondencia de los períodos 2022-2023 y 2024 con los imaginario desarrollista y mercantil, respectivamente. Más aún, se corroboró la coexistencia de estos imaginarios con el imaginario de transformación de la matriz energética, disputando intereses disimiles en el proceso de cambio tecnológico y social. En lo que respecta al imaginario de justicia socioambiental, vale aclarar que fue desestimado del análisis ya que, en ambos períodos, no registraba representatividad y, por tanto, no aportaba a la configuración de sentidos dominantes de TE.

La investigación, además, dio cuenta de un giro en las expectativas políticas -plasmadas en medios locales- creadas en torno al proceso de transición producto del cambio de gobierno nacional. El horizonte

político de la TE trazado durante el período enero 2022- noviembre 2023 -previo a la asunción del nuevo presidente- postulaba el fenómeno como una oportunidad de alcanzar la soberanía energética, impulsar el desarrollo socioeconómico e industrial del país y generar empleo en las distintas áreas de las ER y el litio. Estas visiones de futuro -imaginarios sociotécnicos- fueron reemplazadas en el período diciembre 2023-julio 2024 por un nuevo proyecto de TE concebido desde una dimensión material economicista preocupada por la competitividad económica, la atracción de inversiones y la consolidación del país en el seno de la geopolítica.

El nuevo horizonte de la TE se corresponde con el proyecto de país del nuevo gobierno: en el rol de proveedores asignado al país por el mercado mundial. La transición propuesta reproduce los intereses del Norte Global, en detrimento de las necesidades del Sur. Los países capitalistas industrializados y dominantes -los cuales, además, son los máximos responsables de la actual crisis climática- impulsan una TE enfocada en descarbonizar el mundo y migrar hacia las ER. Esto implica, para los países capitalistas periféricos y dependientes, afrontar cambios estructurales y con altos costos, tanto económicos como sociales.

En conclusión, la TE es, según los medios de comunicación, un fenómeno en curso económicamente urgente e inevitable. Lo que queda es definir quienes van a liderar el proceso y quienes van a quedar atrás. Los pueblos del Sur tienen la obligación de no dejarse hablar por otros, no dejarse imponer intereses foráneos sobre los recursos y territorios, no (re)producir sentidos de TE que perpetúen las desigualdades existentes, las asimetrías entre el Norte y el Sur (Gonzalez *et al.,* 2023). Si el nuevo horizonte del proceso de TE en Argentina se propone en el marco de un nuevo estadio del capitalismo y en el mismo lugar asignado de proveedores de materia prima a un modelo foráneo, la TE se construye, así, como una imposición del Norte al Sur en los modos de ser, estar, vivir y habitar, sin posibilidades de progreso y desarrollo endógeno.

NOTA

[1]La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo (Suecia) en junio de 1972, fue la primera conferencia mundial en hacer del medio ambiente un tema importante. Uno de los principales resultados fue la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2020-SERIEA-01759) “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)” financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica y el Proyecto de Investigación TIPO A N°2916/0 “Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina” financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) por las becas que hicieron posible este trabajo. Además, se agradece la colaboración del Grupo de Estudios Socio-técnicos de la Energía y del Hábitat (GESEH).

REFERENCIAS

Ariztía, T.; Boso, A. y Tiron, M. (2017). Sociología de la energía. Hacia una agenda de investigación. *Revista Internacional de Sociología*, 75(4), 1-7. https://doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.07

Bertinat, P.; Chemes J. y Forero L. (2020). *Transición energética. Aportes para la reflexión colectiva.* Transnational Institute y Taller Ecologista.

Binda Galíndez, C. y Javi, V. (2023). Energías renovables y transición energética. Una mirada desde la prensa digital de Salta en el 2022. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 50, 45–53. https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/3864

Duran, P. A.; Pedraza, M. L.; Picabea, F. (2024). Transición energética, extractivismo y cibermedios en Salta. Pluriversos de la Comunicación, 2(2), 135-149. https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/pluriversos/article/view/4191

Fernández Pedemonte, D. (2018). *Producción de sentido en los medios de comunicación: Paradigma interpretativo, relato y casos*. Editorial Académica Española.

Garrido, S. (2022). *Transición energética en Sudamérica. Discusión conceptual, políticas públicas y experiencias locales.* Lenguaje Claro Editora.

González, F.; Hessling, F.; Montone, M. (2022). Los estudios sociales de la energía y de la política energética desde el campo de la Comunicación. Apuntes para una agenda de investigación emergente. *Cuadernos de la Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales*, 61, 165-185. http://hdl.handle.net/11336/216467

González, F.; Pedraza, M. L.; Cornú, C. N.; Mendieta Albarracín, B. (2023). Nociones de Transición Energética en Salta: Una aproximación a cómo (re) producen sentidos los medios de comunicación locales (Argentina, 2023). *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 27, 515-526. https://drive.google.com/file/d/1PAm50X8k7IQP0xf26GV6pgaXE7p9719g/view

Hubert, M. y Spivak L'Hoste A. (2021). Los imaginarios sociotécnicos de las políticas de producción de energía eléctrica en Argentina. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, *6*(47), 223-250. https://www.revistacts.net/wp-content/uploads/2021/07/09Spivak.pdf

Jasanoff, S. y Kim, S. H. (2009). Containing the Atom. Sociotechnical Imaginaries and Nuclear Power in the United States and South Korea. *Minerva*, 47, 119-146. https://doi.org/10.1007/s11024-009-9124-4

Kazimierski, M. (2021). La transición energética en disputa: del tablero geopolítico a la dimensión societal. *Revista de Estudios Marítimos y Sociales*, (18), 91-120. https://estudiosmaritimossociales.org/rems/rems18/04.pdf

Krippendorff, K. (1990). *Metodología del análisis de contenido.* Paidós Comunicación.

Ministerio de Cultura de la República Argentina (2023). *Encuesta Nacional de Consumos Culturales 2022.* https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/05/encc2023_informe_preliminar.pdf

Pedraza, M. L. (2024). *Imaginarios de Transición Energética en cibermedios de la Provincia de Salta (2022-2023)* [Tesis de Grado] Universidad Nacional de Salta.

Sabaté Sánchez, R.; del Valle, C. y Mensa, M. (2019). Método para la construcción de grandes corpus temáticos de noticias de prensa digital. Hacía un corpus sobre el hecho alimentario. *Revista Latina de Comunicación Social,* (74), 594-617. https://doi.org/10.4185/RLCS-2019-1347

Saintout, F. (2013). Los medios y la disputa por la construcción de sentido. *Revista Praxis en las encrucijadas de la civilización*, 1.

San Martín, D. (2014). Teoría fundamentada y Atlas.ti: recursos metodológicos para la investigación educativa. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 16(1), 104-122. http://redie.uabc.mx/vol16no1/contenido-sanmartin.html

Strauss, A. y Corbin, J. (2002). *Bases de la investigación cualitativa. Técnicas y procedimientos para desarrollar la Teoría Fundamentada.* Universidad de Antioquia.

Svampa, M. y Bertinat, P. (2022). *La transición energética en Argentina.* Siglo XXI Editores.

Vasilachis de Gialdino, I. (1993). El análisis lingüístico en la recolección e interpretación de materiales cualitativos. En F. Forni; M. A. Gallart e I. Vasilachis de Gialdino. *Métodos cualitativos II. La práctica de la investigación* (pp.153-210). Centro Editor de América Latina.

Yuni, J. A. y Urbano C. A. (2006*). Técnicas para investigar. Análisis de datos y redacción científica.* Brujas.

POLITICAL HORIZONS OF THE ENERGY TRANSITION: AN APPROACH FROM THE MEDIA IN THE PROVINCE OF SALTA (2022-2024)

ABSTRACT: This research analyses the socio-technical imaginaries of energy transition that circulated in the digital media of the Province of Salta between January 2022 and July 2024. The objective is to analyse the political horizons of the transition process, focusing on the different expectations created before and after the change of national government in Argentina. The survey technique was

documentary research through secondary sources and the analysis technique was based on content analysis and theoretical coding. The results showed a shift in the expectations created around the transition process as a result of the change of national government. In the first period of analysis, prior to the inauguration of the new president, the hegemony of meanings defined the transition as a process of key technological change for the country's socio-economic, political and industrial development. In contrast, since December 2023, the energy transition has been conceived from an economistic material dimension concerned with economic competitiveness, attracting investment and the country's insertion into geopolitics as a supplier of primary goods and services.

Keywords: digital media, energy transition, content analysis.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 406-415, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD ELÉCTRICA EN EL CONTEXTO DEL TRANSPORTE SOSTENIBLE EN ARGENTINA

Jorge Chemes, Luís Molinari, Sergio Mansur
Universidad Tecnológica Nacional
Universidad Nacional de Río Negro
CONICET
chemesj@gmail.com, ingeniero.molinari@gmail.com, sergiomansur@gmail.com

RESUMEN: La transición energética en América Latina está instalada en diversos ámbitos, y atender la movilidad resulta crucial ya que en la región es el sector que más energía demanda. Este trabajo tiene como objetivo analizar el rumbo de la planificación de la transición energética en el sector transporte en Argentina, teniendo en cuenta el Plan Nacional de Transporte Sostenible, los datos del mercado y fundamentalmente los lineamientos de acciones que determinarán el futuro del transporte de personas en nuestro territorio. Todo lo anterior enmarcado en la velocidad de respuesta que debe darse para encausar la baja de las emisiones de manera tal de cumplir con los objetivos comprometidos, pero también para brindar las herramientas necesarias a los actores de la economía de Argentina en términos de acceso a mercados internacionales exigentes con la reducción de emisiones en origen. Los resultados acusan que en un plazo de 10 a 15 años no estarían dadas las condiciones técnicas y económicas para sincronizar las agendas de la movilidad eléctrica y la descarbonización en Argentina con un desarrollo local.

Palabras clave: Transición energética, movilidad, movilidad eléctrica, descarbonización.

INTRODUCCION

La necesidad de transitar a sistemas que emitan menos gases de efecto invernadero es urgente e inevitable dadas las condiciones límites de habitabilidad relacionadas al cambio climático de origen antropogénico, enmarcado en los conceptos de antropoceno y capitaloceno (Lander, 2011; Moore, 2016; Aráoz y César, 2016; Acosta, 2018; Svampa, 2019; Leff, 2021). En este sentido el discurso dominante asocia la transición energética a los procesos de descarbonización para mitigar el cambio climático. El sector energético es uno de los principales causantes del cambio climático debido al alto grado de consumo de combustibles fósiles. El sector energético es responsable (directa e indirectamente) del 73% de las emisiones de CO_2 equivalente (ver Figura 1), con una especial relevancia del sector industrial, el transporte y el consumo en edificios (Ritchie, 2020). Por tanto, esta transición del discurso dominante implica reemplazar fuentes de energía de altas emisiones de gases de efecto invernadero a otras que generen menores emisiones sumado a mecanismos de eficiencia energética.

En sus reportes globales de energías renovables de los últimos años IRENA (2020, 2022) da cuenta de su escenario energético para no superar en 1,5ºC la temperatura promedio a nivel mundial. Como línea base, en la actualidad se consumen aproximadamente 100 millones de barriles de petróleo por día, en este contexto, los escenarios para mantener las condiciones de vida en el planeta requieren en el año 2030 que la demanda caiga a 60 millones de barriles de petróleo por día, en el 2040, 41; y en el 2050, 22 millones de barriles. Una desaceleración de la demanda de casi el 80%. En este marco diversas narrativas pujan por la construcción de sentido en relación con los modelos de desarrollo y su relación con la energía para imponer o co-construir escenarios de transición energética.

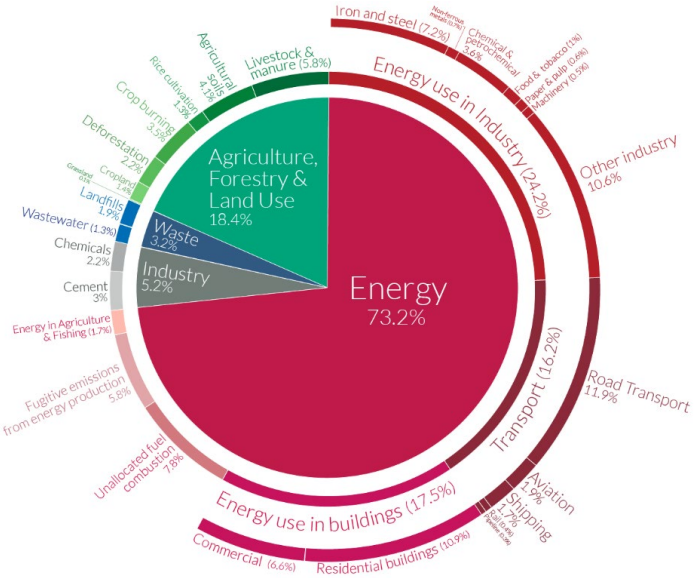


Figura 1: Emisiones mundiales de GEI por sector. Fuente: (Ritchie, 2020)

Es importante resaltar, tal como muestra en la Figura 2, que la matriz energética de América Latina es de las más renovables en términos porcentuales debido a la hidroelectricidad. OLADE en sus últimos informes (2023) da cuenta de una dependencia fósil (gas y petróleo) del 64% en su matriz primaria. Respecto a la demanda, es el sector transporte el que mayor energía consume, con el 39%, seguido por la industria y el sector residencial con 28% y 18% respectivamente.

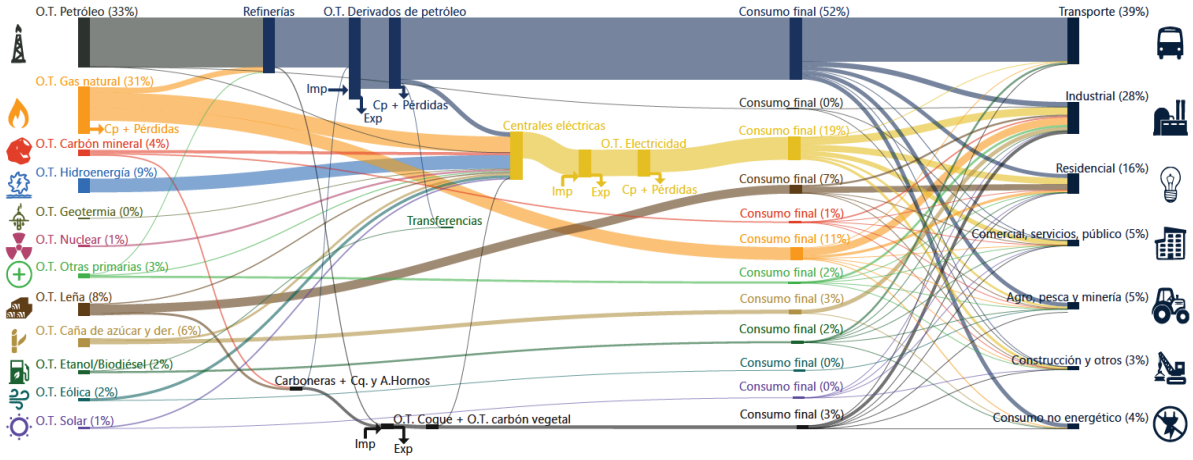


Figura 2: Balance energético resumido 2022 de ALyC. Fuente (OLADE, 2023)

De este modo, pensar en la transición energética de ALyC implica pensar las dinámicas del transporte como eje central, ello lleva a reflexionar no solo sobre qué tipo de vehículo utilizamos, sino como diseñamos las ciudades y su movilidad, que producimos, dónde, cómo y para qué transportamos mercancías; y del mismo modo, qué y cómo consumimos; así es necesario pensar sobre las lógicas de producción-consumo local.

En Argentina, históricamente la mayor demanda de energía se disputa entre el sector residencial, industrial y transporte, quién ocupe el primer lugar dependerá del momento socio-histórico del país. Y como el sector de transporte es el que demanda los combustibles que más GEI emiten en los últimos años es el sector más contaminante en este sentido. En la Figura 3 se aprecia la evolución histórica de las emisiones de GEI de cada sector.

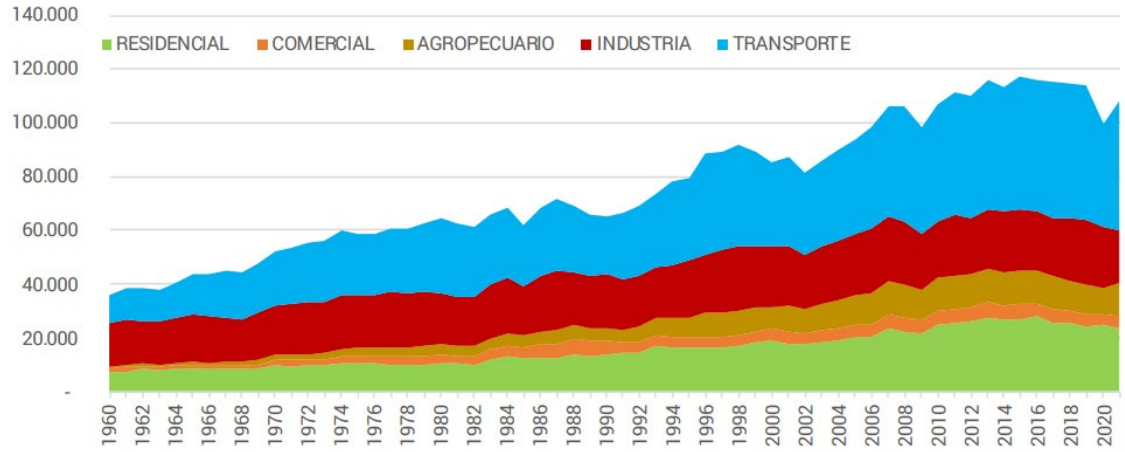


Figura 3: Emisiones de Gg CO2 por sector de consumo 1960-2021. Fuente: (Secretaría de Energía de la Nación, 2023)

Y en este último sentido, si se observa solo la contribución de GEI de los combustibles utilizados por el sector transporte en Argentina (Figura 4), son las naftas y gasoil los mayores aportantes, siendo considerablemente menor el aporte del gas.

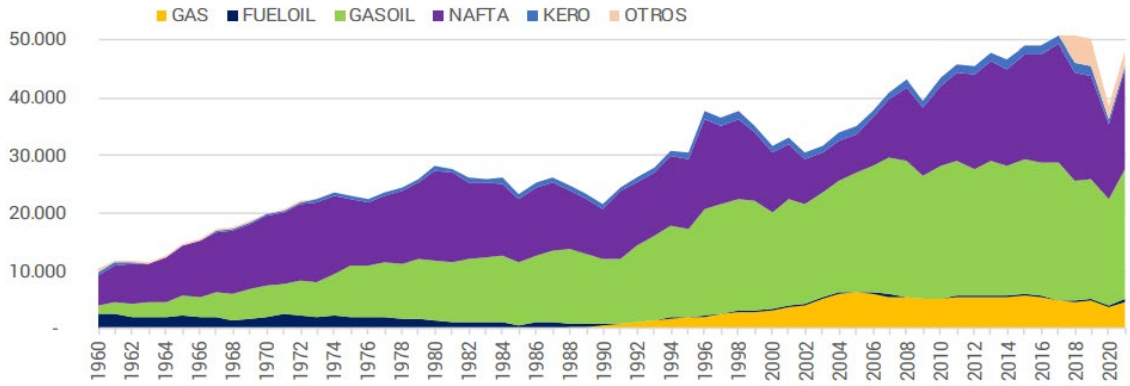


Figura 4: Emisiones sector transporte (Gg CO2) 1960-2021. Fuente: (Secretaría de Energía de la Nación, 2023)

De este modo, una de las preguntas que intentará responder este documento es si realmente se está avanzando en la dirección y velocidad adecuada hacia la descarbonización del sector transporte en Argentina, y en particular si la movilidad eléctrica en vehículos particulares impulsada por Europa y Occidente son la mejor opción en el corto y mediano plazo para Argentina. Se acotará este análisis al transporte privado de pasajeros particulares. Y para ello en primer lugar se hará un breve análisis de datos en base a estadísticas de entidades del gobierno nacional y algunas organizaciones del sector privado.

POLÍTICAS Y ESCENARIOS LOCALES DE MOVILIDAD

El Plan Nacional de Transporte Sostenible plantea una reducción de 5,84 millones de toneladas CO_{2eq} para 2030, apenas el 10% de las emisiones generadas por el sector (Ministerio de transporte, 2022). Además, plantea como uno de sus objetivos iniciales mudar el 10% del transporte de carga y de pasajeros hacia movilidad eléctrica y gas natural: 10.000 unidades nuevas de transporte público y particular con movilidad eléctrica y 90.000 unidades a gas sin una definición temporal.

Entre sus metas a 2030, plantea la mudanza de parte de la flota de vehículos estatales de 8,7% a 12,3% a GNC e incorporar un 2,2% de vehículos eléctricos en la flota pública. Por otra parte, durante 2022 fue presentado al Congreso Nacional, por iniciativa del poder ejecutivo, un proyecto de ley de movilidad sostenible, con una tendencia clara y concreta sobre la movilidad eléctrica, incluso

prohibiendo la comercialización los motores de combustión interna a partir del año 2041 (Kulfas, 2021).

Para realizar un breve análisis de composición del mercado nacional, el transporte de pasajeros y cargas en Argentina, según el Balance Energético Nacional en 2022 representa el 31,5% del consumo energético de Argentina (Secretaría de Energía de la Nación, 2023). Además, el Cuarto Informe Bienal de Actualización IBA (MAyDS, 2021), indica que el transporte emite en Argentina 51,05 millones de toneladas CO_{2eq}, un 27% del total en el sector energético, representando un 13,49% sobre las emisiones totales del país, y superior por ejemplo, a la contribución de la generación de energía eléctrica del país que representó el 11,14%. Esas emisiones dentro de transporte corresponden 90,1% al transporte terrestre, el 3,7% a la aviación civil, 2% navegación, 1% ferroviario, y otros un 3,3%.

En términos de utilización de combustibles para el transporte terrestre, se utiliza el 66% del gasoil consumido en el país (en esta parte del análisis no se contabiliza el uso del gasoil en la actividad agrícola), el 100% de las naftas y el 11,3% del gas natural. En términos cuantitativos y de combustibles, durante 2022 se vendieron según ADEFA 9.919 millones de metros cúbicos de naftas y 14.778 millones de metros cúbicos de gasoil de diferentes grados.

Según la Dirección Nacional de Registros de la Propiedad Automotor a fines de 2022, en Argentina existe un parque activo de vehículos en condiciones de circular de 17.356.861, y según ADEFA 4.349.210 de esos vehículos no se los pudo clasificar, pero se puedo tomar como válido que el 75,7% son automóviles, el 18,9% son livianos, 4,9% vehículos de carga, y 0,6% transporte de pasajeros. Del total de vehículos el 63% corresponden a nafteros, y del 24,8% diésel y el 11% convertidos a GNC.

Por lo tanto, de las cifras anteriores, se puede estimar que a finales de 2022 en Argentina circularon 13.139.143 automóviles. De ese total 10.934.822 son automóviles nafteros, y 1.909.255 automóviles nafteros convertidos a GNC, y 295.066 automóviles diésel. Para completar el análisis de movilidad privada de usuarios particulares, se debería también considerar las pickups y vehículos comerciales livianos que pueden en algunos casos tener la función de traslado particular de pasajeros, representando esta categoría una parte de ese 18,9% de vehículos livianos, pero quedará afuera del análisis por el momento.

Para el primer punto de este estudio, debe cuestionarse si una reducción de emisiones del 10% en el sector, que tiene semejante peso en las emisiones totales, es realmente un esfuerzo importante; y sobre todo si esta medida impulsa realmente la transformación a la velocidad que el sector necesita.

Este análisis debe realizarse no solo en el concepto del aporte a la mitigación del aumento de la temperatura media del planeta, sino a la posición de la economía argentina en los mercados internacionales. No se trata solo de un esfuerzo a nivel sociedad para reducir emisiones, sino de poner a disposición las facilidades y herramientas que las empresas de Argentina necesitan para acceder a mercados que ya están poniendo barreras anti filtración de emisiones de origen.

Existen muchos casos en el país de empresas multinacionales o nacionales con alto nivel de exportación, que tienen exigencias de sus casas matrices o sus mercados destino en cuanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que no son capaces de cumplir porque el mercado no tiene capacidad de brindar esas soluciones, ya sea por el bajo volumen requerido o por impedimento de alguna legislación, y esto podría representar un riesgo para la economía local, porque si no logran adaptarse, de a poco perderán competitividad a nivel internacional. Un claro ejemplo de ello son las demandas de energía renovable por parte de empresas que, por cuestiones particulares como sus escalas, no pueden participar del Mercado eléctrico Mayorista (MEM) para comprar energía renovable en un Mercado a Término de Energías Renovables (MATER), y por una cuestión física no pueden realizar generación distribuida renovable.

Entonces, establecer como razonable un escenario de conversión de 90.000 vehículos a GNC por año que es lo que ya el mercado mismo viene realizando, pero sin que esto implique aumentar el porcentaje del parque de vehículos a GNC, entendiendo que con esta medida se reducen naturalmente

las emisiones al menos a la mitad, parece ser al menos una cuestión a revisar, en un contexto donde se propone avanzar sobre movilidad eléctrica sin definir cuestiones fundamentales como la generación y la infraestructura necesaria para que ello suceda. Sobre todo, en un país donde se cuenta con recursos naturales como el gas de Vaca Muerta o los agrocombustibles de la región centro para resolver las emisiones en el transporte de otro modo.

MOVILIDAD ELÉCTRICA, CONSUMO DE ENERGÍA Y ABASTECIMIENTO

Para ahondar en el análisis, se ponen a consideración algunos cálculos y estimaciones para evaluar la factibilidad real del desarrollo de la movilidad particular mediante vehículos eléctricos en Argentina, en el marco de la transición y transformación energética.

Un auto eléctrico consume aproximadamente, 15 kWh de energía por cada 100 kilómetros (Baruj y Dulcich, 2021). Asumiendo que en promedio cada vehículo recorre 15.000 km al año, requeriría unos 2.250 kWh/año. Es decir que un parque automotor como el argentino (unos 13.139.143 automóviles) demandaría aproximadamente unos 30 TWh/año.

Esto equivale, según el informe Anual de CAMMESA (2023), a más del 21,7% de toda la energía eléctrica demandada por año en Argentina, o el equivalente a casi duplicar el consumo eléctrico para toda la industria.

Para que esta opción sea sostenible como parte de una rigurosa estrategia de transición energética, esa energía debería ser generada a partir de fuentes renovables o de bajas emisiones de GEI. Es decir que equivaldría a la energía que suministrarían dos centrales hidroeléctricas como Yacyreta o cuatro complejos nucleares como el actual (Atucha I, Atucha II y Embalse), multiplicar por 4,5 la cantidad de aerogeneradores instalados, o por 30 los parques solares construidos hasta el momento a partir del programa Renovar.

Resultan objetivos muy difíciles de lograr en el corto y mediano plazo, a la luz del tiempo que lleva en Argentina desarrollar este tipo de infraestructuras. Para graficar temporalmente esta escalada de generación de energía, a partir de la experiencia Argentina, solo en lo que se refiere a la construcción de este tipo de obras, se puede mencionar que las 2 centrales hidroeléctricas, Néstor Kirchner, y Capernic (1.310 MW de potencia total) llevan 10 años de ejecución con un bajo nivel de avance. Otro ejemplo puede ser Atucha II, la piedra fundamental de esta central se colocó en 1982 y comenzó a entregar energía a la red en 2014, 32 años después.

Por otro lado, ese 21,7% de energía adicional requeriría una importante inversión en las redes eléctricas de transporte, transformación y distribución, además del tiempo de ejecución, ya que las mismas se encuentran en límites físicos de transporte de energía.

Con la matriz eléctrica actual, cada vehículo eléctrico que se incorpora al sistema de transporte consume energía eléctrica generada en un 67% con combustibles fósiles que a su vez, tienen una eficiencia de conversión en nuestras centrales térmicas del 37%, en síntesis, de manera indirecta seguirá consumiendo combustibles fósiles de manera muy ineficiente.

En términos prácticos un vehículo que se reconvierte a GNC pasa de emitir 20 kg a 10 kg de CO_2 cada 100 km sin demandar grandes cambios al sistema. Cambiar un vehículo naftero a eléctrico con nuestra matriz actual pasará de emitir 20 kg a 7,5 kg de CO_2 cada 100 km, sin contabilizar los pasivos ambientales de los potenciales residuos en la extracción de minerales y el de fin de vida útil de las baterías, además del peso económico y emisiones que implicará los cambios en la infraestructura eléctrica que demandaría.

Comparándose con otro vector como pueden ser los agrocombustibles, se halla que las emisiones en un vehículo funcionando con bioetanol, analizando todo el ciclo de producción y consumo, es aún menor que el de un vehículo eléctrico con la matriz energética actual. El vector energético de los agrocombustibles para su desarrollo implica infraestructura productiva, inversión privada en una

cadena productiva con un efecto multiplicador en la economía debido al agregado de valor en cada una de las regiones, generación de nuevos emprendimientos en torno a la producción y consecuentemente a la mayor cantidad de puestos de trabajo asociados. Claro que también trae aparejado una compleja red de impactos socioambientales y de concentración de poder para un sector. Además abastecer al 100% la flota de vehículos requeriría aumentar 2,44 veces la superficie de cultivo de soja (Iermanó y Sarandón, 2009; Bertinat et al., 2020).

Para ejemplificar estos datos, se pone a consideración un escenario intermedio en base a la información actual. Suponiendo que no se avanza con una visión de electromovilidad total, pero se asume una migración de vehículos particulares a eléctricos del 50% del parque actual hacia 2035, y simplificando más aún el análisis, con un crecimiento del parque en promedio de un 1,5% anual con base 2022, se obtiene al año 2035 15.945.039 vehículos particulares circulando, con un total de 7.972.519 eléctricos con un recorrido promedio de 15.000 km anuales. Para que sea realmente sostenible, esto implicaría incorporar en la matriz de generación eléctrica nacional unos 17.938 GWh de energía renovable, solo para alimentar este parque de movilidad, además de la energía necesaria para el crecimiento de la demanda natural del resto de las actividades económicas. Esto implica, sosteniendo una proporción renovable similar al actual, incorporar: 3.071 MW eólicos, 1.008 MW de energía solar fotovoltaica, 486 MW de mini hidro, 68 MW de Biomasa y 65 MW de generación a partir de Biogás. A costos actuales de tecnología esto se traduce en una inversión de 6.436 millones de USD.

Además, se deben contemplar los costos del transporte necesarios para incorporar esta potencia en las redes. Tomando un escenario muy optimista, donde cada vehículo solo necesite un cargador lento de 7 kW y que exista la capacidad de gestionar la red de manera inteligente para permitir solo una simultaneidad de carga del 30% de ellos, se requeriría incorporar al sistema 16,74 GW extras de potencia a lo necesario para el crecimiento de la demanda. Para estimar los costos de esto último, se toman los datos del Plan Nacional de Expansión del Transporte Eléctrico presentado por el poder ejecutivo en Diciembre de 2022 (Subsecretaría de energía eléctrica, 2022), que en resumen plantea la expansión del sistema para la incorporación y repotenciación de líneas y sistemas de transformación con objeto de aumentar en 10.000 MW la capacidad de abastecimiento con la incorporación de 10.600 MW de generación. Para ello, se plantea una inversión de 9.900 millones de USD, que no serían suficientes, porque solo para la simultaneidad planteada, es necesario un 67,4% más de potencia para sostener la incorporación de los cargadores de vehículos eléctricos.

Por lo tanto, si se hace un análisis lineal, sin considerar que la circulación de vehículos se encuentra concentrada en un 80% entre Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Mendoza, con la complejidad de redes que eso implica, se requeriría al menos 16.572,6 millones de USD en redes de transmisión. En el ámbito de la distribución eléctrica, serían necesarios 2.546 millones de dólares. Resumidamente, solamente en infraestructura de generación, transporte y distribución, Argentina necesitaría inversiones por 25.284 millones de USD para soportar la mudanza del 50% de vehículos particulares a movilidad eléctrica.

Por otro lado, se debe considerar el costo de inversión que significa para los usuarios impulsar esta migración. El vehículo eléctrico de referencia tomado es el Nissan Leaf, cuyo costo sugerido es de USD 75.641 contra USD 31.544 de la versión de Nissan Versa más completa de la misma marca. Existe una diferencia de USD 44.097 entre la versión de combustión interna y la eléctrica de un vehículo similar de la misma marca. Esto representa una suma de 356.347 millones de USD que deberá asumir el mercado para realizar dicho cambio. En total entre infraestructura y recambio tecnológico, 381.631 millones de USD le costaría a la Argentina mudar el 50% de sus vehículos particulares hacia movilidad eléctrica.

Son ineludible las preguntas: ¿Argentina está en condiciones para afrontar esa migración en los próximos 10 o 15 años? ¿Es la mejor estrategia para la reducción de emisiones de ese sector?

CONSIDERACIONES FINALES

La búsqueda de soluciones territoriales con recursos locales debe ser tenida en cuenta en la estrategia de la transición de la movilidad. El GNC y los agrocombustibles (sin expandir las actuales fronteras de cultivo y deforestación y con una migración hacia la producción y consumo agroecológica) pueden representar una oportunidad para la reducción de emisiones hacia una transición ecosocial. Esto no significa que no deba planificarse la movilidad eléctrica, porque sin dudas, en términos de eficiencia primaria y a largo plazo, con una matriz eléctrica renovable será por ahora, la más eficiente, pero no es posible pensar en este escenario en los tiempos que los compromisos y el mercado exigen. Además, para una transición ecosocial es necesario pensar en otros modos de diseño de movilidad de personas y mercancías de forma urgente.

El escenario de movilidad eléctrica que se plantea en este análisis de manera hipotética y simplificada evitaría emitir a la atmósfera 20,32 millones de toneladas de CO_{2eq}, suponiendo que la mudanza se produce solo sobre el parque naftero, con un factor de emisión de 2,38 kg CO_2/litro de nafta y una eficiencia de 14 km/litro, desplazando un consumo de 8.541 millones de litros de nafta.

Es totalmente posible lograr resultados equivalentes sin necesidad de inversiones en recambio tecnológico de motorización, infraestructura de carga y esto se puede lograr promoviendo combustibles bajos en emisiones como el GNC, el biodiésel y el bioetanol.

Existen experiencias técnicas de éxito en Argentina y en países limítrofes en incorporación de mayores cortes de estos combustibles, generando valor agregado local a la economía bio productiva, promoviendo una nueva industria.

Si del total de vehículos circulantes, se lograra migrar el 50% a GNC, se partiría de un escenario de reducción de 10,16 millones de toneladas $CO_{2eq.}$ Y si además del 50% restante se desplaza de esa matriz un 20% de naftas con bioetanol y un 20% de gasoil con biodiesel, se reducirían 4,06 millones de toneladas CO_{2eq} correspondientes a naftas y 4,45 millones de toneladas CO_{2eq} correspondientes al diésel. En total 18,67 millones de toneladas CO_{2eq} evitadas, respecto del escenario establecido inicialmente con electromovilidad.

Este último escenario, no solo aprovecha infraestructura existente, sino que, potencia recursos naturales en donde Argentina tiene mucho potencial, como es el gas de Vaca Muerta y también el agregado de valor a cadenas productivas como la del maíz, caña de azúcar y soja, que actualmente solo procesan entre el 10% y el 15% de la producción siendo uno de los principales productores mundiales en estos cultivos, con el restante 85% que tienen como principal destino la exportación sin agregado de valor.

Lo anterior demuestra que se necesita comenzar a diseñar estrategias nacionales sólidas a largo plazo, ambiciosas pero realizables, adaptadas a la realidad local, y pensando en soluciones territoriales donde se maximice la eficiencia de los recursos, donde se descentralice la producción y las decisiones, se generen puestos de empleo de arraigo, se reduzcan las emisiones con la celeridad que se necesita, y fundamentalmente se promueva la inteligencia colectiva para pensar en soluciones locales.

También, en el marco de una transición energética justa y popular (Bertinat y Chemes, 2022) es necesario repensar las lógicas de producción y consumo. No solamente hay que pensar en reemplazar fuentes, sino en disminuir el consumo de energía en la medida que sea posible y con justicia socioambiental. En este sentido, disminuir el uso energético en el transporte requiere redimensionarlo totalmente y asociarlo a un nuevo modelo productivo. Entre las tareas urgentes, aparecen cambios hacia sistemas más eficientes de transporte de carga y de personas, como el ferrocarril o las barcazas, frente al transporte de carga por camiones o, en el caso del transporte de personas, priorizar el transporte colectivo por encima del individual y el rediseño de los grandes centros urbanos para priorizar el movimiento de personas en bicicleta.

En segundo lugar, es necesario cuestionar la necesidad de transportar cosas, en muchos casos, mercancías. La circulación de bienes se asocia a lógicas mercantiles que garantizan el sostenimiento de sistemas concentrados y centralizados de producción, distribución y consumo. En consecuencia, desarticular las cadenas largas en kilómetros de producción y remplazarlas por producción local, en pequeña escala y descentralizada, es un paso indispensable. La Figura 5 muestra la circulación de una pera, siendo producida en Argentina, empacada en Tailandia y consumida en Estados Unidos.



Figura 5: Peras producidas en Argentina, empacadas en Tailandia, consumidas en EEUU. Fuente: (Birmingham food council, 2022)

Asimismo, se requerirán inversiones diferentes en infraestructura y achicar determinados sectores industriales, sobre todo los asociados a los vehículos de combustión interna y los automóviles particulares. Esto se debe hacer sin detrimento de las condiciones de vida de las y los trabajadores de esos sectores, garantizando alternativas concretas de trabajo y capacitación, desde la base del respeto de sus derechos.

Pensar que ese número de vehículos se pueda reemplazar con vehículos eléctricos es un espejismo que intenta mantener las mismas estructuras de producción y consumo, pero que es imposible de construir sin incrementar la extracción y explotación de recursos y territorios. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) arroja cifras considerables de extracción de minerales para lograr emisiones cero a 2050. En este sentido plantea que es necesario multiplicar 42 veces la extracción de litio, por 25 el grafito, por 21 el cobalto, por 19 el níquel y por 7 las tierras raras (IEA, 2021, p. 11). Ello implica más minería en sectores con alto estrés hídrico donde se encuentran asentadas comunidades originarias.

Finalmente, en la Figura 6 se observa una infografía que resume parte de los resultados obtenidos a partir del análisis cuantitativo.

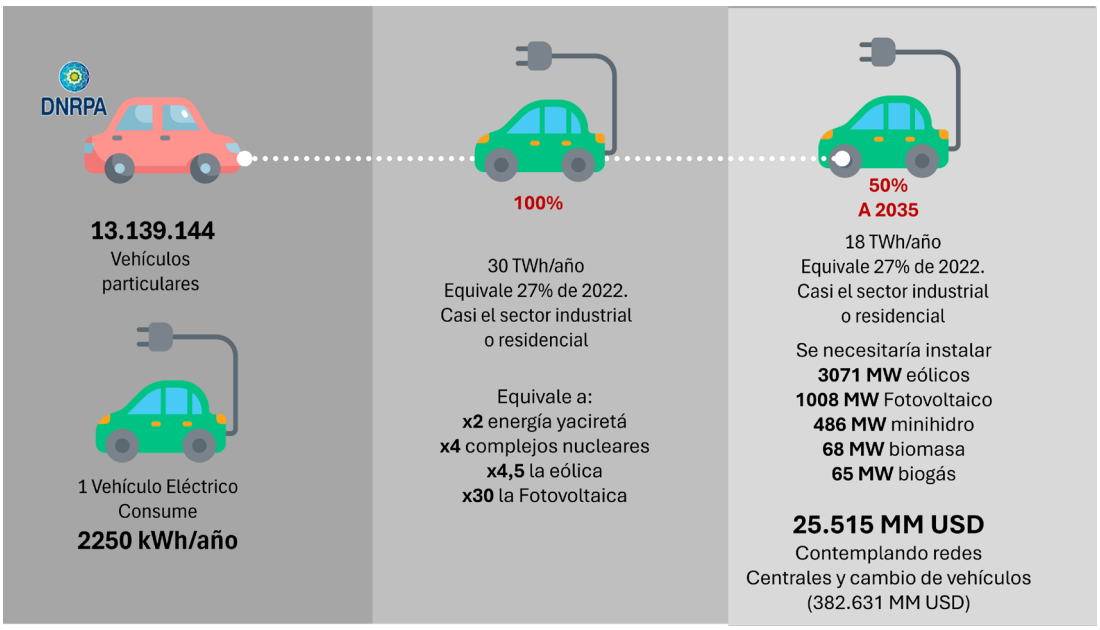


Figura 6: Infografía de resumen de algunos resultados obtenidos

REFERENCIAS

Acosta, A. (2018). *Antropoceno, capitaloceno, faloceno y más – Rebelion*. https://rebelion.org/antropoceno-capitaloceno-faloceno-y-mas/

Aráoz, M., y César, H. A. (2016). *Sobre la Naturaleza realmente existente: La entidad «América» y los orígenes del Capitaloceno. Dilemas y desafíos de especie*. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/92283

Baruj, G., y Dulcich, F. (2021). *La transición hacia la electromovilidad*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Bertinat, P., y Chemes, J. (2022). Transición energética y disputa de sentidos. En *Informe Ambiental 2022. Abordar una transición socioecológica integral: El desafío de nuestro tiempo.* (p. 10). FARN.

Bertinat, P., Chemes, J., y Forero, L. (2020). *Transición Energética. Aportes para la reflexión colectiva.* https://transicion-energetica-popular.com/wp-content/uploads/2020/10/TransicionEnergetica-Reporte.pdf

Birmingham food council. (2022). *Part I: Pears grown in Argentina, packed in Thailand – Birmingham Food Council*. https://www.birminghamfoodcouncil.org/2022/01/16/part-i-pears-grown-in-argentina-packed-in-thailand/

CAMMESA. (2023). *Mercado eléctrico mayorista. Informe Anual 2022*.

IEA. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (p. 287).

Iermanó, J. M., y Sarandón, J. (2009). *¿Es sustentable la producción de agrocombustibles a gran escala? El caso del biodiesel en Argentina*.

IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050*. International Renewable Energy Agency.

IRENA. (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway*. 352.

Kulfas, D. M. (2021). *Proyecto de Ley de Promoción de la*.

Lander, E. (2011). LOS LíMITES DEL PLANETA Y LA CRISIS CIVILIZATORIA. *Revista Venezolana de Economía y Ciencias Sociales*, *17*, 141-166.

Leff, E. (2021). El Manifiesto por la Vida ante la Crisis Civilizatoria y la transición hacia un mundo sustentable. En *Senti-pensarnos Tierra: Crisis civilizatoria-pactos y/o transiciones desde el ecologismo popular,* (pp. 28-47).

MAyDS. (2021). *Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de transporte. (2022, septiembre 26). *Resolución 635/2022. Plan nacional de transporte sostenible*. https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/272624

Moore, J. (2016). *Anthropocene or Capitalocene? Nature, History, and the Crisis of Capitalism*.

Ritchie, H. (2020). Sector by sector: Where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector

Secretaría de Energía de la Nación, D. M. C. (2023). *Balance Energético Nacional. Serie histórica – Indicadores Actualizado al año 2021*.

Subsecretaría de energía eléctrica. (2022). *Plan Nacional de Expansión del Transporte Eléctrico 2035*. Ministerio de Economía.

Svampa, M. (2019). Antropoceno. Lecturas globales desde el Sur. *Colección Costureras de La Sofía cartonera*. http://maristellasvampa.net/wp-content/uploads/2019/12/Antropoceno.pdf

ANALYSIS OF ELECTRIC MOBILITY IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE TRANSPORT IN ARGENTINA

ABSTRACT: Energy transition in Latin America is being discussed in several sectors. Addressing mobility is critical, being the largest energy consumer in the region. This paper examines the trajectory of energy transition planning in Argentina`s transportation sector, taking into account the National Plan for Sustainable Transportation, market data, and strategic guidelines that Will shape the future of passenger transportation in the country. This analysis considers the urgency of reducing emissions to meet established targets and to equip Argentina`s economic actors with the tools to access international markets that require emissions reductions. The findings suggest that over the next 10 to 15 years, Argentina may face challenges aligning its electric mobility and decarbonization efforts with local development due to insufficient technical and economic conditions.

Keywords: Energy transition, mobility, electric mobility, descarbonisation.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 416-425, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ENERGÍAS RENOVABLES Y COMUNICACIÓN: DIAGNÓSTICO DEL PORTAL OFICIAL DEL ESTADO ARGENTINO (2024)

Pablo A. Duran[1,2], Facundo D.F. González[1,2], Carlos A. Cadena[1,2]
[1]Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) – Universidad Nacional de Salta (UNSa) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Avenida Bolivia N° 5150. C.P. 4400 (Salta-Argentina).
http://inenco.unsa.edu.ar - /Tel: +54-387-5316591 E-mail: duranpabloagustin@gmail.com
[2]Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia N° 5150. C.P. 4400 (Salta - Argentina).

RESUMEN: En el desarrollo del texto se analiza la información del portal oficial del Estado argentino vinculado a las "Energías Renovables". Se presenta la postura epistemológica acerca de la problemática actual vinculada a la distribución de la energía, el acceso a la misma y el uso de fuentes renovables ante la problemática ambiental asociada al fenómeno del cambio climático. El recurso metodológico empleado se apoya en un "Diagnóstico Situacional Rápido", que permite realizar un repaso sobre los tipos de comunicación adoptados para la divulgación de sus actividades. Se sintetiza el tipo de información disponible en la página consultada y cuáles son sus características. Por último, las conclusiones advierten que, para lograr una transición energética democrática, en parte, se deben formular nuevas políticas públicas atendiendo la urgencia ambiental, con una orientación integral sobre de las energías renovables, lo que podría generar mayor participación social por fuera de los grupos que militan la ecología o el ambientalismo desde el interés particular, sino más bien promoviendo una acción conjunta entre actores con intereses diversos.

Palabras clave: Energías Renovables, Transición Energética, Comunicación, Política Pública; Conocimiento Científico.

INTRODUCCIÓN

Es innegable que los problemas ambientales son uno de los temas con mayor repercusión tanto en el ámbito académico como en el debate público y mediático en general. A priori, pareciera ser que la instalación de esta problemática ha sobrepasado los discursos de militancia ecológica o proteccionistas ambientales para ser llevado a campos de discusión científica, económica, política, social, etc. Los hechos naturales que acontecen en la actualidad alertan sobre lo que ocurre hoy por hoy en nuestro planeta. Si bien a lo largo de la historia en lo que refiere a la temperatura global se registran variaciones, es ineludible asociar que las subas y bajas de temperaturas, a día de hoy, mínimamente demandan el uso constante y periódico de diversas fuentes de energía para la generación de electricidad, calor o transporte, basados fundamentalmente en combustibles fósiles son los mayores emisores de gases de efecto invernadero (GEI). Según Mendes (2016) el efecto invernadero se plantea como un fenómeno que se da por la consecuente acumulación de gases en la atmósfera, la cual impide una adecuada disipación del calor que aumenta la temperatura en el planeta.

Considerando al cambio climático cómo un fenómeno que da cuenta de varios estadios en donde el planeta osciló su variabilidad climática a lo largo de su historia, el documento recupera la investigación de Martín-Chivilet en su libro "*Memorias de un clima cambiante*" (2020) quien realiza una revisión histórica de los cambios climáticos que han transcurrido en el globo terráqueo, desde los hipertermales, pasando por la era glacial, hasta llegar a la época actual marcada por la intervención del hombre en la naturaleza desde el periodo conocido como el "antropoceno", donde se adjudica responsabilidad a la

participación del humano a partir de la segunda revolución industrial al generar mayor contaminación ambiental a partir del uso de maquinarias y el incremento sostenido de producción a niveles globales, lo que generó una mayor emisión de GEI y aceleró los procesos de calentamiento que en milenios anteriores poseían cierta regularidad en el tiempo.

Ahora bien, en la era contemporánea, los programas políticos y académicos realizan esfuerzos para alcanzar la mitigación de gases de efecto invernadero y lograr la capacidad adaptativa de las comunidades juegan un papel fundamental para realizar un proceso de viraje de sistemas de producción energética basadas en combustibles fósiles hacía sistemas apoyados en fuentes renovables (Adger et al., 2013). Por tal motivo, la propuesta de la transición energética no solamente tiene en cuenta una estrategia proyectada en la 'descarbonización' sino que, además, señala la necesidad de modificar paralelamente la distribución de la energía, su respectivo consumo de forma eficiente y responsable, garantizando así un acceso seguro y asequible (Svampa y Bertinat, 2022; Boyer, 2019).

Bajo esta consideración, Eduardo Gudynas (2009), biólogo e investigador uruguayo, afirma que actualmente nos encontramos bajo un modelo de 'desarrollo insustentable' debido a que gran parte de los recursos naturales son explotados, en sintonía con la disipación de distintos espacios naturales y las consecuencias ligadas al cambio climático resultado de los altos niveles de contaminación en el ambiente. Tensa directamente al modo de producción voraz del capitalismo, que una vez más es centro de crítica bajo la oleada de esta nueva perspectiva. Aunque, de forma inmediata, logra atirantar cuál es el tipo de política que podría establecerse mediante un criterio dicotómico *'¿Desarrollo o Clima?'* (Delina y Socavool, 2018).

Por otro lado, desde el fenómeno de la globalización algunas décadas atrás, la información se ha presentado como un bien valioso de rápida transmisión permitiendo la acción de interrelacionar experiencias con valores más o menos compartidos entre diversos actores (Rizo García, 2009), comprendiendo a este proceso como la 'comunicación'. Retomando el concepto anteriormente mencionado, la interdisciplinariedad entre el campo social –de la comunicación, en este caso- y el de las energías aún tiene mucho que dar y dicho proceso es crucial para su realización, en pos de informar y de articular conocimientos. Por su parte, los medios de comunicación, con la importancia que poseen, son fundamentales para influenciar el comportamiento de las sociedades (Duran *et al,* 2024). Al respecto, las ciencias sociales emergen en este último tiempo como un enfoque necesario para el análisis y la problematización en torno a los eventos relacionados al ambiente y la producción energética vinculados a la participación (o no) de diversos actores de la sociedad en general.

Actualmente, la problematización en la producción del conocimiento científico desde las ciencias sociales en temáticas vinculadas a la energía se posiciona como un enfoque alternativo en trabajos relacionados a la energía y sus diversas fuentes. Estas actividades se posicionan desde una perspectiva que pone énfasis en cuestiones referidas a la dinámica sociotécnica y el hábitat de los actores involucrados en trabajos de investigación vinculados al consumo, distribución, derecho, políticas públicas, programas de fomento renovable, producción científica, entre otras aristas (Hessling Herrera *et al* 2024; Duran, 2023; Gonza *et al,* 2022; González¸ 2020).

Es por este motivo que el presente trabajo analiza el estado actual en el portal de información pública nacional vinculado a las energías renovables del Estado de la Nación Argentina. Los autores observan algunas características en la información disponible y en los modos de efectuar la comunicación institucional adoptadas en la plataforma digital que, a priori, posee contenidos específicos relacionados con la temática energética. Estos poseen un lenguaje con características técnicas que dificultan la comunicación directa y aprehensible por parte de la comunidad en general, motivo que complejizará el involucramiento y la comprensión del tipo de información, datos y documentos compartidos por página institucional.

Problematización comunicación - energías renovables

Desde el posicionamiento epistemológico de los autores, resulta necesario recuperar la propuesta de Sábato y Botana (1970) sobre la triangulación entre el Estado, el sector productivo y el sistema

científico-tecnológico, el provecho de dicha articulación entre los sectores incrementa la posibilidad de mejoras hacia la sociedad. Incorporando esta perspectiva, se puede enmarcar al portal oficial del Estado como actor representativo encargado del desarrollo e implementación de políticas públicas. Mientras, que el sector productivo se afianza en el financiamiento y la elaboración de maquinarias para la creación de artefactos e instrumentos que se insertan dentro de las tecnologías a utilizar. Por su parte el sector científico realiza esfuerzos en pesquisar los resultados obtenidos en la ejecución de estas actividades, la elaboración de documentos académicos e informes para consultorías en forma de documentos con diversos soportes (textuales, audiovisuales y/o digitales) y que pueden ser concebidos como comunicación de la ciencia.

La importancia de la comunicación es su capacidad de producir sentidos de segundo orden, según Fuentes Navarro (2009), yace en la apropiación de conceptos y de una comunicación basada en la producción intersubjetiva. De esta manera, la comunicación resulta una herramienta fundamental para la adecuación de contenidos técnicos de diversas índoles, lo cual permite la articulación de fuentes informativas, datos específicos y contenidos en conjunto con la comunidad. Por otro lado, estudios vinculados a la comunicación y la ciencia también han tenido su bagaje histórico para su conexión. Desde el siglo anterior se han realizado múltiples investigaciones relacionadas a la "divulgación científica", en donde Roqueplo (1983) afirma que la tarea del divulgador es oficio como cualquier otro, sin embargo, se consulta hacia dónde va dirigida su actividad divulgada. El autor define a la misma como una mercancía en un mercado que posee bienes simbólicos. En palabras textuales del autor: "*Los divulgadores conocen muy mal a los públicos a los que se supone que se dirigen"* (Roqueplo, 1983, pp.30).

Una propuesta superadora denominada "comunicación pública de la ciencia" y abordada por Pierre Fayard (2005) sostiene que la aceleración en los descubrimientos y en las nuevas tecnologías requiere de una adecuación para ser compartida con la sociedad. Dentro de su enunciado, el autor afirma que actualmente no es suficiente con que la institución exista, es necesario repercutir y recurrir a la relación pública. Al mismo tiempo, expone que los investigadores direccionan sus informes de forma indirecta a medios de comunicación, mientras que, de un modo directo y principal, también son dirigidas hacia el Estado. Por último, cabe destacar que estos tres sectores que se interrelacionan en un objetivo común, principalmente en la ejecución de la política pública que es caracterizada como el conjunto de acciones intencionales y causales, orientadas a la realización de un objetivo de interés/beneficio público en correspondencia con el cumplimiento de funciones públicas cuya solución implica una acción sostenida (Astorga y Facio, 2009).

METODOLOGÍA

Uno de los antecedentes que se ha considerado para la elaboración del trabajo es la investigación realizada por Delfino Souto y Souza Pessoa (2022) donde los autores realizan un diagnóstico vinculado al incentivo de políticas públicas a las energías renovables en el Norte Grande de Brasil. El capítulo retomado, incluido en su libro '*Energía Eólica. Perspectivas e Desafios no Rio Grande do Norte',* busca responder diversas preguntas que emergen desde un relevamiento detallado acerca de las políticas públicas que se realizó el estado de Río Norte para el desarrollo de su producción energética en comparación con el resto de estados en la región. El documento posee un recorte temporal de tal registro realizado desde fines de los años 70' cuando se alertó por una "crisis del petróleo" por cuarenta años posteriores.

Por otro lado, una de las herramientas que colaboran a la identificación del estado actual sobre el tratamiento que posee la transición energética en el país es la realización de un 'Diagnóstico Situacional Rápido'. Este concepto, que es aplicado al análisis de las políticas públicas, debe tener en cuenta la recopilación de información sobre las características de la audiencia a servir; considerando sus propias fortalezas y debilidades, las capacidades y las experiencias en diversos ámbitos, junto con el nivel de participación social. En este caso, el propósito del trabajo es comprender en qué medida y de qué manera se informa, a nivel nacional, la información acerca de las políticas públicas que se proyectan en esta alternativa de energías renovables y transición energética.

Asimismo, el objetivo del trabajo consiste en analizar la información disponible en la página oficial por parte del canal oficial de 'Energías Renovables' en Argentina durante el año 2024. De esta forma, el artículo realiza un mapeo de la información disponible, para un análisis y comprender cuál es la situación actual de los datos en esta perspectiva. Este tipo de análisis cualitativo posee el afán de realizar un aporte interpretativo que pueda ser útil o de uso convencional para trabajos, investigaciones o proyectos que se enmarquen en alguno de los campos que actualmente se vinculan a las ciencias sociales, exactas, biológicas, naturales, etc.

Retomando la hipótesis planteada por Overpeck y Conde (2019) se contempla que un enfoque histórico emerge como una metodología óptima para el desarrollo de trabajos sustentables focalizando en aspectos locales que permita reconstruir su recorrido, desarrollo, aciertos y errores a lo largo de los años. Como elemento de estudio, observar dichas políticas -en este caso, políticas vinculadas a las energías renovables- marcan un punto de partida para comprender la forma en la que los proyectos, los decisores de políticas y la sociedad se relacionan y con qué nivel de profundidad.

Bajo esta perspectiva, se realiza el siguiente abordaje histórico acerca de las políticas energéticas a nivel nacional en un recorte que parte, aproximadamente, desde 1992 al año 2017. El marco temporal mencionado se basa en los años de publicación de las leyes que aparecen dentro de la página referida, haciendo un llamado de atención a la ausencia de publicación de leyes vinculadas a las energías renovables –por lo menos, dentro de la página oficial del Estado en este apartado específico- desde ese entonces hasta el 2024.

Para contextualizar la situación del portal, existe un hipervínculo que aparece como 'Mapa del Estado', al pie de la página principal y posee un buscador de normativas vigentes a lo largo del país. Esta biblioteca de resoluciones, designaciones, decretos y demás publicaciones son otro elemento valorable que podría asignarse a la interpretación de datos que han sido publicados y definidos dentro de la misma página. Nuevamente, el almacenamiento y la correspondiente elevación de cada uno de los datos que se presentan son un elemento valioso dentro de la democracia actual, aunque sería necesario y oportuno trasladar esta matriz de datos que se encuentran fuera de la direccionalidad principal del punto de enfoque, el cual en este caso es el hipervínculo de 'Energías Renovables'.

Para el trabajo se tomó de referencia, principalmente, la nómina de leyes y programas incorporados en la página oficial del Estado Argentina -www.argentina.gob.ar- (Ver Tabla 1). La información recolectada se encuentra en el apartado de 'Ministerio de Economía', en la sección 'Energía', 'Energía Eléctrica' y 'Energías Renovables' En este recorrido, el apartado 'Legislación' constituye la fuente principal de datos para el mapeo de estas políticas:

Tabla 1: Cuadro de leyes vinculadas a la energía/ambiente. Elaboración propia.

Ley N°	**Año**	**Título de la Ley / Organismo**	**Objeto de la Política**
24.051	1992	Normas para la regulación, manipulación, transporte y tratamiento de residuos peligrosos.	Establecer las disposiciones fundamentales para el manejo de residuos peligrosos. Según esta norma, se denomina peligroso a todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general.
26.639	2010	Régimen de presupuestos mínimos para la preservación de los glaciares y del ambiente glaciar.	Establecer criterios para la protección de los glaciares y el ambiente periglacial con el objeto de preservarlas como reservas estratégicas de recursos hídricos.

26.331	2007	Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos.	Establecer presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejos sostenibles de los bosques nativos, y de los servicios ambientales que estos brindan a la sociedad.
25.675	2002	Ley general del ambiente.	Establecer los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y la protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable.
26.093	2006	Régimen de regulación y promoción para la producción y usos sustentables de biocombustibles.	Promover y controlar la producción y uso sustentable de los biocombustibles.
25.019*	1998	Régimen nacional de energía eólica y solar.	Declarar de interés nacional la producción de energía eólica y solar en todo el territorio.
26.190*	2006	Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables en energía destinada a la producción de energía eléctrica.	Declarar de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables con destino a la prestación de servicios, como así también a investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad.
27.191	2015	Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación.	Establecer como meta prioritaria el alcance de un 20% respecto a la matriz energética de Argentina y que esta se encuentre basada en energías renovables.
27.424*	2017	Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública.	Fijar las políticas y establecer las condiciones jurídicas y contractuales para la generación de energía eléctrica de origen renovable por parte de usuarios de la red de distribución, para su autoconsumo, con eventual inyección de excedentes a la red, y establecer la obligación de los prestadores del servicio público de distribución de facilitar dicha inyección, asegurando el libre acceso a la red de distribución, sin perjuicio de las facultades propias de las provincias.

Resulta importante mencionar que, bajo la misma base de datos, el "Buscador de leyes ambientales", dentro de todas las categorías posibles arroja un total de diez (10) leyes al momento de realizar la búsqueda de la palabra clave 'Energía', de las cuales solamente tres (3) se encuentran en el listado presentado previamente. Estas son las leyes **N°25.019; N°26.190 y N°27424.** La página de "Legislación", posee otros hipervínculos que redirigen al usuario hacia tres diferentes decretos (986/2018; 531/2016; 562/2009); dos resoluciones adicionales (108/2011; 280/2008), un apartado informacional sobre los procedimientos de CAMMESA - siglas que significan la Compañía

Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima- y un formulario de beneficios fiscales (Anexo 4 –V3).

La reglamentación legislativa que se encuentra disponible en el sitio oficial, también incorpora información de cuatro programas de energías renovables -ver Tabla 2- de índole nacional:

Tabla 2: Cuadro de programas renovables. Elaboración propia

PROGRAMA DE ENERGÍAS RENOVABLES	**IMPLEMENTACIÓN / OBJETIVOS**
RENOVAR	'Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables'. Vinculada con la implementación de la Ley 27.191, el programa se lanzó para coincidir con el objetivo de la ley que es el de alcanzar un uso del 8% de energías renovables hasta fines de 2017, y aportar un 20% a fines de 2025. Mientras que, por otro lado, el objetivo del programa está proyectado a los 10.000 MW para 2025.
MATER (Mercado a Término de Energía Eléctrica de Fuente Renovable)	Se presenta como un mercado específico, con ciertas particularidades, para la compra y venta de energía renovable entre privados. El objetivo yace en reglamentar las acciones de compra-venta de energía eléctrica desde un libre acuerdo entre las partes. Buscando una alternativa de adecuación a la ley 27.191.
PERMER	El Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales tiene el objetivo principal de garantizar el acceso a la energía para la población que no pueda acceder por medio de la red eléctrica por medio de energía limpia y segura. Este programa posee hasta el momento dos etapas: Permer I, realizada desde el año 1999 hasta el 2012. Mientras que Permer II se efectuó desde el año 2015 hasta el año 2020.
Generación Distribuida	Este programa, asociado principalmente con la Ley N° 27.424, se presenta como una iniciativa nacional del Estado con la intención de generar energía a través de recursos naturales para el autoconsumo, y a su vez, que el excedente sea inyectado mediante inversores como equipos de acople a la red eléctrica. Se busca que, dentro de este marco de fomento a la utilización de las energías renovables, además de reducir con el consumo eléctrico de la red, se beneficie al usuario mediante una compensación económica. Este monto siempre será menor al que adquiere el distribuidor en el mercado mayorista. También se menciona que la instalación de los equipos estará a cargo del usuario interesado.

Posterior a ello emergen cinco ítems destacados que contienen información adicional y noticias vinculadas a la energía renovable. Estas son:

- ***Registro de Carga de Vehículos Eléctricos e Híbridos Eléctricos:*** El hipervínculo direcciona al usuario a un sector en donde se informa y se promueve el "Registro de Vehículos Eléctricos" (VHE), informando acerca de la importancia de la movilidad eléctrica, la sostenibilidad, el cambio climático y su vinculación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).
- ***Centrales y Plantas****:* Tal cual describe su título, se presenta como la nómina de centrales y plantas de energías renovables en operación comercial.

- ***Estudios y Publicaciones****:* Apartado con información sintetizada por bloques en donde se presenta un índice que centra información y estudios realizados bajo trabajos de energías renovables, manuales y guías, junto con la descripción e hipervínculos relacionados al 'Marco de Gestión de Riegos Ambientales y Sociales' (MGRAS).
- ***Calculador Solar****:* Redirecciona a una aplicación en línea que permite evaluar el consumo energético de un panel solar mediante estimaciones a través del monto a proyectar, la potencia, cantidad y grados de inclinación de los paneles.

Otro de los datos valiosos que otorga la página oficial del Estado es el hipervínculo al portal de 'CAMMESA'. Los objetivos principales que plantea la compañía son:

- Ejecutar el despacho económico para aportar economía y racionalidad en la administración del recurso energético
- Coordinar la operación centralizada del Sistema Argentino de Interconexión
- Administrar el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), asegurando transparencia en su funcionamiento. En adición, al momento de direccionarse a su web oficial, se observa una portada gráfica con los datos acerca de la generación y consumo energético, constantemente actualizado, dentro del territorio nacional.

CONCLUSIONES PRELIMINARES

¿Qué tipo de dato se pretende compartir? ¿Los datos son de carácter meramente técnico o podría generarse un documento con mayor simplicidad para su comprensión? ¿Cuáles son las estrategias a pensar para alcanzar mayor público? ¿Cuál es el propósito de entregar la información de este modo? ¿Cómo es posible considerar otro tipo de divulgación de la información entre externos a la temática?

Estas preguntas dan pie para avanzar sobre las conclusiones parciales. Su respuesta, no cubiertas en su totalidad, se observan en el trabajo desarrollado. Actualmente, no se encuentra una página explícita y específica acerca de la "transición energética" por parte del Estado. A pesar de su carácter polisémico, es necesario considerar que dicho concepto engloba en sí otras acciones que pueden ser consideradas parte del proceso –eficiencia energética, acceso a la energía, justicia energética, etc.- Por lo que ha sido prudente girar el enfoque de búsqueda, principalmente, hacia las energías renovables. Una propuesta, para lograr una aproximación conceptual con mayor exactitud de qué es lo que podríamos considerar como transición energética en la actualidad, sería la creación de un portal oficial por parte del Estado acerca de lo que podría ser, en qué proyectos, leyes, programas, subsidios o información adicional se enmarca específicamente bajo esa consideración.

En esta articulación, entre energía y sociedad, la primera opera en la sombra de lo social con una 'capacidad para realizar' sin ella ser 'social' (Artizia *et al,* 2017). En conjunto ambos conceptos retoman la postura de Larkin (2013) quien sostiene que la energía sería una infraestructura que es parte de otros mecanismos invisibles detrás de otros tipos de trabajo. De esta manera, es posible contemplar así a la energía como un recurso fundamental para la producción efectiva de la sociedad en la actualidad. Otro de los conceptos directamente vinculados es el de 'Desarrollo Sostenible', el cual es interesante en primera instancia puesto que ha sido un término que ha ido cambiando en su construcción a partir de la evolución en los diversos campos en los que se ha utilizado. En un primer análisis, podría decirse que se enmarca en una postura ambientalista o ecológica relacionada a un cuidado ambiental. Sin embargo, los espacios de arquitectura y urbanismo han utilizado el concepto en criterios de planificación y estructura considerando la temática.

Las discusiones potencialmente planteadas se vinculan a la comunicación del conocimiento sin perder su profundidad. Algunos debates surgen en torno a la forma en cómo se traduce la producción de datos a la interpretación de personas externas al área específica de conocimiento "reduciendo" de alguna manera su complejidad. Por esto mismo, se plantea la necesidad de generar herramientas, insumos o estrategias que faciliten la perspicacia de problemáticas vinculadas al ambiente, la producción energética y la participación social.

Cabe preguntarnos, ¿de qué forma interviene la sociedad? Parece ser una consulta que dependerá particularmente sobre cuál sea el lugar que se interesa en la cuestión. Existen estudios que reflejan la producción auto sustentable basado en fuentes naturales como las de Islas Cook, Niue, Guinea; o casos como los parques eólicos de Gales, a nivel europeo, quienes presentan pequeñas comunidades con su propia producción energética basada en fuentes renovables. En el documento de Delina y Socavool (2018), los autores mencionan cómo existen naciones que realizan su transición en base a recursos específicos, otros con estrategias particulares de negociación política. En el caso de los países nombrado, los investigadores contemplan que han sido casos específicos de objetivos totalmente renovables.

Del caso contrario, también han encontrado caso de poca efectividad al momento de plasmar tecnologías o dispositivos que permitan cambiar el consumo de energía fósil puesto que las prácticas culturales de años son difíciles de erradicar –como los casos en el sur de Chile-, considerando que estas debieran ser realizadas y analizadas en resultados en procesos de varios años, aunque, cuando hablamos de problemáticas ambientales, como población nos encontramos contra el reloj. La investigación de Boso et al. (2017) indaga acerca del caso de las comunidades en Temuco alertados por la contaminación ambiental debido al uso de la leña. El Estado chileno realizó políticas energéticas para estimular el uso de dispositivos a base de parafinas y pellets. El trabajo muestra un análisis del mercado económico que funciona en la zona junto con las prácticas sociales que poseen los habitantes de la región, junto con las múltiples dificultades de adaptación para integrar estos nuevos productos.

La implementación efectiva de políticas públicas, posiblemente, será una puerta que conduzca a un futuro sustentable. De hecho, hace varios años que incrementan estas acciones en pos de preservar el ambiente y buscar nuevas lógicas de producción bajo esta protección. La dificultad se centraría en que, debido a la gran diversidad de problemáticas y escasez de recursos que cada espacio geográfico y comunidad mantienen, resulta necesario pensar en que cada experiencia implica, esencialmente, de una intervención localizada para la validez del proceso como tal. Si bien en términos legislativos se implementan leyes y normas que abarquen a una matriz en aspectos generales, será más que necesario destacar que las particularidades regionales y comunitarias tendrán que ser partícipes directos e insustituibles para la elaboración de trabajos en el lugar.

Una línea emergente del artículo se basa en reflexionar sobre propuestas que podrían incrementar la información disponible, y como resultado de esta, podría acrecentar la problematización en nuevas investigaciones de distintas ciencias, proyectos de investigación en temáticas afines, actividades productivas y estatales. La articulación de estas actividades se centraría en el propósito de lograr una transición energética democrática, y así, formular nuevas políticas públicas atendiendo la urgencia ambiental, con una orientación integral acerca de las energías renovables. Esto podría generar mayor participación social por fuera de los grupos que militan la ecología o el ambientalismo desde el interés particular, sino más bien promoviendo una acción conjunta en colaboración.

Por último, desde una postura prudentemente optimista, aunque crítica al mismo tiempo, consideran que al acoplarse generarían la posibilidad de acelerar los procesos que implican adaptarse a una nueva forma de habitar el mundo. Retomando la consideración de Turiel (2023), es posible el desarrollo sostenible, técnicamente y tecnológicamente existe un horizonte. Sin embargo, con una dificultad aún mayor, el problema señala una desorganización social. En medida en que la sociedad no cambie sus hábitos de producción y consumo, no habrá dispositivo, tecnología o política que sea suficiente, por lo que requiere de una concientización aún mayor para obtener resultados en un contexto que plantea objetivos proyectados hacia años próximos como el 2030 o el 2050, los cuales aparentan ser lejanos, pero están mucho más cerca de lo que parece.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

- Proyecto N.º A2710/0 denominado “Caracterización y Factibilidad de Transiciones Energéticas en el noroeste argentino: Redes Inteligentes para un futuro sustentable”, financiado por UNSa.

- Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica (PICT-2020-SERIEA-01759) “Política Pública y Desarrollo Científico-Tecnológico en Energías Renovables: Estrategias de Transición Sustentable en

la Producción de Hábitat En Salta (2021-2023)" financiado por la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación a través del Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica.

- Proyecto de Investigación N°A2916 "Transición Energética en los Valles Calchaquíes y la Puna Salteña: análisis de políticas públicas de energía solar vinculadas con la producción del hábitat en Salta, Argentina", financiado por UNSa.

BIBLIOGRAFÍA

Adger, W. N., J. Barnett, K. Brown, N. Marshall, and K. O'Brien. 2013. Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation. Nature Climate Change 3:112-117. http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1666

Ariztía, T., A. Boso, y M. Tiron. 2017. "Sociologías de la energía. Hacia una agenda de investigación". Revista Internacional de Sociología 75 (4): e074. doi: http://dx.doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.07.

Astorga, A. y Facio, L. (2009). *¿Qué son y para qué sirven las Políticas Públicas?,* en Contribuciones a las Ciencias Sociales. www.eumed.net/rev/cccss/05/aalf.htm

Boso, À. et al. 2017. Usos, resistencias y aceptación de tecnologías energéticas emergentes en el hogar. El caso de la política de recambio de estufas en Temuco, Chile. *Revista Internacional De Sociología*, *75*(4), e078. https://doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.04

Boyer, D. 2019. Energopolitics. Wind and power in anthropocene. Duke University Press. Durham, London.

Delina, L L and Sovacool, B. K. 2018. Of temporality and plurality: an epistemic and governance agenda for accelerating just transitions for energy access and sustainable development. Current Opinion in Environmental Sustainability, 34: 1-6.

Dimitrov, R S .2016. The Paris Agreement on Climate Change: Behind Closed Doors. Global Environmental Politics 16(3), https://doi.org/10.1162/GLEP_a_00361

Duran, P. A.; Pedraza, M. L.y Picabea, J. F. (2024). Transición energética, extractivismo y cibermedios en Salta. Pluriversos de la Comunicación, 135-149

Duran, P. A. . (2023). Sentidos sobre la Transición Energética en Investigadores del campo del Hábitat y Energía: el caso del INENCO en Salta (2021-2022). *Pluriversos De La Comunicación*, *1*(1), 104–123. Recuperado a partir de https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/pluriversos/article/view/3904

Energia eólica: perspectivas e desafios no Rio Grande do Norte / Zoraide Souza Pessoa, organizadora. – São Paulo: Livraria da Física, 2022.

Fayard, P. (2005). La Comunicación Pública de la Ciencia: hacia la sociedad del conocimiento. México: UNAM.

Folke, C. 2016. Resilience (Republished). Ecology and Society 21(4):44. https://doi.org/10.5751/ES-09088-210444

Fuentes Navarro, R. (2009) "La investigación de la comunicación en América Latina: una internacionalización desintegrada", Oficios Terrestres No. 31 (ISSN 1853 3248), La Plata: Universidad Nacional de La Plata, p.11-22.

Gonza, C. N.; Gonzalez, F. D. y Duran, P. A. (2022). Hábitat, Pobreza Energética y Mujeres Indígenas en el noroeste argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño. Hábitat y Sociedad; Lugar: Sevilla.

González, Facundo. (2020). Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat. Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Hurcuro y el pueblo Wichí de El Cocal (Salta, 2017-2018) [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.]

Gudynas, E. (2009). Vivienda Popular. No 18, pp 12-19. Junio 2009. Facultad de Arquitectura. Montevideo.

Hessling-Herrera, F. D., Gonza, C. N., & Duran, P. A. (2024). (In)seguridad energética, infraestructura y criminalización: entre la autogestión de derechos y el poder punitivo. *URVIO. Revista*

Latinoamericana De Estudios De Seguridad, (40), 63–81. https://doi.org/10.17141/urvio.40.2024.6199
Overpeck, J T and Conde, C. (2019). Editorial. A call to climate action. Science 364 (6443), 807. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aay1525
Martín-Chivelet, J. (2020). Memorias de un clima cambiante. Shackleton Books. Retrieved from https://www.perlego.com/book/1867381/memorias-de-un-clima-cambiante-entender-el-pasado-para-corregir-el-futuro-una-visin-cientfica-sobre-la-emergencia-climtica-pdf (Original work published 2020).
McCollum, D L, Echeverri, L G , Busch, S , Pachauri, S , Parkinson, S , Rogelj, J , Krey, V, Minx, J C , Nilsson, M, Stevance, A-S and Riahi, K (2018) Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages Environ. Res. Lett. 13 (3) https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaafe3
Mendes, J. et al. (2016). Diagnóstico participativo e cartografiSocial aplicados aos estudos de impactos das usinas eólicas no litoral do Ceará: o caso da Praia de Xavier, Camocim. Geosaberes, Fortaleza, v. 6, número especial (2), p. 243-254.
Jenkins, K. (2018). Setting energy justice apart from the crowd: Lessons from environmental and climate justice. Energy Research & Social Science 39: 117–121, https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.015
Larkin, B. (2013). "The Politics and Poetics of Infrastructure". Annual Review of Anthropology 42: 327-343. http://doi.org/10.1146/annurev-anthro-092412-155522
Rizo García, M. (2009). La comunicación, ¿ciencia u objeto de estudio? Apuntes para el debate. Question.
Roqueplo, P. (1983). El reparto el saber. Gedisa. Colecc. Límites de la ciencia. Buenos Aires, Argentina
Sábato, J. y Botana, N. (1970) *La ciencia y la tecnología en el desarrollo de América Latina.* In: Tiempo Latinoamericano. América Latina: Ciencia y tecnología en el desarrollo de la sociedad. Editorial Universitaria, Chile, pp. 59-76.
Souzo, D. y Pessoa, Z. (2022) Diagnóstico Para Gestao Muncipal | Caderno de Informacoes | Ministério do Desenvolvimento Social e Combate A Fome.
Svampa, M. y Bertinat, P. (2022). La transición energética en Argentina. Siglo XXI editores. Ciudad de Buenos Aires.
Sun, J. and Yang, K. (2016). The Wicked Problem of Climate Change: A New Approach Based on Social Mess and Fragmentation Sustainability, 8: 1-14; https://doi.org/10.3390/su8121312
Turiel, A. (2023). Claves de una transición Energética Sostenible. Antonio Turiel, investigador del CSIC. Disponible en: https://youtu.be/-Ab2iONiJtc
Urkidi, et al. (2015). Transiciones Energéticas: sostenibilidad y democracia energética. Bilbao: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea, Argitalpen Zerbitzua = Servicio Editorial.

RENEWABLE ENERGY AND COMMUNICATION: INSTITUTIONAL DIAGNOSIS OF THE OFFICIAL PORTAL OF THE ARGENTINE STATE (2024)

ABSTRACT: The text analyzes information from the official Argentine State portal related to "Renewable Energies." It presents the epistemological stance on the current issues related to energy distribution, access, and the use of renewable sources in the context of environmental problems associated with climate change. The methodological approach used relies on a Rapid Situational Diagnosis, which allows for a review of the types of communication adopted for disseminating their activities. It summarizes the type of information available on the consulted page and its characteristics. Finally, the conclusions point out that, to achieve a democratic energy transition, new public policies must be formulated to address environmental urgency, with a comprehensive focus on renewable energies. This could foster greater social participation beyond groups specifically interested in ecology or environmentalism, promoting a joint action among diverse stakeholders.

Key words: Renewable Energies; Energy Transition; Communication; Public Policies.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 426-437, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

VULNERABILIDAD ENERGÉTICA EN SALTA: ANÁLISIS Y REGISTRO DE INCENDIOS EN VIVIENDAS DE LA CAPITAL (2018-2023)

Pablo A. Duran[1], Franco D. Hessling Herrera[1], Cinthia N. Gonza[1]

[1]Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional – Universidad Nacional del Salta

(INENCO-UNSA) | Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de Salta. Avenida Bolivia N° 5150. C.P. 4400 (Salta-Argentina).

http://inenco.unsa.edu.ar - /Tel: +54387-5316591 / E-mail: duranpabloagustin@gmail.com

RESUMEN: El artículo tiene por objetivo compartir parte de la investigación realizada en el año 2023 en donde se problematiza aspectos sociales de la energía. Para ello se articularon labores con el Departamento de Bomberos, anexo de la Policía Provincial de Salta. El interés investigativo se centró en recolectar información acerca de los incendios provocados por dificultades en el acceso a la energía en las zonas urbanas de la capital salteña. El abordaje metodológico consistió en el análisis documental de los archivos disponibles en el Departamento de Bomberos. Este trabajo consistió en la revisión de libro de actas, denuncias sistematizadas por las unidades policiales y –de forma parcial- los archivos judiciales de los casos disponibles durante los últimos cinco años. Finalmente, se adopta la propuesta superadora de "vulnerabilidad energética" con el propósito de efectuar un proceso de seguridad energética enfocada en los usuarios y habitantes. Así es como el documento señala la importancia y necesidad de trabajar en mejoras para el acceso energético en zonas urbanas -periféricas, en su mayoría- de la capital de la provincia de Salta.

Palabras clave: Acceso a la energía, vulnerabilidad energética, política pública, derecho a la energía, hábitat, seguridad energética.

INTRODUCCIÓN

Según Benedetti (2020) es posible identificar claras etapas en la evolución de la instalación de las redes eléctricas en Argentina. Inicialmente, a finales del siglo XIX, se promovió la iluminación de los centros urbanos importantes. En la década de 1940, el Estado asumió la responsabilidad de la prestación del servicio y en el período de 1960 se llevó a cabo una expansión que abarcó tanto a las grandes ciudades como a las localidades con dinámicas productivas. Sin embargo, este panorama experimentó cambios significativos durante la reforma económica del modelo neoliberal propuesto por el presidente Menem desde el año 1989, cuando la privatización de los servicios transformó el papel del Estado que, pasó a ser principalmente regulador. En el caso específico de Salta, estadísticamente el 87% de la totalidad de personas se radica en ciudades con más de 20.000 habitantes, mientras que el porcentaje restante se ubica en zonas rurales o rurales dispersas (González, 2020). Estos espacios aislados conllevan dificultades para el acceso a la energía, por lo que la importancia de acceder a la misma no se centra únicamente en la conexión eléctrica, sino en obtener energía de buena calidad, confiable y segura (Ottavianelli *et al,* 2021).

Ahora bien, la imposibilidad de contar con acceso a la energía se vincula directamente con el concepto de pobreza energética. La Organización Mundial de la Salud (2018) la definió como la incapacidad de un hogar para cubrir un mínimo de servicios de energía que permita satisfacer necesidades básicas. Bajo esta línea, también correspondería a la imposibilidad que tiene un hogar para acceder a los requerimientos energéticos para su desarrollo y vida digna (Okushima y Tamura, 2011). Por ello, el

artículo problematiza las condiciones de acceso a la energía en la provincia de Salta considerando los incendios registrados en los archivos elaborados por el Departamento de Bomberos de la provincia.

En estos escenarios de pobreza energética, muchos de los actores afectados generan estrategias familiares y colectivas para garantizarse el acceso a la energía. Estas incluyen conexiones que suelen ser catalogadas como "clandestinas", "irregulares" y que son autogestionadas. Las categorías no solo evidencian, sino que también facilitan un proceso de criminalización que limita la reflexión crítica sobre las probabilidades de incidentes relacionados con la energía. De Gaulejac (2008) señala que los actores cuyo estatus los invalida buscan revalorización y reconocimiento para encontrar su lugar en la sociedad. Esto es especialmente evidente en aquellos que son desvalorizados por ser considerados "pobres", ya que su definición social se basa en las limitaciones que enfrentan en términos de acceso a profesiones, vivienda o recursos, lo que dificulta mantener una imagen positiva.

Siguiendo esta línea, Gonza *et al.* (2023) en vinculación con los aportes de Wacquant (2009) buscan caracterizar los procesos de criminalización de la pobreza, analizando de qué forma se dan estos mecanismos con habitantes en situación de vulnerabilidad bajo un contexto de inseguridad social, desregulación económica y falta de inversión pública. Se tensiona así el modo en el cual se busca el acceso a la tierra y servicios –entre ellos, la energía- en asentamientos y villas con las características del contexto político, social y económico. Por ello, los llamados "asentamientos informales" constituyen un fenómeno de varias dimensiones que evidencian problemas vinculados a la tenencia y concentración del suelo, las normas y las condiciones de habitabilidad (Viana, 2007). Estas "formas" de acceso irrumpen con la norma en la búsqueda de algunas estrategias de supervivencia ante la exclusión social en la que se encuentran:

> *"La construcción legal de la situación de quienes acceden a tierra, vivienda y servicios básicos en estas condiciones, socava sus derechos, lo reduce a un no ciudadano y facilita su enjuiciamiento social y legal. La penalización que opera en los casos analizados constituye una técnica que invisibiliza los problemas sociales que el Estado, como palanca burocrática de la voluntad colectiva, no puede o no quiere tratar desde sus causas"* (Wacquant en Gonza *et al.*, 2023, PP-4).

ENFOQUE TEÓRICO

Dentro del documento titulado "Pobreza energética. El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile" se afirma que un hogar se encuentra en un escenario de pobreza energética cuando no puede acceder a servicios de energía primordiales para satisfacer necesidades fundamentales y básicas. Las fundamentales refieren a la cocción de alimentos, acceso al agua o iluminación, puesto que estos tienen influencia directa en la salud de la población. Por su parte, las básicas hacen alusión al confort térmico, agua caliente sanitaria o tecnologías para la educación como variantes en base a la conformidad del territorio y la cultura (Urquiza *et al.* 2020).

En términos generales, la intención de medir la pobreza energética con la finalidad de presentar informes o la creación de nuevas políticas vinculan a la problemática con la falta de acceso físico a la energía moderna (Gonza *et al,* 2022). Aunque el concepto de pobreza energética podría derivarse como una manifestación de la pobreza en general, es pertinente tener en cuenta que la situación de los usuarios afectados por ésta influiría en la modificación de sus hábitos y consumos diarios, debido a las dificultades para realizar los pagos del servicio (Betto *et al.,* 2020). Por lo que Costa-Campi (2023) afirma que contemplar las dimensiones de la pobreza energética requiere revisar ingresos, estructuras y conductas con el fin de realizar una mejora en la comunicación y en la toma de decisiones de aquellos actores vulnerables. La revisión de estos modos de vida podría generar una modificación y una mejoría en su condición de hábitat. Este último concepto, el de hábitat, en palabras de Vanoli *et al* (2018), refiere a las formas de ser y estar en la tierra, señalado como un proceso dinámico que contempla diversos planos en donde se involucra lo social, lo económico, lo cultural, lo tecnológico, entre otros.

Por otro lado, Ruiz Rivera (2012) realiza un abordaje acerca de la "vulnerabilidad social", en donde reconoce que dicho concepto ha sido explorado por diversas áreas y, cada uno con su respectivo enfoque, lograron encontrar algunos puntos que conectan al término, por ejemplo: relación de amenaza ante un evento y el individuo de análisis cuando está en tensión frente a una situación específica. Particularmente, la autora retoma la diferenciación de "vulnerabilidad" como circunstancias sociales que resultan como un proceso que, al ser comparado con un parámetro mínimo, representa una pérdida (en términos de salud, recursos, necesidades, etc.) y también a la definición de "vulnerabilidad ante" como una amenaza o situación de estrés que cambia en la unidad de análisis en un tiempo determinado. Además, vincula a la vulnerabilidad social con los aportes de Sen (1981) donde su "teoría de los derechos de acceso" sirve como un método para comprender cómo distintos grupos sociales enfrentan situaciones críticas ante las amenazas.

A partir de estas nociones de vulnerabilidad es que proponemos recuperar aportes sobre el concepto de vulnerabilidad energética. Por un lado, Devesa Pérez (2023) menciona algunos autores que problematizan sus investigaciones sobre la mencionada pobreza energética y sus líneas se aproximan a una definición de "vulnerabilidad energética" la cual se entiende como las condiciones temporales o situacionales que podrían afectar el ingreso de un hogar a la pobreza energética (Bouzarovski & Petrova, 2015; Tirado Herrero, 2018). Por su parte, Bouzarovski y Petrova (2015) proponen un listado de seis factores de vulnerabilidad y cuáles son sus motivos. Estos son: "Acceso"; "Asequibilidad"; "Flexibilidad"; "Eficiencia Energética"; "Necesidades" y "Prácticas". En resumen, estos componentes caracterizan dificultades para acceder al servicio de energía en base a la desproporción con los ingresos en el hogar, junto a imposibilidad de alterar las fuentes de energía y lograr un mayor provecho energético debido a los materiales de la vivienda y, además, la falta de conocimiento sobre programas o formas de uso eficiente de energía.

En función de lo planteado, se enfatiza en demarcar la diferencia entre "Derecho de la Energía" y "Derecho a la energía". Hessling Herrera (2023) retoma la clasificación de Del Guayo Castiella en la que la primera es definida como un acervo jurídico sobre la energía, particularmente, en los servicios energéticos. En cambio, la segunda es el goce de la energía como prerrogativa, atribución y potencialidad de los sujetos. Se centra en la posibilidad de acceder a la energía para calefacción, cocción y refrigeración de alimentos, lavado de ropas, conexión a tecnologías asociadas al suministro de electricidad, etc. También menciona que el "Derecho a la Energía" se encuentra anclado a la Agenda 2030 y se vincula directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Es por esto que el derecho a la energía forma parte de las consignas que persiguen los movimientos ambientalistas y ha cobrado especial valor en los últimos tiempos a partir de la propuesta de 'Transición Energética' (Hessling Herrera *et al*., 2023). La propuesta de plantea un modelo que garantice el acceso universal a servicios considerado como esencial para el desarrollo de cualquier comunidad (Svampa y Bertinat, 2022). Por último, una transición energética con un enfoque socioambiental (Duran *et al.,* 2024), procura realizar aportes para atemperar fenómenos naturales vinculados al calentamiento global, incorporando políticas de fomento en producción y distribución desde fuentes renovables, promoviendo un acceso y consumo seguro de energía.

Este artículo busca problematizar que la energía debería estar considerada bajo un marco de derecho, para así evitar que distintos procesos que criminalizan a aquellos habitantes en la búsqueda del acceso a la energía y su consecuente autogestión. En esta última se erige falta de conocimiento en lo que respecta instalaciones eléctricas y sus respectivos materiales acordes, los cuales podrían poner en riesgo su vida y la de sus familiares.

ENFOQUE METODOLÓGICO

El enfoque metodológico es de índole cualitativo (Taylor y Bodgan, 1987); se interesó en observar de qué forma el departamento de bomberos ha trabajado en la sistematización de los datos vinculados a los incendios en la capital de Salta, para luego generar datos descriptivos. La propuesta de los autores fue realizar una articulación entre el Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional [INENCO] y

el departamento de Bomberos de la Provincia de Salta. La técnica implementada fue la investigación documental para la recolección, recopilación y selección de información en la lectura de los documentos que se caracteriza por utilizar fuentes secundarias (Reyes-Ruiz y Carmona Alvarado, 2020). Es así como esta actividad se centró, principalmente, en realizar un registro con el archivo de incendios en la jurisdicción capital de la provincia, atendiendo con interés particular a aquellos casos que hayan sido vinculados con usos de la energía. Además, otra meta fue observar de qué manera se actuó, relevó e informó este tipo de incidentes en donde a partir de la falla en transmisión eléctrica, con los usuarios o con algún artefacto en particular, tuvo lugar el hecho que ha sido trabajado por parte de la institución policial.

El objetivo inicial del trabajo fue relevar el corpus de los incidentes energéticos que hayan sido catalogados como "incendios en el hogar". El personal de bomberos advirtió que la gran cantidad de informes y actas almacenadas en la base central, que abarca una amplia gama de casos que requieren intervención policial —incluyendo operativos de seguridad contra robos, servicios de vallado para eventos públicos y deportivos, rescate de animales en peligro, allanamientos, entre otros— resulta en un considerable volumen de archivos y expedientes en formato papel. Estos documentos se conservan durante varios años antes de ser eliminados mediante la quema de papeles.

Es por esto que desde el departamento pusieron a disposición un libro de actas que contiene el periodo desde enero del 2018 hasta julio del 2023. El ejemplar registra la fecha con el horario del ingreso de la llamada, la gran mayoría de operaciones efectuadas fueron comunicadas por el servicio radial de la policía, junto con la dirección del incidente y, en algunas oportunidades, el barrio en donde sucedió el acontecimiento, breve titulación del caso y agente o unidad que atendió el suceso. Destacando que, mediante el mismo sistema de comunicación radial, la unidad de comisaría más cercana atiende el incendio de forma inmediata.

También se accedió a informes con la misma franja temporal de cada uno de los casos junto a sus respectivos expedientes. Estos presentan una "inspección ocular" de los incendios, es decir, contienen una descripción específica de lo que fue observado por parte del personal a cargo, un anexo fotográfico con varias tomas desde distintos ángulos en el lugar de los hechos, elementos materiales afectados y partes del domicilio dañadas. Al ser un legajo sensible con algunos sucesos aún intervenidos por parte del Poder Judicial, se nos permitió revisar dichos documentos de forma escrita sin la posesión personal de los documentos, ni tampoco fotografiarlos. De este manera, el grupo de trabajo se inclinó por realizar la sistematización de los archivos de forma física, a puño y letra, para luego ser cargada en una planilla virtual de común acceso entre los participantes que permitiría cruzar los datos del libro de actas, con el fin de aproximarnos a una cantidad de accidentes energéticos y al correspondiente accionar de los bomberos, junto con los expedientes detallados de cada uno de los casos, con la posibilidad de mantener mayor información específica de lo acontecido en cada hecho.

El archivo policial trabajado contiene información sobre el operativo que se activa luego de las llamadas telefónicas que alertan sobre los incendios. Así podemos identificar que el primer contacto es radial –llamada telefónica al 911-, la central de bomberos se contacta con la comisaría pertinente en la zona, para luego derivar un patrullero al área de incendio. Como resultado de esto, el instrumento elaborado para la sistematización y el análisis de los documentos policiales construye: 1) la totalidad de casos junto con el año, la dirección y el horario exacto; 2) La caracterización del incendio -intencional o accidental-; 3) Una columna de víctimas la cual no cuenta con daños fatales, muertes o lesiones graves, heridas o quemaduras de primer tipo, deterioro en la salud o pérdidas significativas, solo en algunos casos hubo hospitalizaciones por inhalación de humo tóxico. Lo que efectivamente prevaleció fueron las pérdidas materiales; 4) Los "orígenes y causas del fuego", en donde en algunos pocos casos se explicitó el motivo por el cual se realizó el incendio.

Cabe aclarar que para este relevamiento sólo se mantuvo el interés por recopilar la información de los accidentes en hogares particulares y domicilios habitados por familias, comprendiendo a los mismos como casas, departamentos y hogares catalogados como precarios -asentamientos, chozas, piezas individuales-; excluyendo así todo tipo de instalación o inmueble que fuera considerado comercio o espacios con finalidades similares -galpones, obras de construcción, etc.-

Sistematización de los datos

La documentación recolectada arrojó un total de 449 incidentes vinculados al uso de alguna fuente de energía. Esto permitió la diferenciación pertinente entre el efecto realizado por el uso del usuario, potenciales negligencias o falta de conocimiento con el correcto trato de ciertos elementos. Pero también con aquellos que son totalmente ajenos a la intervención de los domiciliados en la acción. El proceso de recolección de información fue realizado aproximadamente durante tres meses dada la imposibilidad de acceder más datos y documentos que permitan sustentar mayor cantidad de eventualidades. Haciendo énfasis en los datos obtenidos, el grupo propuso analizar los datos según su especificidad. La determinación del momento del día, el lugar en donde ocurrió, la calidad de la vivienda afectada, la cantidad de personas involucradas en la situación, la resolución de los sucesos, y el acceso a la energía fueron factores determinantes para hacer una observación general de los eventos que ocurrieron.

Al momento de caracterizar la **franja horaria** en el listado de los incidentes, se decidió fraccionar a los mismos en cuatro grandes grupos: *madrugada* de 00:01 a 06:00 horas; *mañana* de 06:01 a 12:00 horas; *tarde* de: 12-01 a 18:00; y *noche* de: 18:01 a 00:00. Fijar el horario en donde ocurrieron la mayoría de incidentes permitió determinar en qué medida los acontecimientos se encuentran vinculados a las prácticas cotidianas de los usuarios, o si es que los mismos ocurren en horarios de descanso o reposo.

Posteriormente, la **segmentación barrial** permitió comprender y deducir qué prácticas realizan los diferentes tipos de usuarios, contemplando las capacidades de acceso a la energía, la infraestructura de sus viviendas y capacidades socio-económicas para afrontar diversas situaciones. Si bien la recolección de datos se centra en el departamento capital de la provincia, es posible dividirla en cuatro ejes desde el centro, para ubicar a los barrios (B°) que se encuentran en *zona norte* -B° Huaico; Barrio Parque Belgrano, Ciudad del Milagro, Mirasoles, Castañares, etc.-; del mismo modo hacerlo con la *zona sur* –B° Santa Ana, San Carlos, Intersindical, El Tribuno, Bancario, San Remo, Don Emilio, etc.-. En el eje horizontal de la localidad, en la parte de *zona este* se encuentran Finca Independencia, B° Lola Mora, Villa Lavalle, etc.-; Mientras que, por su parte, en la *zona oeste* de la ciudad se ubican una variedad de barrios tales como B° Santa Lucía, B° Atocha, B° Grand Bourg, B° La Loma, etc.- Para culminar, también se consideró como el apartado ‘Centro’ a las principales que ocupan la parte macro y micro de la capital –ver Figura N°1-.

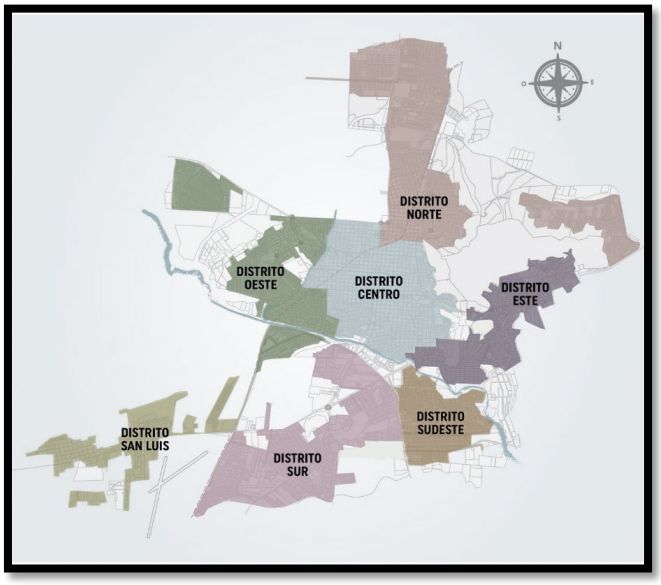


Figura 1. Mapa de la capital salteña. Fuente: Proyecto de presupuesto participativo en Hessling Herrera et. Al (2024)

.

La intención fue observar en qué zonas existe la mayor cantidad de incidentes energéticos en la capital, dado que este dato da lugar a la comprensión de las condiciones tanto sociales como estructurales

respecto a la energía. Teniendo en cuenta la vinculación de fragilidad ante el contexto social, cultural y/o económico.

Por otro lado, en la **información sobre la vivienda** se registraron las particularidades de infraestructura de las viviendas por parte de los operativos policiales. Dentro de los expedientes y archivos de los mismos, en su mayoría, se detallan los materiales de la vivienda, el estado de la construcción que encontraron, el lugar en donde se pudo ocasionar inicialmente el caso señalado como" foco *ígneo"*. Este dato, esclarecido de manera textual, da herramientas para considerar la situación en la que habitan los usuarios y bajo qué contextos se encontraron frente a lo acontecido.

En particular, la **caracterización sobre el incendio** por parte de la unidad de bomberos de Salta sería, quizás, el punto más descriptivo desde el imaginario que opera dentro de la institución de la fuerza. Se dividió, de forma simple y en su gran mayoría, en "Incendio Intencional" e "Incendio Accidental", aunque en algunos casos, se categorizó como "Incendio Accidental Previsible". En la caracterización de este punto, el accidente que se podría considerar como previsible permite entrever que, desde la mirada de quién inspeccionó el lugar posterior al hecho infortunado, la persona o las personas que habitaron ese lugar podrían haber accionado de una manera distinta. Más allá de sus respectivas descripciones propias de las palabras tanto intencional como accidental, las variedades de casos entre uno y otro presentan prácticas que podrían ser asociados con la vinculación directa al uso de ciertos artefactos.

Por último, en el instrumento se enlistó una categoría denominada **información sobre acceso a la energía** para describir brevemente qué tipos de accesos a diversas fuentes de energía podría poseer el hogar. Por ejemplo: si la vivienda poseía acceso a luz eléctrica, si tenía conexión a gas en red, si la cocción de alimentos o la calefacción de los habitantes se realiza por leña, electricidad, gas o ninguna de ellas. Cabe mencionar que fue la información más costosa de hallar dado que el libro de actas presentaba información escueta para el lector, y que los expedientes judiciales realizaban un paneo general del hogar incendiado y las damnificaciones ocasionadas.

RESULTADOS

Durante el proceso de relevamiento de la información documental, coexistieron términos que son propios de los informes policiales y que, en un primer momento, requirieron la explicación por parte del personal de bomberos para la comprensión de las planillas. Esto llevó a la necesidad de definir dos conceptos clave que serán relevantes en el análisis de los resultados: El primero, denominado "efecto Joule", se refiere a accidentes energéticos que se originan a partir del sobrecalentamiento en transmisores de electricidad, cortocircuitos en electrodomésticos o incendios en cables de baja tensión. Esta denominación identifica incidentes que están estrictamente relacionados con problemas de energía. El segundo concepto está relacionado con la responsabilidad directa del usuario en el uso de elementos o artefactos que contengan materiales combustibles o inflamables, y que puedan dar lugar a la propagación de fuego. Este fenómeno, conocido como "llama libre", incluye cualquier intervención del usuario que implique el manejo consciente y/o voluntario del fuego para fines diversos, como la cocción de alimentos, la calefacción en el hogar o el calentamiento de agua. Es fundamental examinar esta clasificación ya que asigna al usuario una responsabilidad total en la manipulación.

Entre los datos más destacados del relevamiento, el 93,5% de los incidentes (420 de 449 casos) fueron catalogados como "Accidentales", dado que no se registró evidencia de intencionalidad por parte de terceros. De los casos registrados, un 35,6% (160 casos) incluye información sobre las causas que originaron el incendio, destacando una predominancia de casos etiquetados como "llama libre", que constituyen el 60% de los incendios causados por la manipulación de las personas (Hessling Herrera et al., 2024). Además, la mayoría de los incidentes ocurrieron en las franjas horarias de la tarde y la noche: Al retomar las franjas horarias, la primera contempla los sucesos ocurridos entre las 12:01 y las 18:00 horas, y la segunda entre las 18:01 y las 00:00 horas, representando un 66,7% de los 420 casos mencionados. Esta tendencia sugiere que los momentos de mayor concentración de habitantes en los hogares como durante el almuerzo, el regreso del trabajo o estudio, y la cena, conllevan un aumento en la demanda de energía. Sumado a las dificultades de acceso a energía regular, el manejo sin supervisión de estos elementos puede incrementar el riesgo de accidentes.

En respuesta a la expansión de los barrios, el Departamento de Bomberos ha establecido dos seccionales en puntos estratégicos de la ciudad para mejorar la respuesta a incendios cercanos. La primera, con mayor antigüedad, se encuentra en el barrio El Tribuno, al sur de la ciudad, y atiende tanto a incidentes en barrios cercanos como a casos en departamentos limítrofes, como Cerrillos. La segunda seccional, ubicada en el barrio Olivos al oeste de la ciudad, ha visto un aumento poblacional reciente debido a la inversión en obras y pavimentación, que ha facilitado la conexión entre la zona sur, oeste y centro de la ciudad mediante una autopista.

Conforme al aumento poblacional en la provincia y los puntos estratégicos de los bomberos, se incluyó en la nómina de RENABAP un total de 51 asentamientos registrados en la base de datos –ver Tabla N°1-. El Registro Nacional de Barrios Populares (RENABAP), según el decreto n.º 2670/2017, define estos asentamientos como "Barrios Populares" cuando se establecen mediante diversas estrategias de ocupación de suelo, presentan un grado de precariedad, y al menos ocho familias agrupadas, de las cuales la mitad no cuentan con título de propiedad ni con al menos dos servicios básicos (electricidad, agua potable o cloacas). Esta caracterización permite definir, en términos generales, la ubicación geográfica de los asentamientos en proximidad a las sucursales de bomberos:

Tabla 1: Lista de barrios/asentamientos ubicados en la zona urbana de la capital de salta. fuente: elaboración propia.

Zona de la Ciudad	Barrios/Asentamientos
Norte	6 Barrios/Asentamientos → JM de Rosas – 1 de Mayo – Universitario – Los Piletones – Arturo Torino – Unión.
Sur	12 Barrios/Asentamientos → San Justo – Sanidad II – Fraternidad – Gauchito Gil – Norte Grande – Tinkunaku – Ampliación 20 de Junio – Finca San Francisco – Virgen de Urkupiña – Los Pinos – Santa Clara de Asís – Israel (No incluido en el Mapa de la Municipalidad).
Este	12 Barrios/Asentamientos→ La Cerámica – San Francisco Solano – 23 de Agosto – Villa Lavalle – El Jardín – Floresta – 13 de Abril – Las Colinas – El Milagro – ARA San Juan y La Católica (Ambas no están dentro del Mapa de la Municipalidad).
Oeste	15 Barrios/Asentamientos → La Ribera – Villa Los Sauces – Bicentenario – Villa Asunción – Divino Niño II – Solís Pizarro – San José – Progreso – Nuestra Sra. Del Carmen – Alta Tensión – Albergue I – Albergue II – El Cambio – Villa Luján – Comunidad Lule (No incluida en el mapeo municipal). **Villa San Lorenzo* 4 Barrios/Asentamientos → La Ciénaga – San Agustín – El Paraíso – San Lorenzo.
Centro	2 Barrios/Asentamientos → Ceferino – San Antonio.

Al analizar la distribución de los barrios populares incluidos en el listado, se observa que una gran parte de ellos se ubica en la zona oeste de la ciudad, con un 37,2% del total. Esta distribución refleja la estrategia del Departamento de Bomberos para cubrir posibles incidentes en esta área. De manera similar, las zonas sur y este de la ciudad constituyen, a la par, una representación significativa con un 23,5% cada una. Algunos asentamientos en la zona sur tienen una inclinación hacia el este, lo que significa que la seccional ubicada en El Tribuno se encargará específicamente de los incidentes en el área sureste de la capital.

La información proporcionada por esta fuente secundaria sugiere que muchos hogares podrían estar aislados, incluso dentro del área urbana de la capital. Aunque la infraestructura está diseñada para conectar gran parte de la comunidad que reside dentro de los límites de la ciudad de Salta, el crecimiento demográfico reciente podría afectar el acceso a la energía para estos “usuarios”. El análisis de datos revela una tendencia general a la falta de "intencionalidad" en los incidentes reportados por los usuarios de la red eléctrica. Sin embargo, también se observó que la entidad policial indicó que, en ciertos casos, los usuarios están al tanto de un panorama "previsible" en estos eventos.

DISCUSIONES

Dentro de este apartado, la discusión yace en considerar dos aspectos que son fundamentales para la comprensión del artículo y su desarrollo. El primero de ellos refiere a proponer otro punto de vista acerca de la seguridad energética, en donde principalmente se la analiza a niveles políticos-nacionales, como método de estrategia geopolítica para la exportación y distribución de la energía. Mientras que, desde las conclusiones arribadas de la presente investigación consideramos como indispensable la revisión de una alternativa del concepto en seguridad energética que realice un enfoque en la integridad de las personas, considerando potenciales riesgos en las condiciones infraestructurales de las viviendas en donde habitan. Atender la vulnerabilidad social, y por ende energética, de estos actores resulta esencial para el desarrollo de cada hogar, sin atravesar procesos que criminalicen accesos irregulares a la energía, atendiendo las particularidades ante situaciones de desigualdad socio-económica.

Según información del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), entre 2001 y 2022, la población de Salta y su capital ha aumentado considerablemente. En 2001, Salta tenía 1.079.051 habitantes, con 472.948 en la capital (43,8%). Para 2011, la capital creció a 536.113 habitantes, representando el 44,1% de una población total de 1.214.441 en la provincia. En 2022, la población de la capital acrecentó a 627.704 habitantes, marcando un aumento del 17,1% respecto al censo anterior. En términos generales, el incremento poblacional constituye objetivamente un problema, ya que las condiciones iniciales para habitar el planeta, diseñadas a grandes escalas hace más de doscientos años, no dejan de aumentar en demanda. Esto provoca un crecimiento continuo de consumo impulsado por modelos operativos a nivel global, fomentando hábitos de consumo permanentes y constantes entre los usuarios.

Pasquevich (2016) menciona que el incremento de consumo energético se vincula de forma proporcionalmente directa al aumento de la población hasta la década de 1950 como un punto de inflexión en donde el consumo se acrecentó de una forma más pronunciada que la de los habitantes. Además, el autor indica que el incremento de alimentos, agua potable, iluminación, vestimenta y materia prima generan un consumo más intensivo por parte de los usuarios. Dicho aumento poblacional requiere del desplazamiento en zonas urbanas de un gran número de habitantes que, ante la imposibilidad de encontrar una tierra propia, en términos de legalidad y capital económico, buscarían la forma de garantizar su subsistencia. Esto lleva a que deban ubicarse en espacios aislados que son comúnmente alejados de los grandes centros estructurales de las ciudades y relegados a las zonas periféricas de la urbanidad.

El segundo punto de discusión se centra en abarcar un concepto que considere al problema de investigación, por encima de la caracterización inicial de la pobreza energética, con un enfoque en el contexto que se impone a los actores. En este caso, la propuesta de la vulnerabilidad energética puede comprender diversos factores que tensionan la posibilidad a que un hogar, sujeto a distintas eventualidades, se encuentre próximo a un escenario de pobreza energética. Esta teoría, incluida en el

corpus analizado y abordada en las últimas décadas, se ha consolidado no solo como una problemática central en la política energética, sino también como una necesidad urgente a resolver. Se puede entender como una manifestación de otras desigualdades sociales. La restricción en el acceso a la energía limita las oportunidades disponibles para los individuos. En el siglo XXI, aspectos fundamentales como la educación, la recreación, la alimentación, el esparcimiento y la movilidad dependen en gran medida de la producción, distribución y alcance de la energía necesaria para llevar a cabo estas actividades. Desde una visión sociológica, la energía es la capacidad de hacer, y al seguir esta lógica, la energía es la que permite el funcionamiento de la sociedad (Aritzia *et al,* 2017).

Por ende, la articulación entre diversos sectores, actores y artefactos se vinculan directamente por y desde el alcance del consumo de energía. Es decir, el no acceso a este de un modo seguro y asequible reduce notablemente el nivel de productividad necesaria al sistema actual en términos globales. De tal manera, enfatizar en la solución de la pobreza energética daría la posibilidad de resolver, en enfoques tantos colectivos como individuales, las posibilidades de una sociedad de integrarse un modo de trabajar, compartir y habitar un mundo regido culturalmente del mismo modo hace más de 200 años (Devesa Pérez, 2023).

CONCLUSIONES

El proceso de recopilación de datos, en lo que concierne a la articulación de dos instituciones con perspectivas y manejos diferentes de la información, tanto en su tratado como en su respectivo análisis, requirió de una adecuación prudente por parte de los autores para buscar el equilibrio entre la posición epistemológica, por un lado, y una perspectiva acorde para comprender a la institución de la fuerza policial. Es decir, en otras palabras, tener en consideración la forma en que la vorágine del accionar de esta institución, con la inmediatez y eficiencia que se requiere, deja en un plano menor la comprensión de las condiciones sociales, económicas, estructurales o habitacionales que habrían ocurrido en cada uno de los incidentes.

Comprender la complejidad de los casos bajo el concepto de vulnerabilidad energética, haciendo un énfasis en lo que respecta al usuario final, o en su intento de serlo desde la autogestión, con un acceso seguro y asequible, mantiene una importancia fundamental dentro de las lógicas de cuidado para el uso energético. Si se aborda de manera integral, reconociendo a estos actores como sujetos de derecho, con todas las limitaciones que actualmente poseen y con las dificultades que enfrentan, se podría reducir aquellos casos en donde se vea en juego la integridad personal y material de los mismos. De tal manera, resulta fundamental reflexionar sobre la autogestión del consumo a la energía como un delito y a fin de comprenderlo como el acceso a un derecho humano al igual que la vivienda (art. 25 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, dentro del cual se ha considerado al derecho a la energía).

La suma de dichas consecuencias deja ver cómo una gran parte de estos condicionantes se vinculan con el concepto de “problema perverso” propuesto por Sun y Yang (2016) quienes establecen que la potencial resolución de un problema implicaría directamente la aparición de otro, y así consecutivamente, cayendo en un círculo vicioso que sólo puede ser resuelto trabajándolo desde la raíz. Además, la teoría del desorden social complementa esta idea de que la problemática no existe *per se.* Sino que, como asevera este concepto, ningún problema está aislado de otros, es influenciado por otras dificultades que mantiene la sociedad. En resumen, expresa que estos problemas, al interactuar con otros están bajo un mismo sistema de problemas (Ackoff, 1974).

Existen varios ejemplos que consideran a la realización y ejecución de políticas públicas, vinculadas a garantizar y promover el acceso de energía de forma segura, principalmente en zonas rurales y en espacios dispersos. Sin embargo, la investigación demuestra un número considerable de incidentes que han ocurrido en barrios, viviendas y familias afectadas en plena urbanidad de la capital salteña. Por lo tanto, el trabajo en territorio requiere la realización de un esfuerzo adicional que se ocupe de analizar, observar e indagar cuáles son las limitaciones que poseen actualmente las zonas urbanas de la provincia. Las proyecciones que se estiman para la implementación y la ejecución de estas actividades también deben considerar la posibilidad de ser empleadas en estructuras previamente realizadas, mostrando su extensión y crecimiento en el transcurso del tiempo.

Para finalizar, el trabajo centra su propósito en marcar un puntapié para futuras investigaciones acerca de las condiciones de habitabilidad y acceso a la energía en la provincia de Salta en la zona urbana de la capital. Asimismo, problematizar sobre la heterogeneidad de condiciones socioeconómicas en diversos barrios, villas y/o asentamientos en la ciudad que imposibiliten el desarrollo de una vida digna para los habitantes salteños. Para este propósito será fundamental la articulación entre instituciones públicas que trabajen en diversas áreas -como la vinculación ejemplificada en este trabajo de investigación-, y las herramientas teóricas e investigativas de distintos grupos científicos para aportar información útil que contribuya a disminuir situaciones desfavorables de futuros incidentes energéticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen la disposición del Departamento de Bomberos y la voluntad de los oficiales que acompañaron la actividad en los horarios que dispusieron para recibirnos, con la cordialidad y el respeto requerido para este tipo de actividades.

REFERENCIAS

Ackoff, Rusell. L. (1974) Systems, messes, and interactive planning. In Redesigning the Future: A Systems Approach to Societal Problems; Ackoff, R.L., Ed.; John Wiley & Sons: New York, NY, USA; Volume 10, pp. 417–439.

Ackoff, Rusell. L. (1994). El arte de resolver problemas: Las fábulas de Ackoff. México D.F.: Limusa Noriega.

Benedetti, Alejandro. (2000) ¿Redes de Energización o Redes de Exclusión? Geografía de La Electricidad y Condiciones de Reproducción Social En La Puna Jujeña: Un Estudio de Caso. Cuadernos de La Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales-Universidad Nacional de Jujuy (13): 373–386.

Betto, Frida; Garengo, Patrizia & Lorenzoni, Arturo. (2020). A new measure of Italian hidden energy poverty. Energy Policy 138: 111237.

Bouzarovski, Stefan & Petrova, Saska (2015). A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. Energy Research & Social Science, 10, 31-40

Castillo de Herrera, Mercedes; Pradilla Cobos, Emilio. (2015). La informalidad como concepto ideológico y las formas de subsistencia de la sobrepoblación relativa en américa latina. In: seminario internacional la fase actual del capitalismo y la urbanización en américa latina: lo general y lo particular, 2., 2015, Medellín. Disponible en:<http://www.relateur.org/uploads/mercedes%20castillo%20de%20herrera,%20emilio%20pradilla%20cobos.pdf>.

De Gaulejac, Vincent (2008). *Las fuentes de la vergüenza*. Editorial Gedisa.

Devesa Pérez, Carmen (2023). Comunidades energéticas como respuesta al problema de la pobreza energética. *Comillas. Universidad Pontífica.* Facultad de Económicas. Madrid.

Duran, Pablo A.; Pedraza, Melanie L. y Picabea, Juan F. (2024). Transición energética, extractivismo y cibermedios en Salta. Pluriversos de la Comunicación, 135-149

González, Facundo. (2020). Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat. Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Hurcuro y el pueblo Wichí de El Cocal (Salta, 2017-2018) [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.]

Gonza, Cinthia N.; Gonzalez, Facundo D. y Duran, Pablo A. (2022). Hábitat, Pobreza Energética y Mujeres Indígenas en el noroeste argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño. Hábitat y Sociedad; Lugar: Sevilla.

Gonza, Cinthia N., Hessling Herrera, Franco D. y González, Facundo D. (2023). “Mi Pieza”: La dimensión energética en una política habitacional para mujeres de barrios populares argentinos. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo, 16.* https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu16.mpde

González, Facundo. (2020). Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat. Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Hurcuro y el pueblo Wichí de El Cocal (Salta, 2017-2018) [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.]

Hessling Herrera, Franco D. (2023) Genealogía de la pobreza energética y del derecho a la energía Racionalidad del cálculo, epigrama "desarrollo" y derechos humanos. *Revista de Ciencias Sociales*, *36*(52), 157-173. Epub 01 de junio de 2023. https://doi.org/10.26489/rvs.v36i52.7

Hessling-Herrera, Franco D.; Garrido, Santiago M., y Gonza Cinthia N. (2023). «Derecho a La energía Desde Los Derechos Humanos: Transición Profunda Hacia Viviendas Adecuadas, Un Ambiente Sano Y Modos De Vida Dignos». *Letras Verdes. Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales*, n.º 34 (septiembre):48-65. https://doi.org/10.17141/letrasverdes.34.2023.5904

Hessling-Herrera, Franco D., Gonza, Cinthia N., & Duran, Pablo A. (2024). (In)seguridad energética, infraestructura y criminalización: entre la autogestión de derechos y el poder punitivo. *URVIO. Revista Latinoamericana De Estudios De Seguridad*, (40), 63–81. https://doi.org/10.17141/urvio.40.2024.6199

OMS (2018). Directrices de la OMS sobre vivienda y salud. Resumen de orientación, (Nº documento: WHO/CED/PHE/18.109. Recuperado el 11 de junio del 2022 de: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/279743/WHO-CED-PHE-18.10-spa.pdf

Okushima, Shinichiro. y Tamura, Macoto. (2011). Identifying the Sources of Energy Use Change: Multiple Calibration Decomposition Analysis and Structural Decomposition Analysis, Structural Change and Economic Dynamics, 22, pp. 313-326.

Ottavianelli, Emilce; González, Facundo & Cadena, Carlos. (2021). Hábitat y pobreza energética en zonas rurales aisladas en el noroeste argentino. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *5*(5), 7997-8017. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i5.886

Pasquevich, Daniel M. (2016). "La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales". Publicado en el sitio web de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias en la sección "Energía y Ambiente"

Sen, Amartya. (1981), Poverty and famines: an essay on entitlement and deprivation, Clarendon Press, Oxford.

Svampa, Maristella y Bertinat, Pablo. (2022) La transición energética en Argentina. Siglo XXI editores. Ciudad de Buenos Aires.

Sun, Jiazhe and Yang, Kaizhong. (2016). The Wicked Problem of Climate Change: A New Approach Based on Social Mess and Fragmentation Sustainability, 8: 1-14; https://doi.org/10.3390/su8121312.

Taylor, Steven J., & Bodgan, Robert. (1987). Introducción a los métodos cualitativos de investigación. Traductor Piatigorsky J.

Tirado Herrero, S. (2018). Indicadores municipales de pobreza energética en la ciudad de Barcelona. RMIT Europe, RMIT University, Barcelona.

Urquiza, Anahí; Jorquera, Catalina; Calvo Gallardo, Rubén. y Cortés Fuente, Alejandra. (2020) Pobreza Energética. El acceso desigual a energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile. Red de Pobreza Energética de Chile. Universidad de Chile. Disponible en https://drive.google.com/file/d/13ooexp0sj3n8pHv25sVTtK8PJ-8pVVwK/view.

Reyes-Ruiz, Lizeth & Carmona Alvarado, Farid A. (2020). La investigación documental para la comprensión ontológica del objeto de estudio.

Vanoli, F., Martínez, V., & Cejas, N. (2018). Procesos comunicacionales en la producción de hábitat: tres inflexiones para un abordaje decolonial. *Question/Cuestión*, *1*(58), e042. https://doi.org/10.24215/16696581e042

Veiga Copo Abel B. (2010). La temporalidad en el contrato de seguro. Riesgo y siniestro: una ecuación interesadamente compleja. RIS. Bogotá. P. 13-57.

Viana, Isabel (2007). Informalidad, regularización y derecho de propiedad. En M. Smolka y L. Mullahy (eds.), *Perspectivas urbanas. Temas críticos en políticas de suelo en América Latina* (pp. 65-154). Lincoln Institute of Land Policy.

Wacquant, Löic. (2009) Castigar a los pobres. El gobierno neoliberal de la inseguridad social. Barcelona: Editorial Gedisa.

FUENTES OFICIALES

Dirección General de Datos y Estadísticas - https://estadisticas.salta.gov.ar/web/anuarios-estadisticos

INDEC (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

Listado de Barrios Populares – ReNaBaP https://www.argentina.gob.ar/desarrollosocial/renabap/tabla

ENERGY VULNERABILITY IN SALTA: ANALYSIS AND RECORD OF FIRES IN RESIDENCES IN THE CAPITAL (2018-2023)

ABSTRACT: The article aims to share the research conducted in 2023 by a group of researchers on energy from a social sciences perspective. To achieve this, the research team collaborated with a public institution with territorial reach, namely the Fire Department, an annex of the Provincial Police of Salta. The research focus was on gathering information about fires caused by difficulties in accessing energy in the urban areas of Salta's capital. The methodological approach involved a documentary review of the available records from the Fire Department over three months, including the review of minutes books, complaints systematized by police units, and judicial files of available cases over five years. Ultimately, the article adopts the advanced concept of "energy vulnerability" with the aim of implementing a process of "energy security" for users and residents. Thus, the document highlights the importance and necessity of working on improvements for energy access in urban areas—mostly peripheral ones—in the capital of Salta province.

Keywords: Access to energy; energy vulnerability; public policy, right to energy, habitat, energy security.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 438-449, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE PROCESOS DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA A ESCALA LOCAL. RECONSTRUCCIÓN DEL CASO DE LA LOCALIDAD DE IBARLUCEA, SANTA FE

Santiago Garrido[12], Pablo Rullo[234], Ignacio Arraña[45], Rodrigo Durán[26], Emilia Ruggeri[12], Gisela Wild[7]

[1]Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología - Universidad Nacional de Quilmes (IESCT – UNQ –CICBA)
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
[3]Facultad Regional San Nicolás - Universidad Tecnológica Nacional (FRSN-UTN)
[4]Taller Ecologista
[5]Observatorio de Energía y Sustentabilidad - Facultad Regional Rosario - Universidad Tecnológica Nacional (OES – FRR – UTN)
[6]Instituto en Investigaciones de Energías no Convencionales (INENCO), Universidad Nacional de Salta (UNSa)
[7]Cooperativa de Energía y Consumos de Ibalrucea Ltda.
Roque Sáenz Peña 352 (B1876BXD) – Bernal
+54 (11) 4365-7100 (Int. 5851) – santiago.garrido@unq.edu.ar

RESUMEN: El objetivo de este trabajo es reconstruir y analizar la experiencia impulsada en conjunto por la Cooperativa Eléctrica de Ibarlucea, las Facultades Regionales de Rosario y San Nicolás de la Universidad Tecnológica Nacional, la Universidad Nacional de Quilmes y la ONG Taller Ecologista, que viene desarrollando un plan estratégico de transición energética local. En el caso de estudio, que se encuentra en sus primeras etapas de ejecución, en las que diseñaron de acciones orientadas a mejorar la eficiencia energética y la incorporación de energías renovables como respuesta a un problema ambiental como la mitigación del cambio climático, pero también entender problemáticas sociales como la reducción de la pobreza energética. Para responder a este doble desafío se avanzó en la realización de talleres de planificación estratégica, capacitaciones y un relevamiento que tuvo como resultado un diagnóstico de consumo y vulnerabilidad energética. También se avanzó en la instalación de un sistema fotovoltaico en la Cooperativa Eléctrica para desarrollar una comunidad energética local. Para reconstruir la trayectoria de esta experiencia se realizó un análisis de tipo cualitativo de información obtenida de material documental y a trabajo de campo aplicando técnicas de investigación-acción-participativa.

Palabras clave: Transición energética Justa, Planificación estratégica, Cooperativa eléctrica, Generación distribuida

INTRODUCCIÓN

La agenda energética en la actualidad está prácticamente monopolizada por la llamada transición energética definida como un proceso de sustitución tecnológica (reemplazo de energías fósiles por otras de origen renovable). Esta concepción tiene limitaciones y requiere ser contrapesada con interpretaciones y soluciones alternativas que involucren también cambios sociales, económicos, políticos y culturales. O dicho de otro modo, cambios socio-técnicos.

El gran desafío que presenta la transición energética es la definición de quiénes van a definir su alcance, su ritmo, y sobre todo quiénes van a ser los ganadores y perdedores en el proceso. En particular, es clave

avanzar en procesos de transición energética orientados a la reducción de desigualdades y la mejora de la calidad de vida de los sectores sociales vulnerables.

El desarrollo de energías renovables es presentado como una alternativa superadora, no sólo en términos ambientales, sino también que ofrecen la posibilidad de nuevos modelos de desarrollo más democráticos e inclusivos. Una de las alternativas más relevantes en este sentido ha sido el impulso de sistemas de Generación Distribuida con Energías Renovables (GDER) que tuvo un gran crecimiento en los últimos años a nivel mundial (REN21, 2022; Onterra, 2024). Sin embargo, estas iniciativas presentan limitaciones para su implementación en países como Argentina. Estas limitaciones están directamente relacionadas con el intento de replicar de forma prácticamente acrítica los modelos desarrollados en los países centrales. Las escasas experiencias desarrolladas hasta el momento terminaron generando nuevos procesos de exclusión entre los que tienen los recursos y la capacidad de beneficiarse de este tipo de sistemas y la gran mayoría que no. Frente a este tipo de limitaciones, surgieron modelos alternativos que promueven sistemas de gestión de energía generada y repartida en diferentes formas de asociativismo (Garrido, 2018).

Este tipo de experiencias no dependen necesariamente de la existencia de regulaciones específicas previas. Es así que en Argentina, surgieron proyectos y experiencias que presentaban una impronta de comunidad energética a pesar de no contar con normativa que las regule como tales. Tal es el caso de cooperativas eléctricas dedicadas a la distribución eléctrica que incorporaron sistemas de generación con energías renovables a sus actividades.

El objetivo de este trabajo es reconstruir y analizar la experiencia impulsada en conjunto por la Cooperativa Eléctrica de Ibarlucea, la Facultad Regional Rosario de la Universidad Tecnológica Nacional, la Universidad Nacional de Quilmes y la ONG Taller Ecologista, que propone un desarrollar un plan estratégico de transición energética local que tiene como ejes centrales la sustentabilidad ambiental y la inclusión social.

ABORDAJE TEÓRICO-METODOLÓGICO

La adopción de un abordaje socio-técnico constructivista como matriz conceptual articuladora del proyecto constituye una operación teórico-metodológica clave para captar la multidimensionalidad del objeto de esta investigación: las políticas y estrategias tecnológicas, innovativas e industriales para el desarrollo Industrial.

Desde esta perspectiva, no es posible considerar a los artefactos y sistemas (de producto, de proceso, de organización) como meros derivados de la evolución tecnológica (determinismo tecnológico) o consecuencias de los cambios económicos, políticos o culturales (determinismo social), sino como resultados de la dinámica de procesos de co-construcción (Oudshoorn y Pinch, 2003): la sociedad es tecnológicamente construida, así como la tecnología es socialmente conformada. Tanto la configuración como el propio funcionamiento de un artefacto (y de una política) se construyen como derivación contingente de las disputas, presiones, resistencias, negociaciones y convergencias que van conformando el ensamble heterogéneo entre actores, conocimientos, ideologías, políticas y normativas, sistemas y artefactos.

Los procesos de producción y de construcción socio-técnica del funcionamiento de las tecnologías constituyen dos caras de una misma moneda: la utilidad de un artefacto o conocimiento tecnológico no es una instancia que se encuentra al final de una cadena de prácticas sociales diferenciadas, sino que está presente tanto en el diseño de un artefacto como en los procesos de re-significación de las tecnologías en los que participan diferentes grupos sociales relevantes (usuarios, beneficiarios, funcionarios públicos, integrantes de ONGs). Así, el funcionamiento/no-funcionamiento deviene del sentido construido en estos procesos auto-organizados de adecuación/inadecuación socio-técnica, socio-política. Esta conceptualización sustituye con ventaja a estrategias explicativas estáticas en términos de "adaptación al entorno" o "contextualización" (Thomas, 2009).

Pero las tecnologías no funcionan aisladas. El análisis de fenómenos de construcción de funcionamiento

permite la realización de operaciones estratégicas de diseño, producción e implementación políticas y estrategias tecnológicas e industriales adecuadas a las concretas dinámicas tecno-productivas de los países en vías de desarrollo como Argentina. Estas políticas y estrategias suponen el diseño integrado de productos, procesos productivos y tecnologías de organización –a diferentes escalas, con diversos alcances- focalizados en relaciones problema/solución que modifican la matriz de producción, circulación, distribución y consumo.

En el caso de la experiencia presentada en este trabajo, la implementación de acciones para mejorar la eficiencia energética y la incorporación de energías renovables busca ser orientada para responder a un problema ambiental como la mitigación del cambio climático, pero también puede promover la construcción de regímenes socio-técnicos más inclusivos. Para responder a este doble desafío se propuso garantizar la participación activa y comprometida de todos los actores involucrados e interesados para asegurar el funcionamiento de las acciones que se proponen realizar.

En términos metodológicos, este trabajo fue realizado como un estudio de caso tomando un proyecto desarrollado en Ibarlucea como una experiencia novedosa, pero que al mismo tiempo permite revisar los alcances de la transición energética en Argentina. Se realizó un análisis de tipo cualitativo de información obtenida de material documental (normas técnicas, legislación y datos estadísticos) y a trabajo de campo en clave investigación-acción-participativa que se concentró en la participación en reuniones de trabajo y talleres desarrollados en el marco del proyecto entre octubre de 2022 y agosto de 2024.

ANTECEDENTES

La comuna de Ibarlucea está ubicada en la Provincia de Santa Fe, sobre la ruta nacional 34 a unos 20 km del centro de Rosario. Según datos del censo de 2022 la población es de 9200 habitantes (INDEC, 2022), aunque la zona está experimentando un importante crecimiento con múltiples desarrollos inmobiliarios residenciales en marcha, por lo que se estima una población bastante mayor. Sin embargo, no se cuenta con red de agua potable ni gas en toda la localidad, como tampoco cloacas en gran parte de ella. Como combustible de calefacción se usa principalmente la leña. La ausencia de una red de agua potable, sumado a la característica no apta para el consumo del agua extraída mediante bombeo en las perforaciones hogareñas, implica la necesidad de recolección de agua para consumo en las canillas públicas del pueblo mediante bidones.

Estas condiciones hacen que el acceso al agua, la calefacción y el calentamiento de agua para uso sanitario dependen en buena parte del uso de artefactos eléctricos (bombas de agua, equipos de aire acondicionado, calefactores, calefones y termotanques eléctricos). Estas condiciones convierten a la población de Ibarlucea en una comunidad electrodependiente. La provisión del servicio eléctrico en el casco urbano es brindada por la Cooperativa de Energía y Consumo de Ibarlucea, la cual presta servicio a alrededor de 1500 socios/as.

Aunque la localidad de Ibarlucea cuenta con una red de energía eléctrica que abastece a la totalidad de la población, hay pobladores que tienen problemas para pagar la factura. Este problema tiene múltiples causas como que los ingresos familiares no son suficientes para satisfacer todas las necesidades o que las condiciones constructivas de las viviendas son precarias e ineficientes en términos energéticos. Pero además porque el consumo eléctrico de Ibarlucea es elevado porque no se cuenta con redes de gas y agua potable. Este problema se ve profundizado en un contexto de creciente quita de subsidios determinada por el gobierno nacional y de caída general de ingresos. Las dificultades de pago de los usuarios generan problemas en la Cooperativa eléctrica encargada de la operación y mantenimiento de la red de distribución eléctrica. En este contexto, la cooperativa eléctrica impulsó diferentes iniciativas para abordar la problemática que se definió bajo el concepto de pobreza energética a partir de la articulación con diferentes instituciones del sector científico-tecnológico y organizaciones no gubernamentales (ONG).

En una primera instancia, se desarrolló un trabajo conjunto con otras cooperativas que integran la Federación de Cooperativas de Energía y Servicios Públicos de Santa Fe (FESCOE). Este trabajo se

realizó en conjunto con un grupo de investigación perteneciente al Centro de Estudios Urbanos y Regionales (CEUR) dependiente del CONICET para producir un diagnóstico sobre pobreza energética en la localidad con un énfasis particular en la dimensión de género de la problemática mencionada (Castelao Caruana et al., 2019). En una segunda etapa, se profundizó el trabajo con dos grupos focales en los que participaron 23 mujeres cuyos hogares recibían el servicio de electricidad de la Cooperativa. A partir de encuentros surgieron diferentes propuestas de acción adecuadas a las capacidades y principios de las cooperativas para mejorar la calidad de vida de los asociados y asociadas (Rosa et al., 2023). Sin embargo, ninguna de ellas pudo ser materializada.

A partir de esta experiencia, las autoridades de la cooperativa buscaron darle continuidad al trabajo realizado por lo que se asociaron a la ONG Taller Ecologista y autoridades comunales para realizar un diagnóstico sobre familias en situación de pobreza energética. Para ello se seleccionaron familias en situación de morosidad en el pago de la factura eléctrica, con las que se realizó una encuesta y auditoría. Las encuestas se abordaron con entrevistas, mientras que las auditorías mediante la observación de la vivienda y/o la medición con equipamiento técnico durante el año 2020. Debido a las limitaciones impuestas por las políticas de aislamiento impuestas debido a la pandemia de Covid-19, sólo se pudieron encuestar 5 familias. La realización de las encuestas estuvo a cargo del área de Desarrollo Social de la Comuna de Ibarlucea, mientras que las auditorías (donde se relevaron cuestiones socio-técnicas) fueron realizadas por integrantes del Taller Ecologista (Taller ecologista, 2020).

En 2021, las personas que impulsaban esta iniciativa se enfrentaron a diferentes dificultades para definir cómo abordar la problemática identificada. El año electoral dificultó la articulación entre comuna, cooperativa y otros actores de la comunidad. Asimismo, la algunos de los integrantes del Taller ecologista identificaron la necesidad de avanzar en un proceso de planificación más sistemático que incluyera también la idea de transición energética.

EJERCICIO DE PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN IBARLUCEA: PRIMEROS PASOS

En el año 2022, las autoridades de la cooperativa y los integrantes del Taller Ecologista contactaron al Instituto de Estudios sobre la Ciencia y la Tecnología de la Universidad Nacional de Quilmes (IESCT-UNQ) para trabajar diseñar y desarrollar en conjunto un proceso de planificación estratégica. Como primera tarea se realizó un primer taller con referentes de la cooperativa, la comuna y otras instituciones de Ibarlucea con el objetivo de identificar y analizar las problemáticas concretas de la comunidad referidas a la energía, proyectar una situación objetivo y planificar algunas acciones concretas.

Este taller se realizó de forma presencial en octubre de 2022 (Figura 1) y a partir del trabajo realizado en el mismo, durante la primera mitad de 2023, se discutieron diferentes acciones a desarrollar entre las que se destacaron dos:

1) La creación un fondo rotatorio para financiar mejoras estructurales de viviendas en situación de pobreza energética para mejorar su aislamiento térmico y seguridad eléctrica, y/o recambio de artefactos;
2) Obtener financiamiento para la instalación de una planta de generación fotovoltaica de la cooperativa para implementar un sistema de generación distribuida a cargo de la cooperativa.



Figura 1: Taller de planificación (1/10/2022)

La problemática central que se abordó fue la pobreza energética en socios/as de la cooperativa a partir de la información generada en los proyectos desarrollados previamente. Tomando esta problemática como multidimensional y que cuenta con características propias del territorio. Por ejemplo, teniendo en cuenta que la zona carece de redes de agua, gas natural y cloacas, lo que convierte a Ibarlucea en una localidad electrodependiente. Además, se tomaron en cuenta una serie de problemáticas asociadas a la pobreza energética: (i) deficiencias estructurales en viviendas, (ii) problemas referidos a electrodomésticos esenciales, (iii) seguridad eléctrica, (iv) la asequibilidad (costos energéticos en relación a los ingresos), (v) desigualdad de género, especialmente para las mujeres jóvenes que son las principales encargadas de las tareas reproductiva. También se tomó en cuenta como estos problemas se veían agravados por el desempleo, la informalidad laboral, el creciente aumento tarifario producto de quitas de subsidios y pérdida del poder adquisitivo, y la imposibilidad de las cooperativas de contar con esquemas de tarifa social.

Para obtener el financiamiento necesario, se buscaron diferentes alternativas. Por ejemplo, la cooperativa buscó acceder a alguna línea de crédito provincial o algún fondo no reembolsable como los que ofrecía en ese entonces la provincia de Santa Fe con financiamiento del Consejo Federal de Inversiones (CFI) (Gobierno de Santa Fe, 2022). Sin embargo, estas gestiones no tuvieron resultados positivos. Una de las limitaciones que encontró la cooperativa fue la situación de sus balances que se habían visto afectados durante los años que duró la pandemia. Frente a estas dificultades, se decidió elaborar una idea-proyecto que se presentó a la convocatoria de Proyectos de Tecnologías para la Inclusión Social (PTIS) del Programa Consejo de la Demanda de Actores Sociales (PROCODAS) en el que se propuso desarrollar un plan estratégico de transición energética justa para la localidad. La propuesta titulada “Hacia un acceso equitativo e igualitario de la energía en Ibarlucea: acciones concretas en el marco de un plan de transición energética justa a nivel local” fue aprobada en octubre de 2023 y su ejecución comenzó en noviembre del mismo año. Para cumplir con los requisitos exigidos por el financiamiento se constituyó un núcleo asociativo integrado por la cooperativa eléctrica, las facultades regionales de San Nicolás y Rosario de la UTN y el IESCT-UNQ.

El proyecto, que se encuentra actualmente en ejecución, propone generar una experiencia modelo de un sistema de generación y gestión comunitaria de la energía en el marco de un proceso de transición energética justa a escala local. Bajo este objetivo general, se plantearon diferentes objetivos específicos:
(i) Reducir la situación de pobreza energética en socios/as de la cooperativa. En una primera etapa sobre familias seleccionadas a modo de experiencia piloto;
(ii) Reducir la dependencia de compra de energía de la cooperativa a partir de la instalación de la primera etapa de una planta de generación FV distribuida de gestión cooperativa;
(iii) Construir capacidades para promover procesos de transición energética justa;
(iv) Impulsar instancias participativas y de articulación multisectorial a nivel local alrededor de las temáticas energéticas;
(v) Aportar un conjunto de datos abiertos (mediciones, perfiles de carga de usuarios, parámetros eléctricos de la red, etc.) que sirvan como soporte para el análisis de diversas metodologías.

Como criterio general se incluyeron instancias de participación activa y comprometida de la comunidad y procesos de capacitación técnica para asegurar el funcionamiento del proyecto en tres líneas de acción.
1) Proceso de planificación estratégica participativa
2) Acciones de eficiencia energética en viviendas a través de la instalación de sistemas solares térmicos para calentamiento de agua y/o mejoras edilicias y/o renovación de equipamiento ineficiente.
3) Implementación y testeo de una primera etapa de un sistema de generación distribuida fotovoltaica.

En diciembre de 2023, se realizó la primera reunión de trabajo del proyecto en el que se presentó el plan de trabajo y cronograma del proyecto. En esta instancia, además del equipo de trabajo del proyecto integrado por autoridades de la cooperativa e investigadores de la UTN y la UNQ, se sumó la participación de empleados de la cooperativa, funcionarios de la comuna y referentes del área de extensión de la UTN (Figura 2).

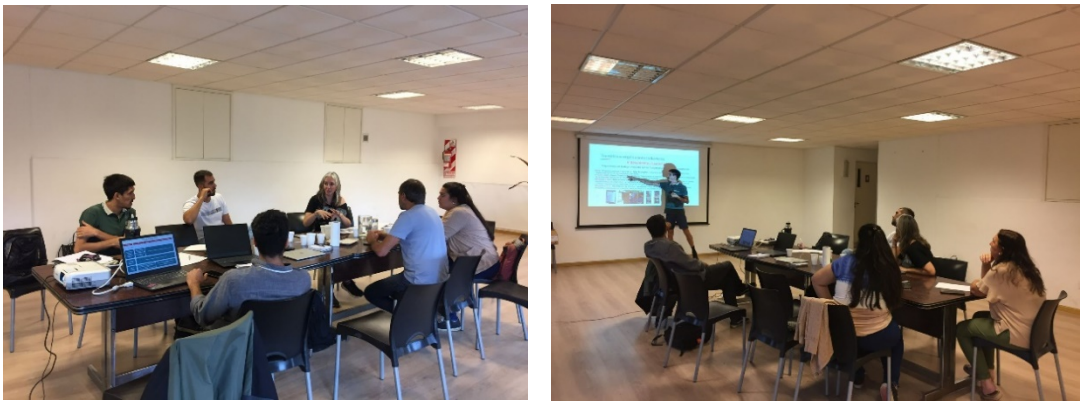


Figura 2: Primera reunión del trabajo del proyecto PROCODAS (Ibarlucea, 13/12/2023)

Al momento de la adjudicación y puesta en marcha del proyecto se produjeron las elecciones nacionales que determinaron un cambio de gobierno y la incertidumbre económica que esto generaba. Por ese motivo, una de las decisiones que se tomaron fue la realización de inversiones más grandes antes de que se produjera el cambio de autoridades. Específicamente, se gestionó la compra de los paneles fotovoltaicos que iban a utilizarse para la instalación de una planta de generación de 5,5 kWp, que representa el mayor gasto a realizar en el marco del proyecto. Asimismo, se iniciaron tratativas con las autoridades de la comuna para definir en conjunto la ubicación de la planta buscando la sesión de un predio que le ofrezca visibilidad al proyecto.

En la búsqueda de generar capacidades a nivel local e impulsar instancias participativas se iniciaron diferentes acuerdos de cooperación con instituciones educativas. Por un lado, se gestionó con la UTN para incorporar instancias de capacitaciones en energías renovables y eficiencia energética a los espacios de formación que estaba planificando la universidad en la localidad bajo la órbita de la secretaría de extensión a partir de un convenio firmado con la comuna. De este modo, ya se ofreció el primer curso de instalador de sistemas eléctricos de energías renovables en la Escuela de Formación Profesional de reciente inauguración en la localidad (Figura 3).



Figura 3: Difusión de curso en energías renovables ofrecido por la UTN en Ibarlucea

Por otro lado, desde la cooperativa de Energía se vienen articulando diversas actividades con las Escuelas primaria y secundaria de la localidad. En el marco del proyecto desde la entidad se facilitó material bibliográfico a la docente de ciencias naturales de 7mo grado turno mañana quien está trabajando en la temática con los alumnos, que tiene previsto un cierre de actividades con una visita a la entidad cooperativa donde podrán ver la instalación fotovoltaica y mantener una actividad tipo taller con miembros del equipo interdisciplinario (Figura 4).



Figura 4: Imágenes sobre el proyecto de articulación de la cooperativa con la escuela primaria Nº 152 Estanislao del Campo.

RELEVAMIENTO Y DIAGNÓSTICO

En relación a las acciones de eficiencia energética, se evaluó la necesidad de contar con datos actualizados de consumo y condiciones socio-económicas de la población. Para ello se comenzó a trabajar en el relevamiento que permita establecer un diagnóstico de consumo eléctrico cruzado con datos socio-económicos. En un primer momento, se trabajó con datos provistos por la cooperativa para realizar una caracterización del consumo de energía eléctrica de las 1504 cuentas de usuarios totales de la Cooperativa en los últimos 12 meses al momento de realizar el corte (marzo 2024). El 92,4 % (1387) de las cuentas mencionadas pertenecen a usuarios residenciales (Tabla 1).

Tabla 1: Distribución de cuentas (Usuarios) y consumos anuales de la Cooperativa eléctrica de Ibarlucea (abril de 2023 a marzo 2024)

	Cantidad de cuentas	**% sobre el total**
Alumbrado	**11**	**0,7**
Asoc. Sin fines de lucro	**4**	**0,3**
Comercial / Trifásico	**90**	**5,7**
Comercial	43	2,8
Residencial Trifásico	47	2,9
Dependencias oficiales	**11**	**0,7**
Entidades deportivas	**4**	**0,3**
Residencial General	**1427**	**92,3**
Jubilados	182	11,8
Residencial	1245	80,5
Total General	**1547**	**100,0**

En relación al consumo promedio, se lo discriminó por tipo de usuario de acuerdo a la clasificación establecida para el Registro de Acceso a los Subsidios a la Energía (RASE), identificando la cantidad de socios correspondiente a cada grupo (N1: ingresos altos; N2: ingresos bajos; N3: ingresos medios)

(Infoleg, 2022). De acuerdo a esta información se puede observar que el mayor porcentaje de los socios de la cooperativa son N2 (42,79 %), mientras que los N1 (30,65 %) y los N3 (26,56 %) se reparten en porcentajes similares. El consumo total de energía eléctrica se reparte en proporciones similares ya que el grupo N2 se lleva el 42,6 %, el N3 el 29,8 % y el N1 el 27,6 %. Sin embargo, cuando se realiza un promedio de consumo mensual, los socios correspondientes al N3 y N2 presentan las cifras mayores que los N1, 318,5 kWh en N3 y 280,7 kWh en usuarios N2, frente a 262,5 kWh en usuarios N1 (Tabla 2).

Tabla 2: Distribución de usuarios residenciales según segmentación RASE

Categoría	Cantidad de usuarios	Porcentaje %	Consumo anual %	Promedio de consumo mensual (kWh)
N1	323	30,65	27,6	262,5
N2	451	42,79	42,6	280,7
N3	280	26,56	29,8	318,5
Total	**1054**	**100**	**100**	**285,10**

De este modo, se puede comprobar que el segmento de bajos ingresos (correspondiente al N2 del RASE) tienen un mayor consumo energético que los sectores de mayores ingresos. Esta información coincide con estudios realizados en otras localidades que suelen asociar el problema a los tipos de construcción de las viviendas (materiales utilizados o falta de aislamiento térmico) y el equipamiento utilizado (electrodomésticos) también ineficiente en términos de consumo energético.

Esta información es relevante para pensar estrategias y políticas públicas. En primer lugar, demuestra que la segmentación de los usuarios de sistema eléctrico no puede hacerse a partir del consumo. Principalmente, porque no siempre los que más consumen son los usuarios de mayor nivel socio-económico. Esto también relativiza la eficacia de los sistemas de premios a la eficiencia energética que ofrecen descuentos a quienes consumen menos, ya que es muy probable que termine beneficiando a los usuarios de mayor nivel socioeconómico que suelen ser los que tienen capacidad para realizar recambio de equipamiento ineficiente.

La información obtenida de los datos de consumo medidos por la cooperativa permitió realizar una caracterización general de los usuarios a partir de los criterios establecidos por el RASE. Para completar esta información, caracterizando con mayor precisión los aspectos de vulnerabilidad socio-económica y pobreza energética de la población de Ibarlucea, se sumó al equipo de trabajo a un investigador del Instituto de Investigaciones en Energías no Convencionales (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta. Esta caracterización fue realizada a partir de los datos de un censo realizado de manera auto gestionada por la comuna de Ibarlucea en el año 2021.

En términos descriptivos, una serie de características de los hogares de Ibarlucea permiten su correspondencia con la estructura demográfica típica de hogares del centro productivo del país: viviendas constituidas en un 86 % por hasta 4 integrantes, siendo el promedio de personas por vivienda menor al nacional (un 56 % de las viviendas habitadas por hasta 3 personas) y un muy bajo nivel de hacinamiento (menor al 2 % para el total de hogares), altos niveles de propiedad de la vivienda y terreno (mayores a un 85 %) y alto porcentaje de la población empleada (7.6 % de desempleo en 2021). Estos valores sirven para indicar, a primera vista, un muy bajo nivel de pobreza estructural, no obstante, algunos rasgos, como ser la proporción viviendas ocupadas por más de un hogar (que resulta mayor al 10 %) dan cuenta de un proceso de urbanización (mediante la incorporación de población proveniente de los centros urbanos) con efectos inmediatos en la estructura demográfica y socioeconómica de la población local. Este contexto de transformación se evidencia, por ejemplo, en el aumento del valor de las propiedades y las dificultades que se imponen a la población local para acceder al suelo.

Por otro lado, presentando una caracterización de los distintos aspectos de vulnerabilidad socioeconómica de la población de Ibarlucea, se observa una fuerte dependencia de las políticas asistencialistas del estado, ya sean de manera directa (un 8 % del total de los hogares tienen al menos un integrante está incluido en la Asignación Universal por Hijo y un 16 % asignación familiar) o de

manera indirecta (siendo más de un 26 % quienes son afectados a un programa estatal de salud). Estos aspectos son correlativos a la precarización laboral, dado que, si bien se observa bajo nivel de desempleo, del total de empleados un 39 % trabaja menos de 30 horas por semana, los cuales corresponden en un 100 % a empleados informales. No obstante, la informalidad no es exclusiva de las personas que trabajan menos de 30 horas, un 59 % de las personas que trabajan más de 30 hora lo hacen bajo un trabajo informal.

En términos de los factores de vulnerabilidad a partir de las variables presentes en el Censo de Ibarlucea 2021, se han definido 6 dimensiones de vulnerabilidad socioeconómica para hogares, que se presentan en la tabla 1:

Tabla 3. Definiciones de vulnerabilidad socio económica

Dimensión	Definición del indicador
Salud	Si el hogar no tiene cobertura médica
Hogar	Si en la vivienda hay 3 o más personas por ambiente, o más de un hogar por vivienda
Vivienda	Si la vivienda es casilla, pieza o vivienda móvil. Si tenencia es No propia, Si no tiene baño dentro de la vivienda
Educación	Si el máximo nivel educativo que alcanzó cualquier miembro del hogar es hasta nivel primario
Trabajo	Si el jefe es desempleado, jubilado, o es trabajador informal, o trabaja menos de 30 horas semanales.
Asistencia social	Si tiene AUH u otro beneficio social
Discapacidad	si hay algún integrante con discapacidad en el hogar

Estas dimensiones permiten estimar niveles de intensidad en el estado de vulnerabilidad de los hogares, para ello, se procedió a contar el número de condiciones presentes en cada hogar. De esta manera, un hogar que no corresponde con ninguna de las definiciones observadas en la tabla 1 no se caracteriza como vulnerable, y aquel que corresponde con todas, se cuenta como hogar de nivel 6 o de máxima vulnerabilidad. La figura 5 presenta los resultados, de donde se observa que 60 % de los hogares mantiene al menos una condición de vulnerabilidad socioeconómica.

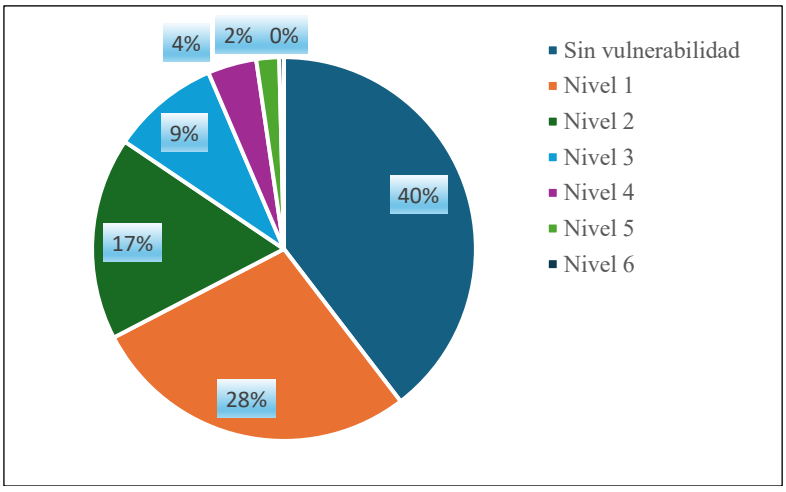


Figura 5: Porcentaje de hogares según nivel de vulnerabilidad socio - económica

Por otro lado, la cooperativa tuvo que enfrentar este año un nuevo desafío asociado con los aumentos tarifarios establecidos por el gobierno nacional. Los nuevos cuadros tarifarios impactaron directamente en la capacidad de los socios de la cooperativa para cumplir con el pago de la factura del servicio de electricidad. Esta situación también afecta a la cooperativa ya que el aumento de la morosidad o de las conexiones clandestinas, generan una inevitable merma en la recaudación que complica el funcionamiento de la misma.

Frente a este escenario, las autoridades de la cooperativa tomaron acciones que se articulan en el marco del proyecto en marcha. En primer lugar, se habilitó un espacio de asesoramiento gratuito sobre ahorro energético (Figura 6). Una vez por semana, un técnico comenzó a recibir a los socios para evaluar por qué hubo variación en el consumo y como reducir el consumo incorporando otro tipo de hábitos y prácticas. Además, se viene avanzando en un proceso de incorporación de medidores inteligentes prepagos. De este modo, se propone generar nuevas herramientas de gestión y control del consumo energético entre los socios.



Figura 6: Imagen de comunicación de la cooperativa informando del funcionamiento de asesoría para ahorro energético

SISTEMA FOTOVOLTAICO DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

En diciembre de 2023 se compraron los paneles e inversor necesarios para la instalación del sistema fotovoltaico prevista en el proyecto. Las tecnologías seleccionadas fueron:
1 inversor de tensión para conexión a red de 5000 W, marca Growatt, modelo MIN 5000TL-X.
11 paneles fotovoltaicos monocristalinos de 460 W, marca Amerisolar, modelo AS-7M120-HC.

Además, se iniciaron tratativas con las autoridades comunales para sumar al proyecto una instalación fotovoltaica de similares características al adquirido con el proyecto que se encuentra instalado en el edificio municipal. También se identificó la existencia de otra instalación ubicada en el centro de salud provincial ubicado en un edifico contiguo a la comuna.

Durante los primeros meses de 2024 se evaluaron diferentes lugares para la instalación junto a la Comuna, buscando un predio que pudiera aportar visibilidad. Sin embargo, por problemas de coordinación y algunas limitaciones de infraestructura se optó por realizar la instalación en el techo de la cooperativa. Una vez resuelta la ubicación se comenzó a trabajar en el diseño de la estructura por parte de docentes-investigadores del grupo OES-UTN y alumnos en el marco de un programa de becas de iniciación en la investigación. Luego, la construcción y montaje de las estructuras fue encargado a una cooperativa de trabajo local que realiza habitualmente obras de infraestructura en la localidad. Es relevante para los objetivos del proyecto que esta es su primera experiencia de construcción y montaje de estructuras para instalaciones fotovoltaicas. De este modo, se busca avanzar con la construcción de capacidades técnicas locales (Figura 7).



Figura 7: Proceso de instalación de las estructuras de los paneles fotovoltaicos.

TAREAS PENDIENTES

Con el proceso de relevamiento y diagnóstico avanzado, el proyecto se encuentra actualmente iniciando su etapa final. A partir del cruce de datos obtenido de la caracterización de consumo energético y de condiciones socio-económicas, se propone identificar realizar la intervención en viviendas particulares a partir de un proceso incremental en tres etapas:
a) Intervención en una primera vivienda (implementación, testeo y ajustes);
b) Intervención en dos viviendas incorporando los aprendizajes generados en la primera etapa;
c) Intervención en tres viviendas más como proceso de escalamiento contemplando diferentes opciones de acuerdo a lo experimentado en las primeras dos etapas.

Con estas intervenciones que van a incluir diferentes acciones de eficiencia energética a partir de mejoras edilicias, recambio de artefactos e incorporación de tecnologías renovables (termotanques solares, por ejemplo). Los resultados obtenidos en estas viviendas en términos de consumo energético y evaluación subjetiva de sus habitantes será un insumo clave para el diseño de estrategias concretas por parte de la cooperativa y propuestas de políticas públicas a desarrollar por la comuna.

Asimismo, se encuentra avanzado el proceso de instalación del sistema fotovoltaico. Con la puesta en marcha de la central de generación, comienza una nueva etapa con la que se espera complementar el proceso de transición energética local. Para ello se vienen evaluando diferentes modelos de gestión que contempla la generación de un fondo para financiar intervenciones en viviendas y/o para reinvertir para sumar más capacidad de generación.

CONCLUSIONES

Al comienzo de este trabajo se destacaba como los sistemas de GDER son presentados como una de las principales opciones para consolidar un proceso de transición hacia un sistema más equitativo y democrático de generación y distribución de la energía eléctrica. Sin embargo, su implementación en países como Argentina, permite observar que no siempre este tipo de modelos garantizan ese tipo de transición.

En relación a la búsqueda de alternativas que permitan avanzar a un proceso de transición energética justa, es necesario revisar otro tipo de modelos que superen a los basados en incentivos de mercado. En este sentido, se puede recuperar la experiencia acumulada por las experiencias cooperativas o comunitarias. En el caso de Argentina, esto es un elemento muy significativo por la relevancia que tienen las cooperativas de servicios públicos en las ciudades del interior del país, además de su relación con el sector académico para fortalecer y consolidar el conocimiento para implementar este tipo de proyectos.

Diferentes iniciativas locales de adopción de energías renovables y prácticas de eficiencia energética a escala local (a través de municipios y organizaciones sociales) se concentran en acciones puntuales basadas en la adopción y/o sustitución de tecnologías (artefactos). Este tipo de acciones, en la mayoría de los casos, no logra alcanzar los objetivos planteados y en muchas ocasiones terminan abandonados o inconclusos. Por este motivo, la iniciativa desarrollada en Ibarlucea se propone la implementación de un plan estratégico de transición energética que aborde la problemática energética de forma integral generando nuevas prácticas organizacionales orientadas a la mejora de la calidad de vida de la comunidad de Ibarlucea en su conjunto. Para ello, en el proceso de planificación e implementación se sumó a instituciones relevantes de la localidad como la comuna y centros educativos de la localidad, pero también a pequeñas empresas locales que permiten generar capacidades técnicas locales y sensibilización con el proceso de transición propuesto.

Finalmente, la transición energética justa debe responder un cambio integral del sistema socio-técnico vigente. Esto implica, no solo cambiar la matriz de generación de energía, también se deben revisar los marcos normativos, las prácticas de consumo y las racionalidades económicas vigentes. La construcción de esta experiencia modelo a nivel comunal de un sistema de generación y gestión comunitaria de la energía, que tiene como objetivo central la inclusión social, el impulso de dinámicas de desarrollo local

y que a su vez permite la generación de datos que sirvan como soporte a para la toma de decisiones sobre este tipo de sistemas para su adecuación para otras localidades, puede ser un primer paso en ese sentido.

REFERENCIAS

Castelao Caruana, M. E., Méndez, F. M., Rosa, P. C., & Wild, G. (2019). Aportes para la medición de la Pobreza Energética: diagnóstico y propuestas para la intervención desde una Cooperativa de la Provincia de Santa Fe.
http://fescoe.com.ar/wp-content/uploads/2021/03/RCS_n35_dossier_3-1.pdf

Garrido, S. (2018). "Por un futuro sustentable y una gestión democrática de la energía". La construcción de una experiencia de un sistema de generación alternativa en la ciudad de Armstrong en Argentina. Revista Estudios Avanzados 29: 40-55. Universidad de Santiago de Chile.
https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6703330

Gobierno de Santa Fe (2022). Plan Renovable. Energía renovable para el Ambiente (ERA).
https://www.santafe.gov.ar/index.php/web/content/download/268247/1401409/

INDEC (2022). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Datos definitivos.
https://censo.gob.ar/index.php/datos_definitivos/

Infoleg (2022). Decreto 332/2022. Régimen de segmentación de subsidios (16/6/2022).
https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/365000-369999/366629/norma.htm

Onterra (2024). Generación distribuida y otros recursos energéticos distribuidos en América Latina y el Caribe PERSPECTIVA 2024. Onterra.
https://onterra.org/reporte-regional-2024/

Oudshoorn, N. y Pinch, T. (2003). How Users Matter. The Co-Construction of Users and Technology. MIT Press, Cambridge/London.

REN21. (2022). RENEWABLES 2022 GLOBAL STATUS REPORT.
https://www.ren21.net/gsr-2022/

Rosa, P. C.; Castelao-Caruana, M. E.; Méndez, F. (2023). Estrategias de vida ante la pobreza energética de mujeres en una localidad de Argentina. Revista INVI, 38(109), 209-230.
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-83582023000300209

Taller Ecologista (2020). Energía y Pobreza. Diagnóstico y puesta en marcha de una experiencia territorial piloto en Ibarlucea. Informe técnico.

Thomas, H. (2009). Tecnologias para Inclusão social e políticas públicas na América Latina, en Tecnologias Sociais, en Caminhos para a sustentabilidade, Brasilia, RTS.

STRATEGIC PLANNING OF ENERGY TRANSITION PROCESSES AT A LOCAL SCALE. RECONSTRUCTION OF THE CASE OF IBARLUCEA, SANTA FE

ABSTRACT: The objective of this work is to reconstruct and analyze the experience promoted jointly by the Ibarlucea Electric Cooperative, the Rosario Regional Faculty of the National Technological University, the National University of Quilmes and the NGO Taller Ecologista, which has been developing a strategic plan for local energy transition. In the case study, which is in its early stages of implementation, actions were designed to improve energy efficiency and the incorporation of renewable energies as a response to an environmental problem such as climate change mitigation, but also to understand social problems such as the reduction of energy poverty. To respond to this double challenge, progress was made in the implementation of strategic planning workshops, training and a survey that resulted in a diagnosis of energy consumption and vulnerability. Progress was also made in the installation of a photovoltaic system in the Electric Cooperative to develop a local energy community. To reconstruct the trajectory of this experience, a qualitative analysis of information obtained from documentary material and field work was carried out applying participatory action-research techniques.

Keywords: Just energy transition, Strategic planning, Electric cooperative, Distributed energy generation, solar energy

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 450-462, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

ESTRATEGIAS GLOBALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A TRAVÉS DE ENERGÍA NUCLEAR: ANÁLISIS COMPARATIVO Y PERSPECTIVAS PARA EL SECTOR NUCLEAR ARGENTINO

Alejandra Lucía Pérez Lucero[1], Carlos Ramiro Rodriguez[2]
[1]Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Reactor Nuclear RAO - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar, Tel. +54351-4288797 – Fax 0261-4287370, alejandraperezlucero@unc.edu.ar
[2]Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba – Departamento de Matemática - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar Tel. +54351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta un estudio que busca examinar las diversas iniciativas y programas de diferentes países y regiones en la producción del hidrógeno a través de la energía nuclear, presentando las principales estrategias y desarrollos de los países como Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, República de Corea y Estados Unidos. Se analizan las posibilidades en Argentina, la colaboración internacional y el intercambio de conocimientos como claves para avanzar en la producción de hidrógeno mediante tecnologías nucleares. La investigación resalta la importancia de las políticas energéticas, la inversión en I+D y la integración de tecnologías avanzadas para el desarrollo sostenible y la descarbonización global.

Palabras clave: hidrógeno nuclear. métodos de producción. generación IV.

INTRODUCCIÓN

La selección de países para este estudio se basa en varios factores clave. En primer lugar, se eligieron naciones que cuentan con un desarrollo significativo en el uso de energía nuclear, así como en la implementación de políticas energéticas que promuevan la sostenibilidad y la descarbonización. Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, la República de Corea y Estados Unidos han sido líderes en la producción de energía nuclear, representando más del 70% de la generación nuclear mundial (IAEA, 2013). Además, estos países están invirtiendo fuertemente en I+D para el desarrollo de tecnologías de hidrógeno nuclear, lo que los convierte en actores estratégicos en la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

El objetivo de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear es proporcionar una fuente de energía alternativa y sostenible para su uso en aplicaciones energéticas. El hidrógeno produce emisiones bajas o nulas de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un posible candidato para la producción de energía limpia, teniendo en cuenta que su producción actual se basa mayoritariamente en combustibles fósiles que producen emisiones nocivas de gases contaminantes como así también el riesgo de agotamiento o limitación en la disponibilidad de recursos de combustibles fósiles a largo plazo.

El método más empleado es la producción mediante el reformado de gas metano con vapor de agua - Steam Methane Reforming (SMR), que libera 11 kg CO_2/kg de H_2 producido, (Ramón et al., 2020).

China es el país que más CO_2 emitió entre 1990 y 2008, con un incremento relativo del 178%, seguido por la República de Corea, con un 158%, la India, con 125%, Canadá, un 44%, Japón, un 18% y Estados Unidos, un 17%, en tanto que la Federación Rusa disminuyó un 29%, Alemania, un 17% e Inglaterra, un 7%, Tabla 1 (IAEA, 2013).

Es posible producir el H_2 a partir de energía nuclear por diferentes mecanismos (electrolíticos y térmicos), lo que evitaría los inconvenientes del uso de fuentes fósiles que se oponen a los objetivos y metas planteados en el acuerdo de París, (Seo, 2017; IAEA, 2013). La electricidad nuclear es una fuente

de energía constante y de alta capacidad (el término **"capacidad"** se refiere a la cantidad máxima de electricidad que una planta nuclear puede generar bajo condiciones óptimas), lo que puede permitir una producción de H_2 más continua y estable. Estados Unidos, Francia, Japón, Alemania, la Federación Rusa y la República de Corea, producen alrededor del 70% de la electricidad nuclear del mundo (IAEA, 2013).

Tabla 1: Los 10 mayores países emisores de CO_2 en 2008

Country	CO_2 in 1990 (million t)	CO_2 in 2008 (million t)	Relative change 1990–2008 (%)	Kyoto goal by 2012 (%)
China	2452	6809.7	+178	—
USA	5461	6369.8	+17	–7[a]
Russian Federation	2369	1687.6	–29	0
India	626	1408.5	+125	—
Japan	1179	1391.5	+18	–6
Germany	1029	857.3	–17	–21
Republic of Korea	257	663.5	+158	—
Canada	485	658.3	+44	–6
United Kingdom	625	581.8	–7	–12.5

[a] The USA participated in the Kyoto Summit in 1999 but did not ratify the Kyoto protocol.

Recordando que, si en el proceso de electrólisis, la electricidad proviene de la energía nuclear, el hidrógeno generado se clasifica como hidrógeno rosa (H2R) y la principal ventaja de este método es que la electricidad nuclear es una fuente de energía constante, con las ventajas citadas acerca de su alta capacidad, lo cual puede permitir una producción de hidrógeno más continua y estable.

La eficiencia neta del proceso de producción de hidrógeno rosa es el resultado de multiplicar la eficiencia del reactor en la producción de electricidad por la eficiencia de la celda de electrólisis. Considerando que los reactores de agua liviana (LWR) tienen una eficiencia eléctrica del 32% y las celdas de alta presión requeridas tienen una eficiencia entre el 75% y el 80%, la eficiencia neta se sitúa alrededor del 24% al 26%. Si se utiliza un reactor avanzado de alta temperatura (AHTR) con una eficiencia eléctrica del 48%, la eficiencia neta podría ser aproximadamente del 36% al 38% (Schultz K et al., 2003). El AHTR permite suministrar calor a una temperatura casi constante, proporcionar una interfaz de baja presión con los procesos de producción de hidrógeno, aislar la planta nuclear de la planta química y evitar la contaminación por tritio del hidrógeno producido (Forsberg Charles, 2003).

Otro método para obtener hidrógeno es la termólisis nuclear o de alta temperatura, que utiliza el calor generado por una reacción nuclear para descomponer directamente el agua. En este método, el agua se calienta a temperaturas muy altas mediante el calor resultante de una reacción nuclear, y el calor resultante que provoca la separación del hidrógeno y el oxígeno en el proceso conocido como termólisis nuclear. Este método requiere altas temperaturas y condiciones específicas para lograr la separación eficiente del agua en sus componentes (IAEA, 2013).

Es crucial destacar que ambos métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear presentan desafíos y consideraciones, especialmente en términos de seguridad, manejo de residuos nucleares y costos asociados. La producción de hidrógeno con energía nuclear se encuentra en etapas de investigación y desarrollo, y la viabilidad y aceptación de estos métodos dependerán de una serie de factores, incluyendo los avances tecnológicos, la disponibilidad de recursos nucleares, las políticas energéticas y las consideraciones ambientales y de seguridad que permitan la socialización de estos avances.

En la Figura 1 se muestra la evolución de los Reactores Nucleares a lo largo del tiempo (https://www.prontubeam.com/Ingenieria-en-las-redes/Evolucion-reactores-nucleares)

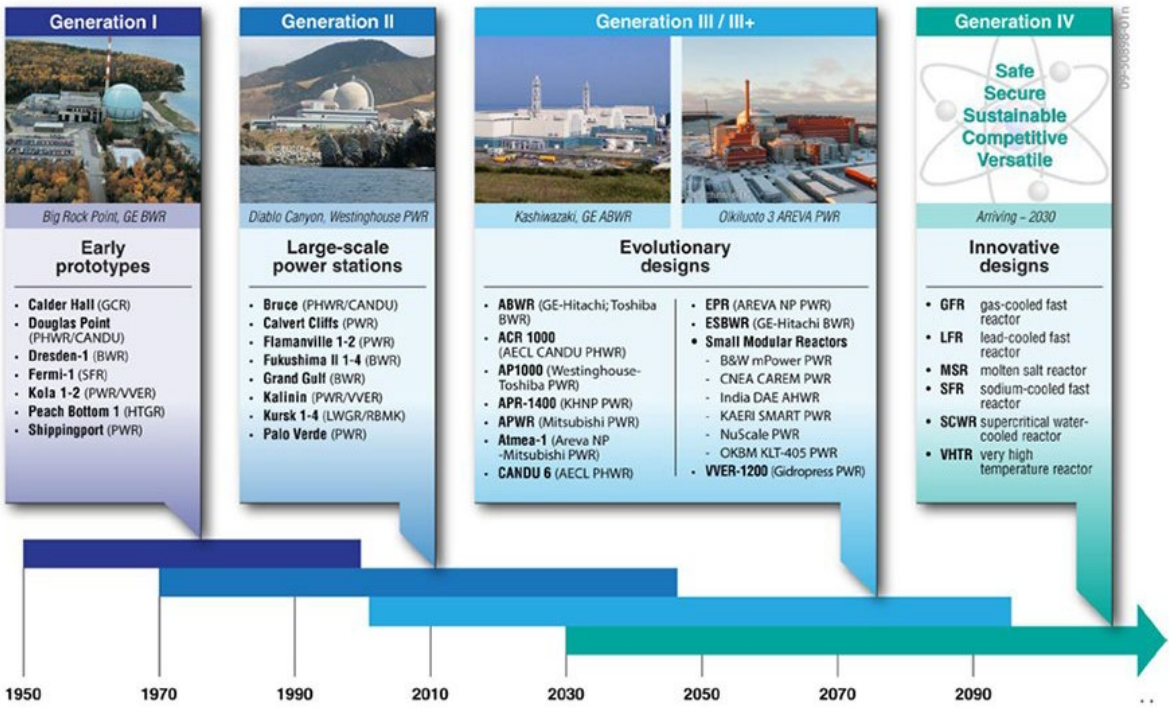


Figura 1: Evolución de los Reactores Nucleares. Fuente: Prontubeam

METODOLOGÍA

La metodología se basa en la búsqueda bibliográfica y se presenta un resumen de los puntos más destacados de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear por país (IAEA, 2013) y los objetivos de implementación hacia el año 2030 (IEA, 2021), teniendo en cuenta que el futuro del hidrógeno generado por la energía nuclear estará impulsado por los siguientes factores:

- Las tasas de producción de petróleo y gas natural.
- Decisiones sociales y gubernamentales relacionadas con el cambio climático global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero.

DESARROLLO

La energía nuclear es la que menos emite CO_2 por kWh de generación, teniendo en cuenta el estudio de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE). Estas emisiones varían entre 5,1 y 6,4 g CO_2/kWh; 6,1 a 147, para la energía hidráulica; 7,8 a 23 para la energía eólica; 7,4 a 83 para la energía solar fotovoltaica; 14 a 122 para la energía solar de concentración; 92 a 513 para gas y 149 a 1095 g CO_2/kWh para carbón (UNECE, 2022).

Puntos destacados de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear por país

Canadá: es uno de los principales productores de energía del mundo, con una significativa infraestructura nuclear. La energía nuclear contribuye aproximadamente al 15% de la electricidad nacional a partir de 18 reactores en operación, con una capacidad combinada de 12.7 GW. Canadá produce anualmente alrededor de 3 millones de toneladas de hidrógeno, utilizado principalmente en las industrias químicas (35%), refinación de petróleo (24%), mejoramiento de petróleo pesado (23%) y subproductos químicos (18%). La investigación en Canadá se enfoca en la producción de hidrógeno utilizando reactores de alta temperatura y ciclos termoquímicos avanzados, además de explorar la electrólisis de alta temperatura.

Este país tomo la decisión de desarrollar en 1942 un diseño para un reactor nuclear basado en agua pesada, con el desarrollo del Reactor de Demostración de Energía Nuclear, una planta de 20 MW(e) que comenzó a operar en 1962 utilizando uranio natural como combustible y el agua pesada como moderador y refrigerante, bases para el desarrollo evolutivo de más de 60 años de los reactores de energía CANDU construidos y operados con éxito en Canadá y otros lugares, entre ellos, Argentina.

Como miembro fundador del Foro Internacional de la Generación IV, ha seleccionado y está desarrollando el reactor de agua supercrítica de Generación IV (SCWR) basado en CANDU con un enfoque a corto plazo del uso del Reactor Avanzado CANDU (ACR) para la producción de hidrógeno. De diseño modular, el ACR-700, con una potencia térmica de 1900 MW (th) genera vapor para la producción de crudo sintético y 200 MW(e) de electricidad para la electrólisis de hidrógeno. El flujo constante de vapor utilizando un sistema de cristalizador de descarga cero de líquidos es un proceso que consume demasiada agua y podría reducir las emisiones de CO_2 en un 77%.
En cooperación con el Laboratorio Nacional de Argonne (ANL) y la Universidad de Ontario, AECL está investigando los ciclos termomecánicos de cobre-cloro, compatibles con el CANDU Mark 2 SCWR para ser utilizado en la producción de hidrógeno, aprovechando la alta temperatura del refrigerante (625°C) del SCWR adecuada para el ciclo Cu-Cl. De esta manera, se utilizaría la potencia térmica del reactor no solo para la generación de electricidad, sino también para la producción de vapor y otros procesos industriales. Dentro de su área de investigación, Canadá explora el uso de calentamiento resistivo directo de catalizadores para procesos de alta temperatura, complementando las capacidades del SCWR.
Los métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear son:

- Electrólisis Convencional a Baja Temperatura: Utiliza electricidad fuera de pico de plantas nucleares existentes. Requiere un alto porcentaje de generación nuclear para ser viable.
- Reformado de Vapor Nuclear: Desarrollado y demostrado en plantas piloto en Alemania y Japón. Ahorra hasta un 35% del metano utilizado. Es un método competitivo, pero no sostenible a largo plazo debido a las emisiones de CO_2.
- Gasificación de Carbón Nuclear: Convierte carbón en gas natural sintético o hidrógeno. Depende del costo del carbón y su comparación con el gas natural y el petróleo

Canadá realiza importantes inversiones y avances en el sector del hidrógeno, guiados por su Estrategia del Hidrógeno lanzada en 2020. Actualmente, hay más de 80 proyectos de producción de hidrógeno bajo desarrollo, representando una oportunidad económica de más de 100 mil millones de dólares canadienses. Además, existen 13 instalaciones operativas de producción de hidrógeno bajo en carbono, capaces de producir más de 3,000 toneladas al año. El Canadian Nuclear Laboratories (CNL) también ha estado trabajando en la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear como parte de sus iniciativas de energía limpia (Quinn, 2021).

China: ha emergido como un líder en la expansión de la capacidad de generación de energía, con un crecimiento notable en su sector nuclear. Los esfuerzos de investigación y desarrollo en la producción de hidrógeno nuclear en China se centran en la utilización de Reactores de Alta Temperatura (HTGR) y el desarrollo de procesos termoquímicos avanzados. Cuenta con 13 unidades de energía nuclear comercial en operación, con una capacidad total de 10.2 GW(e), lo que representa alrededor del 1% de la capacidad total de energía eléctrica del país. Además, hay 25 unidades adicionales en construcción con una capacidad de 27.6 GW. El país busca integrar estas tecnologías en su infraestructura energética para contribuir a sus objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de CO_2.
Los Reactores de Alta Temperatura (HTGR-High Temperature Reactor-Pebble-bed Module) sirven para complementar los reactores de agua a presión (PWR) en la generación de electricidad y sirven para proporcionar vapor de proceso para la recuperación de petróleo pesado y la industria petroquímica, así como la gasificación y licuefacción del carbón y la producción de hidrógeno.

Francia: es conocida por su alta dependencia de la energía nuclear, que constituye una parte significativa de su mix energético. El país está investigando la viabilidad de producir hidrógeno a gran escala utilizando sus reactores nucleares de alta temperatura. Los esfuerzos se centran en desarrollar y demostrar ciclos termoquímicos avanzados que puedan integrarse en la infraestructura nuclear existente para maximizar la producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono. Opera 58 plantas nucleares con una capacidad total de 63,2 GW, lo que la convierte en el segundo mayor productor de energía nuclear del mundo después de los Estados Unidos.
Este país mantiene un enfoque en la expansión rápida de la tecnología de Reactores de Agua a Presión (PWR) y continúa trabajando en los reactores de alta temperatura (HTGR) dentro de los programas de la Unión Europea. Las actividades claves de I+D en la producción de hidrógeno nuclear son el desarrollo del Reactor ANTARES basado en el GT-MHR de General Atomics, un reactor de 600 MW (th) con bloques prismáticos de combustible, alcanzando temperaturas de hasta 850 °C en el núcleo en la versión

de reactor de muy alta temperatura (VHTR) y la investigación de materiales adecuados para el intercambiador de calor de placa mecanizada (PMHX) y el de aletas de placa (PFHX).
En general, se verifica:

- Estrategia de Investigación y Desarrollo (I+D): Enfocada en el desarrollo de reactores rápidos enfriados por sodio y estudios de reactores rápidos enfriados por helio. Participa en proyectos internacionales como el sistema VHTR (Very High Temperature Reactor) para la producción de hidrógeno y suministro de calor de proceso a muy alta temperatura.
- Electrólisis y Reactores de Alta Temperatura: Francia ha trabajado en la tecnología HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor), aunque ha reducido su énfasis en favor de los reactores rápidos enfriados por sodio.

Alemania: ha sido pionera en el desarrollo de reactores de alta temperatura, con experiencias previas como el reactor AVR. La investigación actual se orienta hacia el desarrollo de reactores modulares avanzados y tecnologías de producción de hidrógeno, tales como la reformación de vapor nuclear y la gasificación de carbón. Estos proyectos buscan aprovechar las capacidades nucleares de alta temperatura para producir hidrógeno de manera eficiente y sostenible. En Alemania, 17 plantas nucleares operan en 2011, generando alrededor del 25% de la electricidad total del país. Sin embargo, el gobierno alemán anunció ese año un plan para desmantelar gradualmente todas las centrales nucleares del país hacia 2022 como parte de su estrategia para pasar a fuentes de energía renovable.
Entre los métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear, se destacan:

- Electrólisis a Alta Temperatura: Aumenta la eficiencia térmica en comparación con la electrólisis convencional. Se ha investigado el uso de reactores de alta temperatura como los HTGR.
- Reformado de Vapor con Energía Nuclear: Similar a Canadá, se ha demostrado en plantas piloto. Es competitivo mientras el gas natural tenga un costo razonable, aunque emite CO_2

En 2024, el gobierno alemán anunció una inversión de €4.6 mil millones para 23 proyectos de hidrógeno verde bajo el programa IPCEI Hydrogen. Estos proyectos abarcan toda la cadena de valor del hidrógeno, incluyendo la producción, transporte y almacenamiento. Entre los proyectos destacados, se incluyen un electrolizador de 300 MW en Lingen y otro de 100 MW en Rostock. Además, se está construyendo una infraestructura de 2000 km para el transporte de hidrógeno (Matalucci, 2024).

India: se encuentra en las etapas iniciales de planificación y desarrollo de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno. El país está investigando la integración de la energía nuclear en su infraestructura energética como parte de una estrategia más amplia para satisfacer la creciente demanda de energía y reducir las emisiones de CO_2. Los esfuerzos se centran en la investigación de ciclos termoquímicos y la electrólisis de alta temperatura, adaptados a las condiciones y necesidades locales. India cuenta con 19 plantas nucleares en operación en 2011, generando aproximadamente el 2,5% de la electricidad total del país. Además, había seis reactores nucleares más en construcción en ese momento.
Este país prioriza la utilización de torio en su programa nuclear y ha emprendido diversas iniciativas de investigación y desarrollo para innovar en la producción de hidrógeno nuclear. Entre los nuevos conceptos de reactores nucleares del Centro de Investigación Atómica Bhabha (BARC) están: el reactor avanzado de agua pesada (AHWR) enfocado en utilizar torio como combustible, el reactor KAMINI en IGCAR, diseñado para aprovechar el torio en un ciclo de combustible cerrado, y el reactor nuclear de alta temperatura capaz de suministrar calor de proceso en el rango de 600-1000 °C, fundamental para la producción de hidrógeno. En BARC se avanza en la investigación del proceso termoquímico S-I (Azufre-Iodo) para la producción de hidrógeno a través de la división de agua a través de varias reacciones químicas a altas temperaturas.

Japón: está desarrollando sistemas avanzados, como el reactor de muy alta temperatura (VHTR), para la producción de hidrógeno. La investigación en Japón se centra en ciclos termoquímicos avanzados, como el ciclo de S-I (azufre-Iodo), y la electrólisis de vapor de alta temperatura. Japón busca integrar estas tecnologías en su infraestructura energética para contribuir a la economía del hidrógeno y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Japón, en 2011, contaba con un total de 55 reactores nucleares en operación, lo que lo convierte en el tercer mayor productor de energía nuclear en el mundo después de Estados Unidos y Francia. Sin embargo, después del desastre nuclear de Fukushima Daiichi

en 2011, se ordenó la suspensión de todas las operaciones nucleares del país, y solo se han reiniciado algunas luego de numerosas pruebas de seguridad y actualizaciones de instalaciones.
Es un país muy activo en investigación y desarrollo en tecnologías de hidrógeno con varios proyectos como Sunshine (1974) centrado en desarrollar nuevas tecnologías energéticas y reducir la contaminación ambiental, Moonlight (1978), enfocado en tecnologías de ahorro y conversión de energía, New Sunshine (1993) donde fusionó los proyectos anteriores para abordar nuevas fuentes de energía, conversión de energía y tecnología ambiental, el proyecto de demostración de hidrógeno y celdas de combustibles y pilas de combustible, entre otros.
Este país, en forma semejante a Alemania, trabaja en el desarrollo y demostración de plantas piloto para el reformado de vapor nuclear y la gasificación de carbón.

República de Corea: ha establecido una visión a largo plazo para la transición a una economía del hidrógeno, donde la energía nuclear jugará un papel crucial. Se están desarrollando tecnologías para la producción, almacenamiento y suministro de hidrógeno. Corea del Sur planea demostrar estas tecnologías para 2030 y comercializarlas en la década siguiente, utilizando sistemas nucleares de cuarta generación y reactores de alta temperatura. En 2011, la República de Corea contaba con un total de 21 reactores nucleares en operación, lo que convierte a Corea del Sur en uno de los mayores usuarios de energía nuclear per cápita en el mundo.
Un proyecto de desarrollo de tecnologías clave para el hidrógeno nuclear comenzó en 2006 como un programa nacional de 12 años para desarrollar y demostrar las tecnologías requeridas para el futuro sistema de hidrógeno nuclear. Las instituciones involucradas en el proyecto son KAERI para la parte nuclear, y el Instituto de Investigación de Energía de Corea (KIER) y el Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea (KIST) para la parte de hidrógeno. Estas actividades nacionales se llevan a cabo en paralelo con la investigación y desarrollo del VHTR de Generación IV. La investigación y desarrollo se concentra en la tecnología HTGR. Se ha decidido un enfoque de dos pasos que prevé, en el primer paso, la implementación de un HTGR avanzado (AHTGR) con una temperatura moderada de salida del refrigerante de 850°C, que se conectará a un sistema de reformado de vapor-metano con el gas de síntesis utilizado en la reducción de mineral de hierro o la producción de metanol. El paso final será el VHTR más desafiante con una temperatura de salida del refrigerante de 950°C.

Sudáfrica: tiene solo pequeños depósitos de petróleo y gas natural, dependiendo principalmente de la producción de carbón para la mayor parte de sus necesidades energéticas. El suministro de energía primaria en 2007 fue de 128 Mtoe con una tasa de crecimiento del 4.4% anual.
Este país representa una fracción significativa de las emisiones de CO_2 de todo el continente. Debido a sus grandes depósitos de carbón, Sudáfrica es uno de los proveedores de electricidad más baratos del mundo. La capacidad de generación de energía basada en carbón representa el 79% (~40 GW(e)), seguida por petróleo crudo (10%), renovables (6%), nuclear (3%) y gas natural (2%).
Sudáfrica ha desarrollado una serie de actividades de investigación y desarrollo (I+D) centradas en el uso del calor de proceso nuclear, impulsadas por sus abundantes recursos de uranio, metales del grupo del platino y experiencia en tecnologías nucleares, incluyendo HTGR.
En 2007, se aprobó la Estrategia Nacional de Hidrógeno y Celdas de Combustible, enfocada en desarrollar soluciones competitivas para la producción de hidrógeno mediante gasificación de carbón nuclear con HTGRs.
El proyecto PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), lanzado en 2004 como Proyecto Estratégico Nacional, avanzó significativamente antes de verse afectado por la crisis económica mundial en 2009. Logró varios hitos técnicos, incluyendo diseños de reactores y análisis de seguridad nuclear. El diseño más reciente incluye un reactor de lecho de guijarros de 400 MW (th) con un ciclo Brayton directo recuperativo.
PBMR también exploró el diseño de plantas de ciclo de vapor nuclear para mercados de electricidad y calor de proceso a pequeña escala. Esto incluye propuestas para plantas de demostración de 200-250 MW térmicos en el sitio nuclear de Koeberg.
Además, en colaboración con Westinghouse, PBMR desarrolló el diseño preconceptual de plantas NGNP (Next Generation Nuclear Plant) para la producción de hidrógeno, explorando métodos como la reforma de metano por vapor y ciclos termoquímicos.

Estados Unidos: ha iniciado varios programas de investigación y desarrollo (I+D) para la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear, destacando la Iniciativa de Hidrógeno Nuclear (NHI). Los objetivos incluyen demostrar la producción comercial de hidrógeno para 2017 utilizando reactores modulares de helio (MHR) y desarrollar ciclos termoquímicos avanzados y la electrólisis de alta temperatura. Estados Unidos también está explorando la sinergia entre la energía nuclear y las energías renovables para crear un sistema energético más resiliente y sostenible. EE. UU., en 2009, tenía alrededor de 104 reactores nucleares en operación en 65 plantas nucleares ubicadas en todo el país, lo que lo convierte en el país con la mayor cantidad de reactores nucleares en operación en el mundo.
Como parte del programa nacional de investigación del hidrógeno, el DOE de EE.UU. creó la Iniciativa de Hidrógeno Nuclear (NHI) con el objetivo de avanzar en la energía nuclear para apoyar una futura economía del hidrógeno. El marco se amplió con el inicio de la Iniciativa Internacional de Investigación en Energía Nuclear (I-NERI) para la cooperación internacional bilateral o multilateral que apoya actividades de I+D para la Generación IV, la NHI y el ciclo avanzado de combustible R+D.
Los objetivos de I-NERI incluyen el desarrollo y la demostración de tecnologías que permitan la producción de hidrógeno impulsada por energía nuclear mediante procesos de producción de H2 basados en el agua sin combustibles fósiles. El objetivo de coste del DOE para el hidrógeno (a partir de 2005) es de 2 a 3 dólares por gge (galones equivalentes de gasolina), independientemente de la vía de producción y entrega de H2.

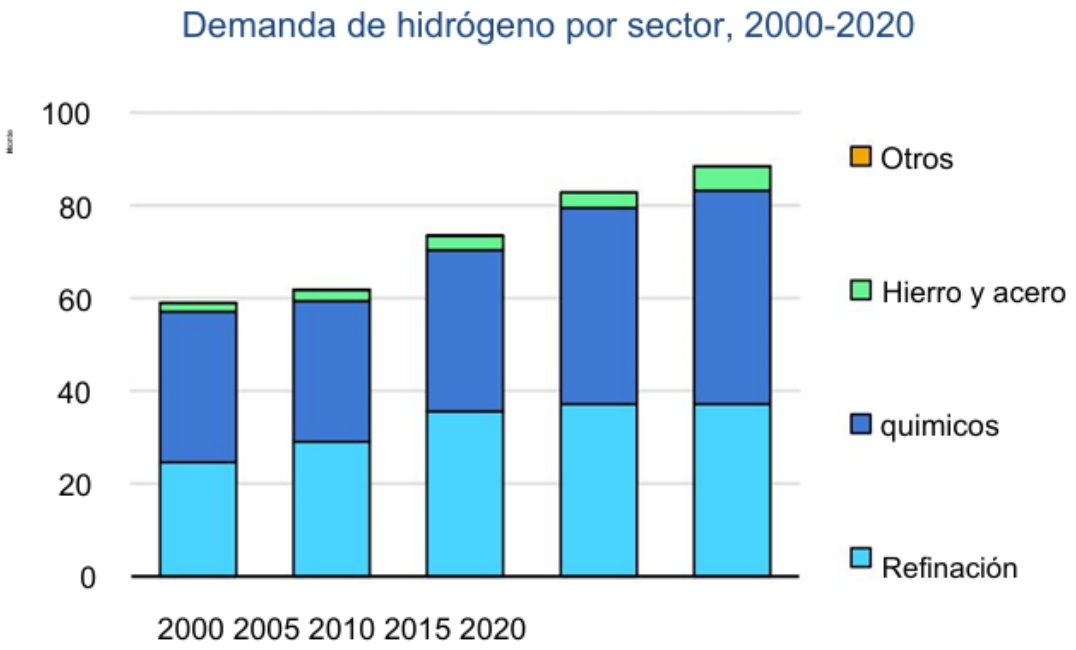


Figura 2: Demanda de Hidrógeno por sector. Fuente: (IAE, 2021).

Argentina: cuenta con tres reactores nucleares en operación comercial y ha desarrollado una amplia gama de aplicaciones en campos como medicina, agricultura e investigación científica. En la Central Nuclear Embalse, el reactor es de agua pesada y moderador de uranio natural (PHWR), potencia 600 MWe, operativo desde 1984; la Central Atucha I, con un reactor de agua pesada y moderador de uranio natural (PHWR), con 357 MWe de potencia, operativo desde 1974 y la Central Atucha II, con un reactor de agua presurizada (PWR) de 745 MWe, operativo desde 2014. Además, tiene en proyecto y desarrollo otros reactores nucleares como el CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) de diseño argentino de reactor modular pequeño de agua liviana y moderador de grafito, que está en etapa de construcción de un prototipo.
Junto con Japón, el objetivo de Argentina es fomentar la cooperación en proyectos e iniciativas para avanzar en el despliegue del hidrógeno mediante el intercambio de información y el establecimiento de cadenas de suministro y asociaciones (IAE, 2021).

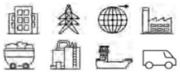
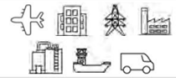
En el mundo, la demanda de hidrógeno creció un 50% desde el cambio de milenio (IAE, 2021), donde proviene casi toda de la refinación y los usos industriales, Figura 2, donde el término “otros” hace

referencia a pequeños volúmenes de demanda en aplicaciones industriales, transporte, inyección a red y generación de electricidad.

RESULTADOS

En Canadá, la investigación del CANDU Mark 2 SCWR busca desarrollar una tecnología nuclear avanzada que pueda ofrecer soluciones sostenibles y eficientes para la producción de hidrógeno, la generación de electricidad y vapor, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a los objetivos energéticos y ambientales de Canadá.
En China, el desarrollo del reactor modular de lecho de guijarros de alta temperatura HTGR y la producción de hidrógeno nuclear tienen como objetivo no solo la generación eléctrica flexible, sino también una solución viable para la producción de hidrógeno a gran escala, contribuyendo a los objetivos de energía limpia y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de China.
En Francia, las actividades de I+D están orientadas a fortalecer la capacidad de producción de hidrógeno nuclear, mejorar la tecnología de reactores de alta temperatura y desarrollar nuevos componentes y materiales necesarios para operar eficientemente a temperaturas elevadas.
En India, se busca posicionar al país como líder en la utilización de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno, contribuyendo así a la diversificación de su matriz energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sigue una hoja de ruta para el desarrollo de reactores nucleares avanzados que utilicen torio con tecnologías capaces de suministrar el calor de proceso necesario a altas temperaturas, que generen hidrógeno nuclear a través del proceso termoquímico S-I.
Japón está dedicando esfuerzos significativos y recursos financieros al desarrollo de una economía basada en el hidrógeno, buscando mejorar la seguridad energética, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y resolver problemas ambientales globales. Debido a los proyectos de I+D mejorados y activamente promovidos, financieramente apoyados por el gobierno, Japón se ha convertido en un fuerte jugador en el desarrollo de una economía del hidrógeno. Además de EE. UU., es el país líder en investigación de celdas de combustible, con grandes inversiones tanto del gobierno como de las industrias automotrices.
En la República de Corea, el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) inició una investigación sistemática sobre la producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno, y lanzó un programa fundamental de desarrollo de tecnología de celdas de combustible para integrar la energía nuclear en la economía de hidrógeno del futuro, con el objetivo de reducir las emisiones de CO_2 y mejorar la eficiencia energética utilizando energía nuclear avanzada.
Sudáfrica inició actividades que reflejan su compromiso con el desarrollo de tecnologías avanzadas de energía nuclear para diversificar su mix energético y aprovechar sus recursos naturales de manera sostenible y competitiva a nivel global.
En EEUU, el programa de investigación y desarrollo se centra en varias áreas claves dentro del sector energético incluyendo, en energía nuclear, la investigación y el desarrollo de reactores nucleares rápidos refrigerados por sodio y reactores de alta temperatura. También, el reactor modular de helio (MHR) para la generación de energía limpia y la producción de hidrógeno; la economía de hidrógeno, utilizando ciclos termoquímicos avanzados o tecnologías de electrólisis de alta temperatura. Cuenta con financiamiento federal y colaboraciones con instituciones académicas, la industria y otras naciones a través de iniciativas internacionales de colaboración en investigación.

Tabla 2: Inversión comprometida para el desarrollo de la tecnología del hidrógeno.

País	Documento, año	Objetivos de implementación (2030)	Producción	Usos	Inversión pública comprometida
Australia	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2019	No especificado	Carbón con CCUS Electrólisis (renovable) Gas natural con CCUS		1,3 mil millones de dólares australianos (~USD 0,9 mil millones)
Canadá	Estrategia de Hidrógeno para Canadá, 2020	Uso total: 4 Mt H2/año 6,2% TFEC	Biomasa Subproducto H2 Electrólisis Gas natural con CCUS Aceite con CCUS		25 millones de dólares canadienses hasta 2026(1) (~USD 19 millones)
Chile	Hidrógeno Verde Nacional Estrategia, 2020	Electrólisis de 25 GW(2)	Electrólisis (renovable)		50 millones de dólares para 2021
checo República	estrategia de hidrógeno, 2021	Demanda de bajas emisiones de carbono: 97 kt H2/año	Electrólisis		n / A
europeo Unión	Estrategia de Hidrógeno de la UE, 2020	Electrólisis de 40 GW	Electrólisis (renovable) Papel transitorio del gas natural con CCUS		3,77 mil millones de euros hasta 2030 (~USD 4,3 mil millones)
Francia	Implementación de hidrógeno Plan, 2018 Estrategia Nacional para Hidrógeno descarbonizado Desarrollo, 2020	Electrólisis de 6,5 GW 20-40% H2 industrial descarbonizado (3) 20 000-50 000 vehículos ligeros FC (3) HDV de 800 a 2 000 FC (3) 400-1 000 HRS (3)	Electrólisis		7,2 mil millones de euros para 2030 (~USD 8,2 mil millones)
Alemania	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2020	Electrólisis de 5 GW	Electrólisis (renovable)		9 mil millones de euros hasta 2030 (~USD 10,3 mil millones)
Hungría	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2021	Producción: 20 kt/año de H2 bajo en carbono 16 kt/año de H2 libre de carbono Electrólisis de 240 MW Uso: 34 kt/año de H2 con bajas emisiones de carbono 4.800 FCEV 20 HRS	Electrólisis Combustibles fósiles con CCUS		n / A
Japón	Hoja de ruta estratégica para Hidrógeno y pilas de combustible, 2019 estrategia de crecimiento verde, 2020, 2021 (revisado)	Uso total: 3 Mt H2/año Suministro: 420 kt de H2 con bajas emisiones de carbono 800.000 FCEV 1.200 autobuses FC 10.000 carretillas elevadoras FC 900 HRS Demanda de combustible de 3 Mt de NH3 (4)	Electrólisis Combustibles fósiles con CCUS		699,6 mil millones de yenes para 2030 (~USD 6,5 mil millones)
Corea	Economía del hidrógeno Mapa vial, 2019	Uso total: 1,94 Mt H2/año 2,9 millones de automóviles FC (más 3,3 millones exportados)(5) 1 200 HRS(5) 80.000 taxis FC(5) 40.000 autobuses FC(5) 30.000 camiones FC(5) 8 GW de FC estacionarios (más 7 GW exportados)(5) 2,1 GW de FC de microcogeneración (5)	Subproducto H2 Electrólisis Gas natural con CCUS		2,6 billones de wones en 2020 (~USD 2,2 mil millones)
Países Bajos	Clima Nacional Acuerdo, 2019 Estrategia de Gobierno sobre Hidrógeno, 2020	Electrólisis de 3-4 GW 300.000 coches FC 3.000 FC HDV (6)	Electrólisis (renovables) Gas natural con CCUS		70 millones de euros/año (~USD 80 millones/año)
Noruega	Hidrógeno del gobierno Estrategia, 2020 Hoja de ruta del hidrógeno, 2021	na(7)	Electrólisis (renovables) Gas natural con CCUS		NOK 200 millones para 2021 (~USD 21 millones)
Portugal	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2020	2-2,5 GW electrólisis 1,5-2% TFEC 1-5% TFEC en transporte por carretera 2-5% TFEC en la industria 10-15 % vol% H2 en red de gas 3-5% TFEC en transporte marítimo 50-100 HORAS	Electrólisis (renovables)		900 millones de euros hasta 2030 (~USD 1,0 mil millones)
Rusia	Hoja de ruta del hidrógeno 2020	Exportaciones: 2 Mt H2	Electrólisis Gas natural con CCUS		n / A
España	Hidrógeno Nacional Mapa vial, 2020	Electrólisis de 4 GW 25% H2 industrial descarbonizado 5 000-7 500 FC vehículos LDV y HDV 150-200 autobuses FC 100-150 HRS	Electrólisis (renovables)		1,6 mil millones de euros (~USD 1,8 mil millones)
Unido Reino	Estrategia de hidrógeno del Reino Unido, 2021	5 GW de capacidad de producción baja en carbono	Gas natural con CCUS Electrólisis		1.000 millones de libras esterlinas (~USD 1,3 mil millones)

Fuente: (IAE, 2021)

Las referencias gráficas indicadas en la columna usos de la Tabla 2 son:



En general, los métodos para la producción de hidrógeno empleando la energía nuclear, son:

- Electrólisis Convencional a Baja Temperatura: método probado, pero con baja eficiencia, viable con electricidad nuclear barata y abundante.
- Reformado de Vapor Nuclear: competitivo en costo, pero no sostenible a largo plazo debido a emisiones de CO_2.
- Gasificación de Carbón Nuclear: viable en grandes plantas centralizadas, depende del costo y disponibilidad del carbón comparado con otros combustibles.
- Electrólisis a Alta Temperatura y Ciclos Termoquímicos: mejora la eficiencia y se investigan con reactores de alta temperatura como los HTGR.

Finalmente, se pueden ver en la Tabla 2, los objetivos de implementación al año 2030 frente a la inversión pública comprometida por los países (IAE, 2021): El hidrógeno es una parte importante del escenario para lograr emisiones netas cero en 2050.

DISCUSIÓN

Los métodos de producción de hidrógeno utilizando energía nuclear presentan desafíos y consideraciones significativas, particularmente en cuanto a seguridad, gestión de residuos nucleares y costos asociados. Actualmente, la producción de hidrógeno mediante energía nuclear está en fases de investigación y desarrollo, y su viabilidad y aceptación dependerán de múltiples factores, incluidos los avances tecnológicos, la disponibilidad de recursos nucleares, las políticas energéticas vigentes, y las consideraciones ambientales y de seguridad.

Es de recalcar que la producción de hidrógeno a partir de energía nuclear presenta un enorme potencial para descarbonizar la industria y el transporte, teniendo en cuenta:

Reducción de emisiones:

- Emisiones actuales: el 95% del hidrógeno actual se produce mediante métodos con alta huella de carbono, emitiendo alrededor de 70 megatoneladas de CO_2 al año.
- Impacto de la energía nuclear: si el 4% de la producción actual se generara con energía nuclear, se reducirían las emisiones en hasta 60 megatoneladas anuales.
- Potencial total: si toda la producción de hidrógeno se basara en energía nuclear, se eliminarían más de 500 megatoneladas de CO_2 al año (Fisher, 2020).

Beneficios adicionales:

- *Versatilidad:* el hidrógeno producido con energía nuclear puede utilizarse en diversos sectores, incluyendo:
-
- *Combustibles:* producción de e-fuels y combustibles sintéticos.
- *Petroquímica:* fabricación de productos petroquímicos.
- *Electrónica:* elaboración de semiconductores.
- *Transporte:* alimentación de vehículos eléctricos con pilas de combustible.
- *Seguridad energética:* la energía nuclear ofrece una fuente de energía estable y confiable para la producción de hidrógeno, no sujeta a las fluctuaciones de las energías renovables.
- *Almacenamiento de energía:* el hidrógeno puede almacenarse de manera eficiente, lo que permite utilizarlo como vector energético para transportar y almacenar energía renovable.

Desafíos:

- *Inversión inicial:* la construcción de nuevas plantas de energía nuclear requiere una inversión significativa.
- *Aceptación pública:* existen preocupaciones en torno a la seguridad y los desechos nucleares, lo que requiere un mayor esfuerzo en comunicación y educación.
- *Desarrollo tecnológico:* se necesita seguir avanzando en la eficiencia y el costo de las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de energía nuclear.

Una iniciativa conjunta nacida en el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) en 2000, con la participación inicial de nueve países: Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, la República de Corea, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos, a los que se unieron posteriormente, Suiza (2002), Euratom (2003), China y la Federación Rusa (ambos en 2006), plantea desarrollar la cuarta generación de

reactores nucleares entre 2030 y 2040. Los reactores de generación IV serán más seguros, fiables, económicamente viables y resistentes a la proliferación nuclear (diseminación de armas nucleares, materiales fisibles y de la información y la tecnología nuclear) esperando que penetren en mercados no eléctricos como la producción de hidrógeno en gran escala. Estos reactores están diseñados para temperaturas de refrigerante más altas que la mayoría de los reactores nucleares actuales. Esto permitirá que los futuros reactores generen electricidad con mayor eficiencia y también calor o vapor para diversos procesos.

El GIF decidió en 2002 continuar con el estudio de seis diseños de reactores nucleares, luego de evaluar aproximadamente 100 posibles diseños de la Generación IV. Los diseños seleccionados son: *Reactor rápido refrigerado por gas (GFR), Reactor rápido refrigerado por plomo (LFR), Reactor refrigerado por sales fundidas (MSR), Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR), Reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR) y Reactor de muy alta temperatura (VHTR).*

Argentina se propone a participar en el mercado internacional de hidrógeno potenciando el desarrollo productivo a lo largo de toda la cadena de valor. Teniendo en cuenta la Estrategia Nacional de Hidrógeno (ENH) surgen los siguientes resultados (SAE, 2023):

- Hacia 2050 tendrá una producción de 5 Mt/año de hidrógeno de bajas emisiones. El 20% estará destinado al mercado local, tanto para la descarbonización de los usos actuales del hidrógeno (industrias del acero, petroquímica y refino) como para atender los nuevos usos (principalmente combustibles sintéticos). El 80% restante, unas 4 Mt anuales, estará destinado a abastecer, a través de exportaciones, el mercado internacional de vectores energéticos de bajas emisiones.
- Para alcanzar estas metas de producción será necesario instalar al menos 30 GW de capacidad de electrólisis y 55 GW de generación eléctrica renovable, lo que implica multiplicar por 11 la generación renovable actual y más que duplicar la generación total de electricidad en la Argentina.
- La producción de hidrógeno girará en torno a polos productivos, ubicados en función de la calidad de los recursos y la cercanía a los mercados internos y puertos para la exportación.
- La vinculación de estos polos con la red de universidades y centros tecnológicos locales será clave para el desarrollo de nuevas tecnologías, así como para la adopción temprana y adaptación a las condiciones productivas locales.
- La realización de los objetivos establecidos requiere una fuerte transformación de la infraestructura, en corredores viales críticos y puertos.

De acuerdo con (IAE,2021), Europa lidera el despliegue de capacidad de electrolizadores, con el 40% de la capacidad instalada mundial, y seguirá siendo el mercado más grande en el corto plazo gracias a las ambiciosas estrategias de hidrógeno de la UE y UK. Los planes de Australia sugieren que podría alcanzar a UE en unos pocos años; se espera que Latam y Medio Oriente también desplieguen grandes cantidades de capacidad, particularmente para la exportación. China tuvo un comienzo lento, pero el número de anuncios de proyectos crece rápidamente, y EEUU está intensificando sus ambiciones con su recientemente anunciado Hydrogen Earthshot. Se destaca la importancia de una cooperación internacional más sólida como palanca clave para avanzar en la producción de hidrógeno mediante tecnologías nucleares. La Agencia Internacional de Energía (AIE) recomienda que los gobiernos aumenten sus ambiciones y apoyen la creación de demanda de hidrógeno. Además, subraya la necesidad de proporcionar un fuerte apoyo a la innovación para garantizar que las tecnologías críticas lleguen pronto a la comercialización y de aumentar los presupuestos de I+D para proyectos de demostración

CONCLUSIONES

Los países analizados en este estudio —Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, la República de Corea y Estados Unidos— han demostrado ser actores clave en el desarrollo y la implementación de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno. Estos países no solo invierten en investigación y desarrollo, sino que también promueven políticas energéticas alineadas con los objetivos de descarbonización establecidos en el Acuerdo de París. La producción de hidrógeno nuclear se presenta como una opción viable para reducir significativamente las emisiones de CO_2, ofreciendo una alternativa más limpia frente a los métodos tradicionales basados en combustibles fósiles, como el reformado de gas metano con vapor (SMR), que tiene una elevada huella de carbono.

Uno de los aspectos más destacados de esta investigación es la colaboración entre los sectores público y privado, organismos internacionales, y universidades, lo que resalta la importancia de un enfoque

multidisciplinario y colaborativo para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad. La integración de tecnologías avanzadas, como los reactores de alta temperatura (AHTR) y la electrólisis con electricidad nuclear, juega un papel esencial en la mejora de la eficiencia y estabilidad del proceso de producción de hidrógeno rosa.

A pesar de los avances logrados, la producción de hidrógeno con energía nuclear enfrenta importantes desafíos, incluyendo cuestiones de seguridad nuclear, la gestión de residuos, los altos costos iniciales de inversión, y la aceptación pública. Estos obstáculos deben ser abordados mediante el avance en la investigación tecnológica, el desarrollo de marcos regulatorios robustos y la promoción de políticas públicas que fomenten la adopción de esta tecnología. Además, la integración de la producción de hidrógeno nuclear en la matriz energética global requiere una infraestructura adecuada y la implementación de estrategias a largo plazo.

En conclusión, la producción de hidrógeno con energía nuclear tiene el potencial de transformar el panorama energético global, contribuyendo a la descarbonización y al desarrollo sostenible. Sin embargo, para que esta tecnología alcance su máximo potencial, es fundamental continuar invirtiendo en I+D, fomentar la colaboración internacional y superar las barreras tecnológicas y socioeconómicas existentes.

REFERENCIAS

Fisher Matt (2020). La energía nucleoeléctrica y la transición a una energía limpia. Boletín del OIEA, setiembre de 2020.

Forsberg Charles (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. International Journal of Hydrogen Energy 28 1073-1081. URL: <www.sciencedirect.com> [consulta el 01 de Julio de 2023].

IAEA (2013). Basic Principles Objectives IAEA Nuclear Energy Series Hydrogen Production Using Nuclear Energy. http://www.iaea.org/Publications/index.html

IEA (2021). Global Hydrogen Review. Intrernational Energy Agency. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021

Matalucci Sergio (2024). The Hydrogen Stream. Pv magazine. URL: https://www.pv-magazine.com/2024/07/16/the-hydrogen-stream-germany-grants-e4-6-billion-to-23-green-h2-projects/

Quinn Patrick (2021). CNL advances hydrogen technology in Canada. Corporate Communications. URL: https://www.cnl.ca/cnl-advances-hydrogen-technology-in-canada/

Ramón, J., Teresa, M., Gotzon, A., Guilera, G. J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada. 2a edición, © 2020 Fundación Naturgy, ISBN: 978-84-09-22546-0. www.fundacionnaturgy.org

Secretaría Asuntos Estratégicos – SAE (2023). Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_sae_2023.pdf

Seo, S. N. (2017). Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions. Regional Science Policy & Practice, 9(2), 121-140.

Schultz K, Brown L, Besenbruch G, Hamilton C (2003). Large-Scale production of Hydrogen by Nuclear Energy for the Hydrogen economy. General Atomics Project. GA-A24265.

United Nations Economic Commission for Europe – UNECE (2022). Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources. https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf

INTERNATIONAL PROJECTS FOCUSED ON THE TOPIC OF NUCLEAR HYCROGEN PRODUCTION AND THE POSSIBILITIES OF THE ARGENTINE NUCLEAR

ABSTRACT: This paper presents a study that aims to examine the various initiatives and programs of different countries and regions in hydrogen production through nuclear energy. It highlights the main strategies and developments of countries such as Canada, China, France, Germany, India, Japan, the Republic of Korea, and the United States. The study also analyzes the possibilities in Argentina, emphasizing international collaboration and knowledge exchange as key factors for advancing hydrogen production using advanced nuclear technologies. The research highlights the importance of energy policies, investment in R&D, and the integration of advanced technologies for sustainable development and global decarbonization

Keywords: Nuclear Hydrogen. Production Methods. Generation IV.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 463-475, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

COSTO DE OPORTUNIDAD DE EXPORTACIÓN DE AMONÍACO VERDE DESDE ARGENTINA HACIA ALEMANIA/PAÍSES BAJOS

Ernesto Coutsiers[1,3], Mariela Colombo[1], Ramiro Rodriguez[1,2]
[1]Calden Consultoría SRL – Av. Pedro Mariani 478, Villa Allende (5105), Córdoba
www.caldenconsultoria.com Tel. +549223-620271, email:
mcolombo@caldenconsultoria.com
[2]Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299 (5000), Córdoba www.fcefyn.unc.edu.ar +543515353800,
ramiro.rodriguez@unc.edu.ar
[3]Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta - Av. Bolivia 5150 (4408), Salta www.exactas.unsa.edu.ar +543874255408, ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar

RESUMEN: Este trabajo analiza los costos nivelados de producción y entrega de amoníaco verde en 23 provincias argentinas, incluyendo la Capital Federal, para su exportación a Alemania y Países Bajos. Utiliza el software *PtX Business Opportunity Analyzer* para evaluar los costos totales del hidrógeno y sus derivados.
Argentina posee recursos renovables estratégicamente distribuidos geográficamente: solar en el norte, eólico en el centro-sur y biomásico en el litoral. Esta distribución espacial de recursos renovables supone viable la producción complementaria de electricidad, mediante parques eólicos y solares dedicados, donde la producción híbrida es la que presenta la mayor cantidad de horas equivalentes anuales para la producción de electricidad y por tanto el factor de capacidad más alto.
Las provincias con menor costo nivelado de amoníaco verde transportado por vía marítima son, en orden: Chubut, Santa Cruz, Río Negro (Patagonia Austral) y Jujuy (Noroeste), debido a la calidad de sus recursos eólicos y solares.
El estudio proyecta costos para 2030 y 2040, considerando un escenario de reducción media en los costos de tecnologías de transformación para combustibles sintéticos. Este análisis proporciona una visión integral de las oportunidades y desafíos en la producción de amoníaco verde en Argentina, considerando factores geográficos, tecnológicos y económicos para su potencial exportación.

Palabras clave: PtX, RFNBO, amoníaco verde, combustibles sintéticos

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía devenida del crecimiento poblacional global, que pronostica 9700 millones de habitantes para 2050, crece concomitantemente (Naciones Unidas, 2022). No obstante, coincidente con la meta 7.2 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): "Aumentar sustancialmente la proporción de energía renovable en la combinación energética mundial para 2030", la capacidad energética mundial basada en energías renovables, aumenta más rápido que en cualquier otro momento de las últimas tres décadas y se espera que lo haga aún dos veces y media más para 2030 con las políticas y las condiciones de mercado actuales (IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO, 2024). La capacidad instalada de energía renovable a nivel mundial por tecnología se puede ver en la Figura 1, la cual indica que la capacidad combinada aumenta de manera exponencial con el tiempo (IEA, 2023).

El aprovechamiento óptimo de estas energías renovables implica la utilización de vectores energéticos adecuados (Leiva y Rodríguez, 2013). De esta manera, surge Power-to-X (PtX o P2X) como concepto tecnológico innovador capaz de transformar electricidad renovable, en una gran variedad de productos

finales. La X en este concepto puede representar combustibles líquidos, gaseosos y otros productos químicos (Pt-liquid, Pt-gas y Pt-chemicals). A nivel de la UE, los combustibles sintéticos se definen como combustibles líquidos y gaseosos renovables de origen no biológico (RFNBO-Renewable fuels of non-biological origin, por sus siglas en inglés). El PtX abarca toda la cadena de valor, desde la generación de electricidad hasta el producto final. Esta tecnología permite la elaboración de productos que, hasta el momento, dependían de combustibles fósiles. De esta manera, el PtX se utiliza en procesos que son difíciles de descarbonizar y desfosilizar, disminuyendo la huella de carbono (PtX-Hub, 2023).

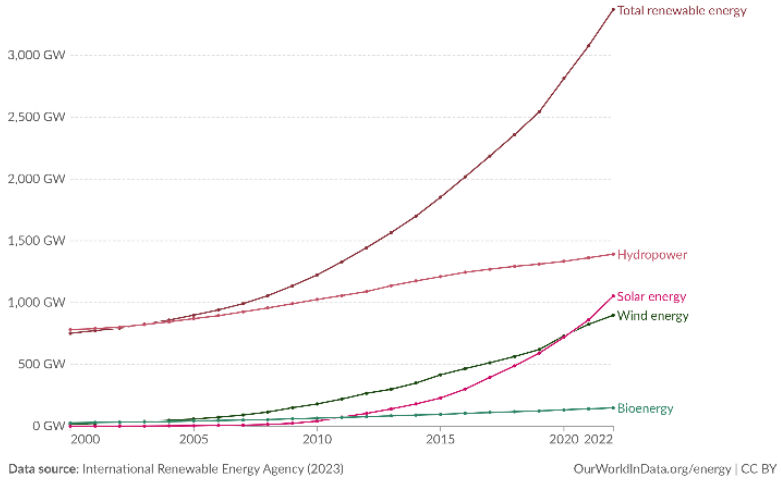
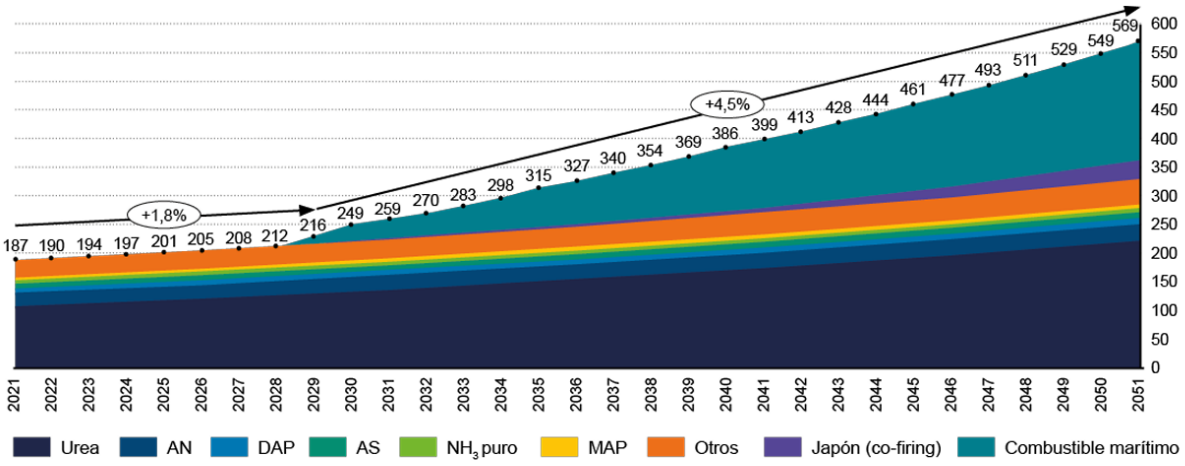


Figura 1: Capacidad instalada de energía renovable a nivel mundial por tecnología en GW.

El elemento clave en este proceso es el hidrógeno de bajas emisiones de carbono o hidrógeno verde (H_2V), obtenido por electrólisis de agua a través del uso de electricidad renovable. El H_2V se puede combinar con otras moléculas para crear compuestos derivados (X), los que pueden ser utilizados como combustibles, sorteando los cuellos de botella propios del uso del hidrógeno (Sigal y Leiva, 2015). Aquí es donde toma importancia el amoniaco verde (NH_3V), por su facilidad de producción masiva, su alta densidad energética y capacidad de descomposición total o parcial a H_2V. El NH_3V así generado se convierte en un transportador de H_2V muy prometedor (Carro de Lorenzo, 2022).

La producción de amoníaco usual o gris sucede mediante la síntesis química de Haber-Bosch, en la que se combina H_2 con nitrógeno (N_2), capturado del aire mediante adsorción por oscilación de presión (PSA), permitiendo el proceso de descarbonización, ya que en su constitución química no contiene carbono. El amoníaco gris es una materia prima clave para la industria de los fertilizantes (urea), por lo tanto, crucial para la producción de alimentos y la agricultura, para los explosivos en la minería (nitrato de amonio), en la industria química, para cosméticos y farmacia y como combustible en la navegación marítima, como lo muestra la Empresa Maersk Tankers, uno de los mayores operadores de buques cisterna del mundo, que se propone utilizar NH_3V, aprovechando su experiencia de casi 100 años en la explotación de buques cisterna y gaseros (Maersk, 2021). En la Figura 2 se muestra la proyección de la demanda mundial de amoniaco y derivados.



Fuente: IRENA, 2022

Figura 2: Proyección de la demanda mundial de amoniaco y derivados (kt, 2021–2051).

La demanda de amoniaco y sus derivados crece impulsada por su uso tradicional en la agricultura y la industria química. Se proyecta la demanda de urea en 133 kt para 2030 y 170 kt para 2040, lo que refleja un aumento sustancial en comparación con la demanda actual. Estas proyecciones indican un escenario en el cual la urea seguirá desempeñando un papel fundamental en la industria agrícola en las próximas décadas. Si bien hacia 2025 el incremento en la demanda de amoniaco estará impulsado principalmente por la demanda de la urea, en el horizonte de 2030 a 2040 se vislumbra un crecimiento de ≈ 2.20X (Figura 2), asociado a la nueva demanda de combustible marítimo libre de emisiones de CO_2eq, que se proyecta en 26 kt para 2030 y 111 kt para 2040 (IRENA y AEA, 2022).

La síntesis Haber-Bosch es un proceso industrial clave dada la importancia del amoníaco gris, no obstante, es responsable de alrededor del 1.3% de las emisiones globales de CO_2 (Nayak-Luke et al., 2021). Un camino más sustentable lo ofrece la síntesis electroquímica de amoníaco (reacción de reducción de N_2, NRR) como alternativa al proceso Haber-Bosch, cuyo objetivo es reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono (Lazouski et. al, 2022). La idea básica es utilizar electricidad procedente de fuentes renovables, para impulsar la reducción de N_2 a amoníaco en condiciones ambientales, en contraposición a las altas temperaturas y presiones que requiere el proceso Haber-Bosch. La reacción NRR tiene lugar en una celda electroquímica, donde el gas N_2 se reduce en el cátodo mientras que el agua se oxida en el ánodo. La reacción general se resume como indica la ecuación (1):

$$N_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 2NH_3 \qquad (1)$$

Sin embargo, lograr esta reacción con alta eficiencia, selectividad y rendimiento es un gran desafío debido a la estabilidad del triple enlace N≡N, que requiere 945 kJ/mol, una cantidad significativa de energía, para romperse. Aunque la síntesis electroquímica del amoníaco todavía se encuentra en fase experimental y enfrenta desafíos importantes, su desarrollo podría revolucionar la producción de amoníaco al proporcionar un método más sostenible y flexible. La clave del éxito radica en superar los problemas relacionados con la eficiencia del catalizador, la selectividad y el desarrollo de electrolitos y diseños de celdas adecuados. Si se pueden abordar estos desafíos, los métodos electroquímicos podrían eventualmente complementar o incluso reemplazar el proceso tradicional de Haber-Bosch, ofreciendo un enfoque más ecológico y descentralizado para la producción de amoníaco. Entretanto, y debido al prometedor uso del amoníaco como vector energético, surge la necesidad de un proceso de producción de amoníaco renovable, el NH_3V.

Comprometido con esta necesidad, el Gabinete Federal de Alemania aprobó en el mes de julio de 2024 la *Estrategia de Importación de Hidrógeno y sus Derivados*, cuyo objetivo es asegurar el suministro necesario de estos combustibles sintéticos para Alemania, garantizando una provisión resiliente. Esta acción establece un marco claro y fiable para los urgentes requerimientos de importación de hidrógeno y sus derivados y declara que “una gran parte de la demanda de hidrógeno deberá ser cubierta a medio

y largo plazo mediante importaciones del extranjero" (Nationale W|asserstoffstrategie, 2024). De esta manera, la estrategia proporciona seguridad de inversión para la producción de hidrógeno en los países socios, como es el caso de Argentina, y el desarrollo de la infraestructura de importación necesaria para la industria alemana como consumidora. En números, se estima una demanda nacional de hidrógeno y sus derivados de entre 95 y 130 TWh para el año 2030, de los cuales aproximadamente el 50-70% (45-90 TWh) deberán ser importados, pudiendo crecer a 360 y 500 TWh de hidrógeno y aproximadamente 200 TWh de sus derivados para el año 2045 (BMWK, 2024). Adicionalmente, Alemania y Los Países Bajos declararon en noviembre de 2023 una alianza para importar hidrógeno renovable, anunciando aportes por 300 millones de Euros cada uno y un mecanismo de licitación conjunta para importar hidrógeno renovable a partir de 2027, mediante un mecanismo de doble subasta de H2Global, con miras a la creación de un mercado mundial del hidrógeno (H2Global, 2023).

En este contexto, Argentina tiene la posibilidad de convertirse en un socio importante de la Unión Europea y acelerar su desarrollo económico exportando productos PtX a aquellos países, la mayoría de los cuales no pueden producirlos de forma tan rentable. Esto es viable porque el país presenta un gran potencial natural para la expansión de la energía eólica y solar de bajo costo y en algunos sitios de la Patagonia los parques eólicos alcanzan factores de capacidad mayores al 50% y la irradiación solar del noroeste del país puede alcanzar hasta 2000 kWh/kWp (Remler, 2022). Estos recursos sumados al de residuos de biomasa dendroenergética hacen que Argentina tenga un gran potencial de producción de H_2 (Sigal et. al, 2014).

En este trabajo se analiza la composición de costos nivelados de entrega de NH_3V comparados entre las 23 provincias de Argentina incluida la Capital Federal o ciudad autónoma de Buenos Aires (CABA), con el objetivo de constituir una lista categorizada por costos para su exportación hacia Alemania/Países Bajos y contribuir así a valorar el análisis del costo de oportunidad que brinda este negocio.

METODOLOGÍA y DESARROLLO

En el desarrollo de este trabajo se utilizó el software *PtX Business Opportunity Analyser_PtX BOA* (Oeko-Institut, 2023). La herramienta tiene como objetivo promover la exportación de una amplia gama de moléculas de PtX, entre ellas, amoníaco verde, e-metanol y combustibles sintéticos, con la cual es posible calcular el costo de entrega de las moléculas de PtX desde un país exportador a un país importador, con una comparación detallada de los costos que resalta la ventaja competitiva entre regiones. La herramienta incluye un conjunto de datos predeterminado para todos los países incluidos, que sirve de guía al usuario y ofrece una descripción general de alto nivel utilizando "información de nivel de prefactibilidad", al tiempo que permite al usuario ajustar manualmente todas las variables relevantes para incorporar los datos locales. Además, la herramienta conecta el análisis técnico-económico con información relevante sobre esquemas de certificación y cuestiones de sostenibilidad.

Configuración de parámetros de simulación

En el menú del software, para cada producto derivado del H_2V se pueden combinar distintas opciones tecnológicas de electrólisis: alcalina (AEL), de membrana de intercambio de protones (PEM) y de celda de óxido sólido (SOEC), fuentes de electricidad renovable (fotovoltaico (FV) inclinado, híbrido eólica-fotovoltaico, eólica terrestre, eólica marina) y escenarios temporales que implican reducción (alta, media y baja) de costos para tecnologías de transformación para producir derivados. De igual manera se selecciona la región de abastecimiento (las 23 provincias argentinas y CABA) y el país a abastecer, que como tal se toma al consorcio Alemania/Países Bajos, ya que mediante el uso de este software de simulación se obtienen valores que difieren sólo en un 0,3% entre esos países. A su vez, es posible seleccionar la unidad de costo de entrega, para lo cual el software utiliza la conversión:
1 USD/t NH_3V = 5,2 USD/MWh NH_3V.

Con el objeto de categorizar las provincias en el orden de menor a mayor respecto a los costos de entrega de NH_3V, se llevaron a cabo simulaciones con algunos parámetros decididos como fijos y sólo los referidos a la tecnología de electrólisis se dejaron libres para sensibilizar la simulación, de modo de seleccionar la tecnología que implique mejores condiciones operativas y menores costos. La Tabla 1

muestra el conjunto de parámetros fijos (celdas en fondo blanco) y libres (celda en fondo gris), posibles de seleccionar para las simulaciones.

Tabla 1: Parámetros posibles de seleccionar para las simulaciones.

Parámetros de la simulación	
Producto derivado	NH_3V
Abastecimiento	23 provincias argentinas + CABA
Demanda	Alemania/Países Bajos
Generación Renovable	Híbrido eólica-fotovoltaico
Tecnología de electrólisis	AEL, PEM, SOEC
Fuente de agua	Desalinización
Transporte	Marítimo
Escenario	Medio (2030 - 2040)
Unidad de costo de entrega	USD/MWh NH_3V o USD/t NH_3V

Selección de la tecnología de electrólisis de menor costo de entrega de NH_3V para escenarios medios 2030-2040

Configurando los parámetros de la Tabla 1 se llevó a cabo una simulación sensibilizada para los tres tipos de tecnologías de electrólisis y transporte como NH_3V. Los resultados de costos "específicos" totales (de capacidad instalada) de estas tecnologías con sus procesos asociados y su descomposición en valores desagregados se muestran la Tabla 2. A partir de la información obtenida, para el escenario medio tanto en 2030 como en 2040, las tecnologías ordenadas de menor a mayor costo resultan: AEL, PEM, SOEC.

Tabla 2: Costos totales y desagregados para escenarios medios 2030-2040 y diferentes procesos electrolíticos en USD/MWh NH_3V.

Proceso / Tecnología	AEL		PEM		SOEC	
Año	2030	2040	2030	2040	2030	2040
Generación Eléctrica	66,4	61,6	68,2	62,4	63,0	57,3
Electrólisis	23,0	18,3	31,0	24,6	106,6	57,7
Producción de NH_3V	66,8	60,8	64,0	58,4	61,5	56,2
Agua	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Electricidad/almacenamiento de H_2V	3,3	3,0	3,5	3,1	21,0	15,6
Transporte marítimo	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,2
Total	**164,9**	**149,2**	**172,0**	**153,9**	**257,6**	**192,2**

De este modo, la tecnología seleccionada para proseguir con las simulaciones, por ser la de menor costo, es AEL. Con esta tecnología y estos escenarios, se procede a determinar la provincia que exhiba el menor costo de entrega del NH_3V.

Costo total de exportación

Considerando los resultados de la subsección anterior, se llevó a cabo una nueva simulación y se encontró que las tres provincias que exhiben el menor costo total de exportación de NH_3V expresado ahora en USD/t NH_3V, son aquellas ubicadas en la región de la Patagonia Austral en el orden: Chubut, Santa Cruz y Río Negro, seguidas por la provincia de Jujuy situada en el Noroeste. El resto de las provincias se ubican alternativamente en distintas regiones del país, como se muestra en la Figura 3.

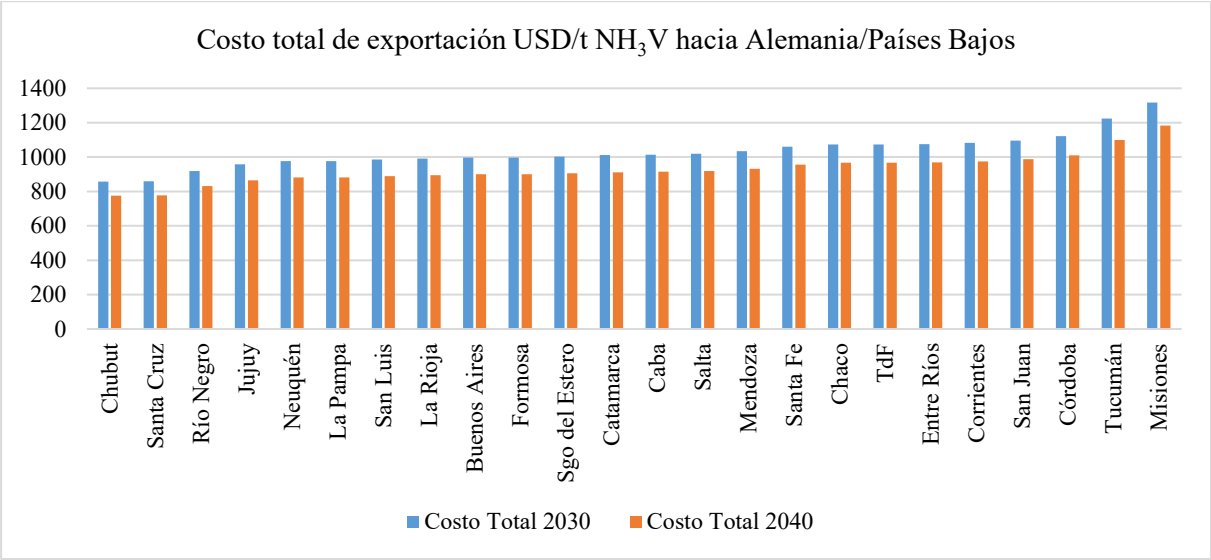


Figura 3: Orden de ubicación de las provincias argentinas respecto del costo total de exportación hacia Alemania/Países Bajos, en USD/t NH_3V.

Los valores encontrados para el costo total de exportación del NH_3V, exhibidos en la Tabla 2 y la Figura 3, están en concordancia con un estudio desarrollado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la de la Universidad Politécnica de Madrid y el organismo de investigación noruego SINTEF, quienes analizaron la competitividad económica del NH_3V como futuro vector energético sostenible con las tecnologías actuales (Sintef, 2023) y por (Carro de Lorenzo, 2022).

Horas equivalentes

Las horas equivalentes representan el número de horas que un sistema de generación de energía (ya sea solar, eólico u otros) tendría que operar a su potencia nominal para generar la misma cantidad de energía que efectivamente produce a lo largo de un año. De este modo, las horas equivalentes proporcionan una visión de la eficiencia operativa del sistema y permiten la comparación entre diferentes tecnologías o sitios de generación.

Horas equivalentes solares. Calcula cuántas horas de sol pleno (1 kW/m²) equivalen a la energía generada por un sistema solar durante un año. Dependen de la radiación solar y la potencia nominal de los paneles solares.

Horas equivalentes eólicas. Determina cuántas horas de viento a velocidad óptima serían necesarias para igualar la producción total de un parque eólico. Dependen de la velocidad del viento y la potencia nominal de las turbinas eólicas.

Horas equivalentes de un parque híbrido. Dado que la potencia nominal de un parque solar y la de un parque eólico son diferentes, así como sus patrones de generación, no se pueden sumar directamente las horas equivalentes de ambas tecnologías. En su lugar, se debe calcular la energía total generada por el parque híbrido (suma de la energía solar y eólica) y luego comparar esa cantidad con la potencia total instalada del parque híbrido para obtener una métrica global. Pero este valor no sería una simple suma de las horas equivalentes de las dos fuentes, sino más bien una métrica agregada de productividad.

El ordenamiento obtenido mostrado en la Figura 3 puede entenderse por la cantidad de horas equivalentes anuales para cada tipo de tecnología de generación de electricidad renovable como muestra la Figura 4.

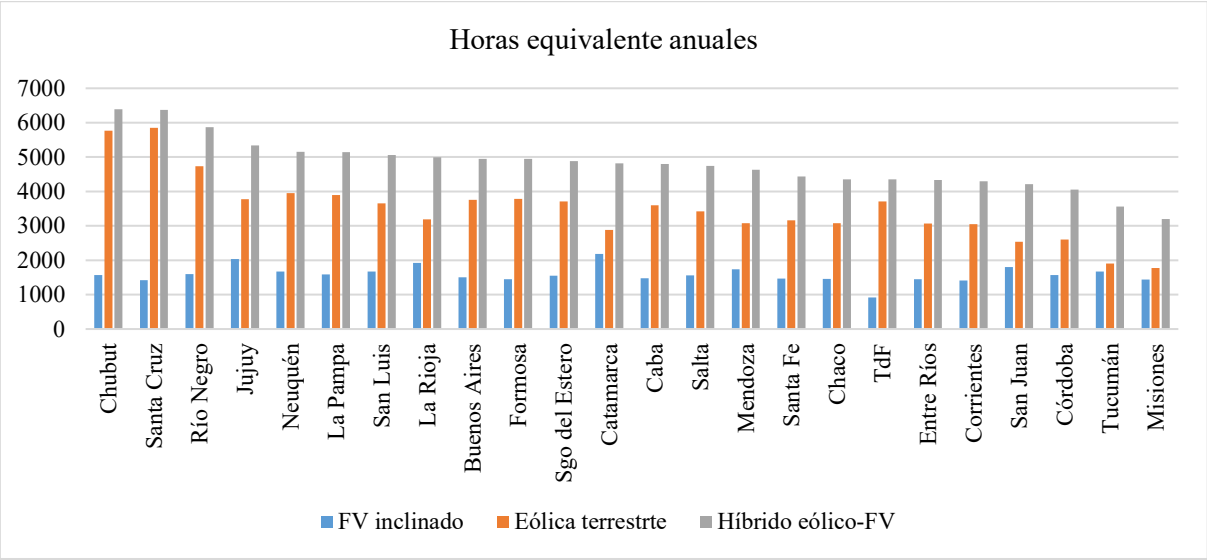


Figura 4: Horas equivalentes anuales para cada tipo de tecnología de generación de electricidad renovable.

Factores de capacidad

El factor de capacidad expresa cuán eficiente es una planta de ER, comparando las horas equivalentes con el total de horas disponibles en el año. Se obtiene como el cociente entre las horas equivalentes y el total de horas anuales (8760).

Las horas equivalentes anuales para cada tipo de tecnología de generación de electricidad renovable conducen a los factores de capacidad solar (FCs), eólico (FCe) e híbrido (FCh) que se muestran, para las cuatro provincias que exhiben el menor costo total de exportación de NH_3V, en la Tabla 3 y que siguen el orden inverso al mostrado en la Figura 3.

Tabla 3: Factores de capacidad solar (FCs), eólico (FCe) e híbrido (FCh) provincias que exhiben el menor costo total de exportación de NH_3V.

Provincia	Fcs	Fce	FCh
Chubut	17,9%	65,8%	72,9%
Santa Cruz	16,2%	66,8%	72,7%
Río Negro	18,2%	54,1%	67,0%
Jujuy	23,3%	43,1%	61,0%

Para la producción híbrida eólica-solar con ambas plantas instaladas en el mismo emplazamiento, la complementariedad de las curvas de carga de ambas tecnologías lleva a que el factor de capacidad híbrido (FCh) sea mayor que para las tecnologías individuales. Se determina así que la configuración que muestra el menor costo de entrega de NH_3V, mediante el proceso AEL, que a la vez muestra el mayor factor de capacidad para un sistema de generación eléctrica híbrido eólica-fotovoltaico es la provincia de Chubut. Los FC mostrados en la Tabla 3, están en concordancia con los valores obtenidos de la base de datos de la Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista (Cammesa) resumidos por Franco D. A. (Franco, 2020).

Potencial de producción de hidrógeno a partir de recursos renovables en Argentina

Con el objeto de validar los datos arrojados por el software *PtX BOA,* se contrastan los valores obtenidos para horas equivalentes y FC, con los resultados informados por Sigal et al. (2014), quienes realizaron un análisis detallado del potencial de producción de H_2V a partir de tres principales recursos renovables (eólico, solar y biomasa) en Argentina. Se encontró que el país podría producir casi 1.000 millones de toneladas métricas por año de H_2V. Este es el mismo potencial que el estimado para Estados Unidos, que tiene una superficie 3,5 veces mayor que Argentina. Los mapas con el potencial de producción de H_2V se muestran en la Figura 5.

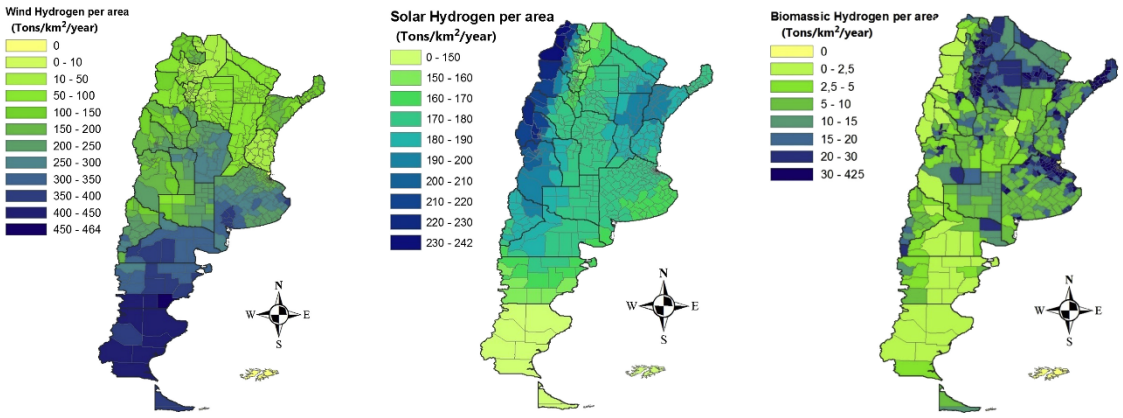


Figura 5: Mapas de potencial de producción de hidrógeno verde (eólico, solar y biomásico) en Argentina, estimado por departamento en unidades de [ton/km²/año].

La Figura 5 muestra que el país posee recursos renovables distribuidos geográficamente de forma estratégica: solar en el norte, eólico en el centro-sur y biomásico en el litoral. Esta distribución espacial de recursos renovables supone viable la producción complementaria de electricidad, mediante parques eólicos y solares dedicados, donde la producción híbrida es la que presenta la mayor cantidad de horas equivalentes anuales para la producción de electricidad y por tanto el FC más alto.

Costos desagregados en términos financieros en escenarios medios 2030-2040

Los costos operativos (OPEX), de capital (CAPEX) y secundarios (SEC) esenciales para la gestión y la toma de decisiones en el negocio de exportación de NH_3V (AEL) producido en Chubut y exportado al consorcio Alemania/Países Bajos, se muestran en forma desagregada junto con el porcentaje del costo total que implica cada uno en la Tabla 4 y en la Figura 6 en unidades USD/t NH_3V.

Tabla 4: Costos desagregados en términos financieros para la producción de NH_3V en USD/t NH_3V.

Costos desagregados USD/t NH_3V	Chubut								
	2030				2040				Dif. % Sub totales
Pasos de proceso	Subtotal	OPEX	CAPEX	SEC	Subtotal	OPEX	CAPEX	SEC	
Generación Eléctrica % del total	**345,3** 40,3%	38,4	307,0	0,0	**320,5** 41,3%	35,6	284,9	0,0	**-7,2**
Electrólisis % del total	**119,5** 13,9%	13,3	106,2	0,0	**95,1** 12,3%	10,6	84,6	0,0	**-20,4**
Producción de NH_3V (AEL) % del total	**347,4** 40,5%	69,5	212,2	65,6	**316,3** 40,8%	61,8	188,7	65,8	**-8,9**
Agua desalinizada % del total	**1,4** 0,2%	0,2	0,8	0,4	**1,4** 0,2%	0,2	0,8	0,4	**0,0**
Electricidad y almacenamiento H_2 % del total	**17,3** 2,0%	17,3	0,0	0,0	**15,6** 2,0%	15,6	0,0	0,0	**-9,9**
Transporte marítimo % del total	**26,6** 3,1%	25,5	0,0	1,1	**26,7** 3,4%	25,6	0,0	1,1	**0,3**
Total	**857,5**				**775,6**				**-9,6**

Estos resultados muestran que las mayores incidencias porcentuales de los costos parciales (CAPEX+OPEX+SEC, para cada paso de proceso) se presentan en el orden: 1. Producción de NH_3V (AEL), 2. Generación Eléctrica, 3. Electrólisis, 4. Transporte marítimo, 5. Electricidad y almacenamiento de H_2V, 6. Agua desalinizada. Este orden establecido en los resultados de la simulación con el software, se argumentan con la descripción de los pasos para la producción de NH_3V que se discuten en la siguiente subsección. La última columna de la Tabla 4 muestra la diferencia porcentual

de los costos parciales en 2030 y 2040, de los cuales son todos negativos salvo el transporte marítimo que aumenta levemente y el costo del agua, que se mantiene.

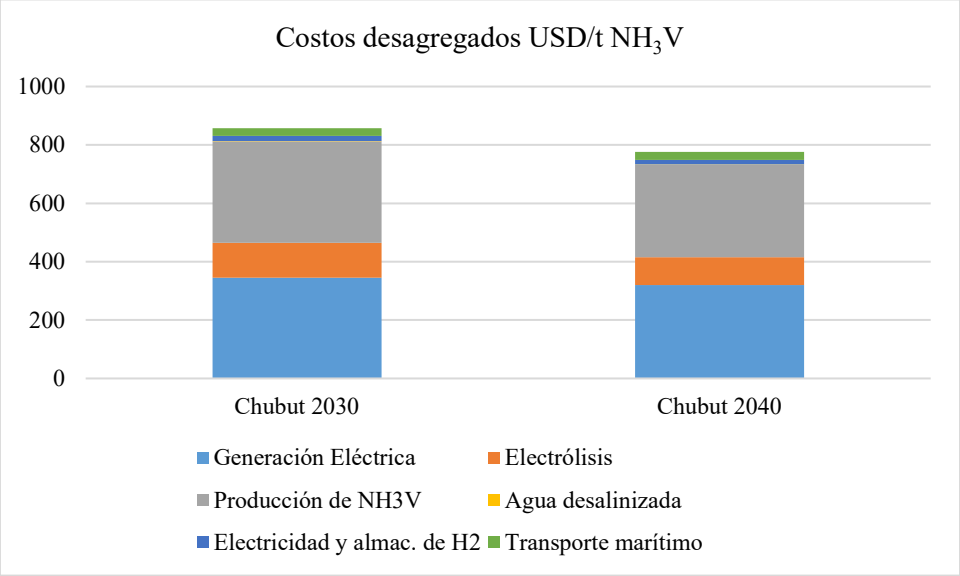


Figura 6: Costos desagregados en términos financieros para la producción de NH_3V en USD/t NH_3V.

Producción de NH_3V

Los pasos necesarios para esta producción se resumen en: 1. *Generación eléctrica:* los principales factores que impactan el LCOE son la inversión inicial, los recursos naturales disponibles, los costos operativos, el FC, los costos de financiamiento, las políticas y regulaciones, la conectividad a la red, el almacenamiento de energía, y la economía de escala. 2. *Electrólisis:* la producción de H_2V consume una cantidad importante de electricidad (50 – 55 kWh/kg H2V). No obstante, la masa de H_2V representa sólo el 17,6% de la masa molecular del NH_3V. 3. *Producción de NH_3V:* obtenido el H_2V se necesita el proceso Haber-Bosch para combinarlo con N_2. Los gases se combinan en un reactor a altas presiones (150-300 atm) y altas temperaturas (400-500 °C) en presencia de un catalizador (generalmente de hierro) para producir *NH_3V*. La energía necesaria para mantener estas condiciones se suministra utilizando la misma electricidad renovable, asegurando que el proceso sea sostenible y con bajas emisiones. 4. *Almacenamiento y transporte marítimo de NH_3V*: el producto debe almacenarse en condiciones controladas para luego transportarse. Esto requiere infraestructuras especializadas y energía adicional para mantener la temperatura y presión adecuadas. Los costos de transporte marítimo varían según la distancia y la infraestructura disponible. *Electricidad y almacenamiento de H_2V*: antes de usar este vector energético en la síntesis de *NH_3V*, puede requerir almacenamiento, lo cual implica costos adicionales. Los sistemas de almacenamiento, como tanques criogénicos o de alta presión, y la electricidad para mantenerlos operativos son factores importantes, pero generalmente menos costosos en comparación con la electrólisis y la generación eléctrica en sí misma. *Agua desalinizada*: como fue demostrado por Hausmann et al. (2021) los requerimientos de energía, los costos de capital y los costos operativos de la desalinización de agua de mar son marginales comparados con los de la electrólisis del agua.

Comparación entre países de referencia de Sudamérica

Para tomar una referencia respecto de la competitividad de Argentina en el contexto de los países de la región Sudamericana, se comparan el potencial técnico de Energías Renovables (ER) en términos de TWh/año, la distancia de envío mediante transporte marítimo en km y el costo total de envío en USD/MWh. Para esta comparación se toman los valores promedio de los distintos países y no una provincia en particular. El orden resultante se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Comparación entre países de referencia de Sudamérica.

País Productor	Costo Total USD/t NH_3V	Dif. Costos %	Distancia de envío [km]	Dif. Distancias %	Potencial Técnico de ER TWh/año
Argentina	915,3	0,0	13751	0,0	28246
Perú	789,3	13,8	11445	16,8	29292
Uruguay	772,8	15,6	12234	11,0	378*
Chile	772,2	15,6	12213	11,2	15833
Brasil	620,8	32,2	10110	26,5	86870
Colombia	579,2	36,7	8362	39,2	3983

*Dato calculado por Oeko-Institut a partir de (Moritz et al., 2021).

Argentina resulta ser el país con costo más elevado y Colombia el de menor. Tomando Argentina como referencia, la segunda columna exhibe la diferencia porcentual entre costos. La tercera y cuarta columnas siguen esta misma lógica de orden. Dado que el orden decreciente de costos y distancias se conserva, es posible establecer una correlación entre estas variables y, a su vez, ambas son independientes de los valores de potencial técnico mostrados en la quinta columna.

Costo de Capital

Coutsiers et al., (2022), estimaron el costo promedio ponderado de capital (WACC, por sus siglas en inglés) en términos nominales y después de impuestos para utilizar en proyectos de ER en Sudamérica. El WACC es un indicador fundamental en la evaluación financiera de proyectos, ya que permite determinar la rentabilidad mínima que un proyecto o inversión debe alcanzar para ser considerado viable. Observaron una dispersión entre los distintos países de la región y concluyeron que, al ser la generación de ER intensiva en capital, países con mayor tasa tendrán una condición más exigente por parte de los potenciales inversores. Los valores WACC utilizados en el *software PtX BOA* se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Costo promedio ponderado de capital para el sector de las energías renovables en Sudamérica.

País productor	WACC
Argentina	15,0%
Brasil	8,3%
Uruguay	7,7%
Colombia	7,1%
Perú	6,4%
Chile	5,6%

Chile y Perú resultan los países con menor tasa WACC y Argentina en el otro extremo, se encuentra fuertemente impactada por la tasa de riesgo país, que implica una condición muy exigente para las inversiones intensivas en capital como los proyectos de energías renovables. Las mejores condiciones las presentan Chile y Perú teniendo luego condiciones intermedias, Brasil, Uruguay y Colombia, considerando que la WACC es proporcional al costo nivelado de producción de NH_3V y cualquier otro derivado del H_2V.

DISCUSIÓN y CONCLUSIONES

Se desarrolló en este trabajo un análisis de la composición de costos nivelados de entrega de amoníaco verde NH_3V, comparado entre las 23 provincias de Argentina y CABA, para su exportación hacia Alemania/Países Bajos. Los resultados de la simulación se sensibilizaron por tipo y tecnología de

electrolizador y provincia de implementación. Se consideraron valores determinados como electricidad renovable proveniente de sistemas híbridos eólica-fotovoltaico, escenarios temporales medios para la reducción de costos, transporte marítimo y agua desalinizada. Si bien el análisis ofrece información de nivel de prefactibilidad, resulta útil para abrir una discusión sobre el abordaje de variables críticas que surgen del análisis. El resultado encontrado indica que las provincias de la Patagonia Austral en el orden Chubut, Santa Cruz, Río Negro y posteriormente Jujuy en el norte del país, presentan el menor costo nivelado de NH_3V transportado marítimamente hasta destino en USD/t NH_3V, debido a la excelente calidad del recurso eólico y solar. La comparación de costos entre países de referencia de Sudamérica mostró una dispersión de valores. Las mejores condiciones las presentan Chile y Perú teniendo luego condiciones intermedias para Brasil, Uruguay y Colombia y en el otro extremo se encuentra Argentina, cuyos valores se encuentran fuertemente impactados en el WACC por el valor del riesgo país.

En este escenario comparativo desfavorable para el país, el Gobierno Nacional reacciona con una estrategia y reglamenta el Régimen de Incentivo para Grandes Inversiones (RIGI). A través del Decreto 749/2024 apunta a promover y atraer inversiones que superen un umbral mínimo, con proyectos de larga maduración que generen empleo y fomenten la actividad productiva del país. En este sentido, el RIGI fomentará proyectos donde los ingresos, durante los primeros 3 años, no superen el 30% de la inversión total. Se trata de inversiones superiores a los 200 MM USD, por lo que el capital, aunque no excluyente para la industria nacional, provendrá mayormente de inversores extranjeros. Se proyecta que el RIGI triplicará el nivel de exportaciones en una década a través de una serie de beneficios impositivos, aduaneros, y cambiarios, de forma de poder competir con los regímenes que existen en la región y en el mundo. Algunos de los sectores alcanzados por el RIGI son foresto industria, turismo, infraestructura, minería, tecnología, siderurgia, energía, petróleo y gas. Estos sectores tendrán un plazo de dos años para adherirse a partir de la entrada en vigor del Régimen. Para calificar como “Gran Inversión” deberá ocurrir que: la inversión en activos computables sea igual o superior a 200 MM USD; que el monto se complete antes de la fecha límite comprometida en el plan de inversión; prever para el primer y segundo año una inversión mínima en activos computables igual o superior al monto que fijará oportunamente la Autoridad de Aplicación; y como condición de permanencia en el RIGI, prever el cumplimiento de al menos el 40 % del monto mínimo de inversión dentro de los dos primeros años desde la aprobación de la solicitud de adhesión. El RIGI representa una gran oportunidad para impulsar el desarrollo de territorios que actualmente no tienen servicios de ningún tipo, e impulsar la aparición de pymes proveedoras de bienes y servicios en distintos sectores económicos. A través del RIGI, el Gobierno propone un régimen diferencial distinto al que existe actualmente. En esta línea, apunta a que el régimen general impositivo argentino tienda a lo que propone el RIGI, dando impulso a la economía, a las inversiones, al empleo, y a aprovechar la ventana de oportunidad que se abre para la economía del país.

En trabajos futuros se estudiará el análisis de la composición de costos nivelados de entrega de otras moléculas verdes sintetizadas mediante PtX, considerando diferentes variables, tales como la celebración de acuerdos PPA (Power Purchase Agreement) de compraventa de energía limpia a largo plazo entre un desarrollador renovable y un consumidor, para la sensibilización de los costos y las oportunidades de negocio en la región. Con estos análisis se pretende contribuir a la sinergia de acciones para la colocación del país en un contexto de aceleración de su desarrollo económico, mediante asociaciones estratégicas con empresas que desarrollan tecnologías de H_2V y derivados RFNBO mediante técnicas PtX.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Secretaria de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba – SECyT_UNC. Proyecto consolidar 2023 Nº 33620230100934CB. “Simulación de sistemas híbridos de ERNC y cálculo del costo nivelado de exportación de moléculas PtX, desde países exportadores a países importadores”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECyT_UNC por el financiamiento y a Calden Consultoría SRL por el aporte de datos y las discusiones ofrecidas sobre este trabajo.

REFERENCIAS

BMWK, (2024). Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Dirección URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZmI89iSsNUnrhQrIh8BxzADy9roBkPK1/view> [consulta: 9 de agosto de 2024]

Carro de Lorenzo, F. (2022). El amoniaco como vector energético para transporte y almacenamiento de hidrógeno. Tresca Engineering Solutions, Instituto de la Ingeniería de España. Dirección URL: <https://tresca.es/wp-content/uploads/2022/03/20220223-Presentacion-Amoniaco-Verde-TRESCA.pdf> [consulta: 22 de febrero de 2024]

Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2023). Estimación de la tasa de costo de capital para proyectos de energía renovable en Latinoamérica. Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA, 26, 369–379. Dirección URL: <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/3852> [consulta: 11 de agosto de 2024]

Franco D. A. (2020). El resumen más completo con los factores de carga y generación de las energías renovables en Argentina. Energía Estratégica. Dirección URL: <https://www.energiaestrategica.com/el-resumen-mas-completo-con-los-factores-de-carga-y-generacion-de-las-energias-renovables-en-argentina/> [consulta: 6 de octubre de 2024]

H2Global, (2023). Shaping the global energy transition. Dirección URL: <https://www.h2-global.org/> [consulta: 9 de agosto de 2024]

IEA, (2023). "Renewable Electricity Capacity and Generation Statistics" – processed by Our World in Data. Dirección URL: <https://ourworldindata.org/grapher/installed-global-renewable-energy-capacity-by-technology> [consulta: 9 de agosto de 2024]

IEA, IRENA, UNSD, World Bank, WHO, (2024). Tracking SDG 7: The Energy Progress Report. World Bank, Washington DC. © World Bank. License: Creative Commons Attribution—NonCommercial 3.0 IGO (CC BY-NC 3.0 IGO)

IRENA y AEA (2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn.

Lazouski N., Limaye A., Bose A., Gala M.L., Manthiram K., and Mallapragada D.S., (2022). Cost and Performance Targets for Fully Electrochemical Ammonia Production under Flexible Operation. ACS Energy Letters 2022 7 (8), 2627-2633. DOI: 10.1021/acsenergylett.2c01197

Leiva E.P.M., Rodríguez C.R. Matriz de Recursos Energéticos de la Provincia de Córdoba. 1ª edición. pp. 131-148. Editorial Copiar.

Maersk, (2021). Maersk backs plan to build Europe's largest green ammonia facility. Dirección URL: <https://www.maersk.com/news/articles/2021/02/23/maersk-backs-plan-to-build-europe-largest-green-ammonia-facility> [consulta: 9 de agosto de 2024]

Michael Moritz, Max Schönfisch, Dr. Simon Schulte (2021). Globales PtX-Produktions- und Importkostentool. Dirección URL: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/globales-ptx-produktions-und-importkostentool/> [consulta: 3 de octubre de 2024]

Naciones Unidas, (2022). Perspectivas de población mundial 2022. Dirección URL: <https://www.un.org/es/global-issues/population> [consulta: 9 de agosto de 2024]

Nationale Wasserstoffstrategie, (2024). Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Herausgeber Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Öffentlichkeitsarbeit 11019 Berlin. Dirección URL: www.bmwk.de. Recuperado de < https://drive.google.com/file/d/1ZmI89iSsNUnrhQrIh8BxzADy9roBkPK1/view> [consulta: 30 de setiembre de 2024]

Nayak-Luke, R. M., Cesaro, Z., y Bañares-Alcántara, R. (2021). Pathways for Green Ammonia. Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector, Elsevier, pp. 27-39. doi: 10.1016/b978-0-12- 820560-0.00003-5.

Oeko-Institut, Agora Energiewende & Agora Industry (2023): PTX Business Opportunity Analyser. PTX Business Opportunity Analyser. Version 1.0.9 <https://www.agora-energiewende.org/data-tools/ptx-business-opportunity-analyser-1>

PtX-Hub, (2023). La cadena de valor del Power-to-X. Dirección URL: <https://h2lac.org/noticias/la-cadena-de-valor-del-power-to-x/> [consulta: 9 de agosto de 2024]

Remler S., (2022). Preparando el camino para soluciones de Power-to-X renovable – El potencial de Argentina en la descarbonización. Dirección URL: <https://ptx-hub.org/es/preparando-el-camino/> [consulta: 9 de agosto de 2024]
Sigal A., Leiva E.P.M., (2015). Abriendo los cuellos de botella de la economía del hidrógeno: estudios de almacenamiento y factibilidad. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Dirección URL: <https://biblioteca.mincyt.gob.ar/catalogo/90155> [consulta: 9 de agosto de 2024]
Sigal A., Leiva E.P.M., Rodríguez C.R. (2014). Assessment of the potential for hydrogen production from renewable resources in Argentina. International Journal of Hydrogen Energy. Volume 39, Issue 16, 27 May 2014, Pages 8204-8214. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.157
Sintef, (2023). La producción de amoníaco verde solo sería competitiva con un recurso renovable abundante y a bajo coste. Dirección URL: < https://sostenibilidad.ituser.es/actualidad/2023/12/la-produccion-de-amoniaco-verde-solo-seria-competitiva-con-un-recurso-renovable-abundante-y-a-bajo-coste> [consulta: 6 de octubre de 2024]

OPPORTUNITY COST OF EXPORTING GREEN AMMONIA FROM ARGENTINA TO GERMANY/NETHERLANDS

ABSTRACT: This paper analyses the levelized costs of production and delivery of green ammonia in 23 Argentine provinces, including the Federal Capital, for export to Germany and the Netherlands. It uses the PtX Business Opportunity Analyzer software to assess the total costs of hydrogen and its derivatives.
Argentina has renewable resources geographically distributed: solar in the north, wind in the centre-south and biomass on the coast. This spatial distribution of renewable resources makes complementary electricity production viable, through dedicated wind and solar farms, where hybrid production is the one that presents the greatest number of annual equivalent hours for electricity production and therefore the highest capacity factor.
The provinces with the lowest levelized cost of green ammonia transported by sea are, in order: Chubut, Santa Cruz, Río Negro (Southern Patagonia) and Jujuy (Northwest), due to the quality of their wind and solar resources.
The study projects costs for 2030 and 2040, considering a scenario of medium reduction in the costs of transformation technologies for synthetic fuels. This analysis provides a comprehensive view of the opportunities and challenges in the production of green ammonia in Argentina, considering geographical, technological and economic factors for its potential export.

Keywords: PtX, RFNBO, Green Ammonia, Synthetic Fuels

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 476-488, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

VIABILIDAD TECNO-ECONÓMICA Y ANÁLISIS DE EMISIONES DEL USO DE E-KEROSENE EN ITALIA EN EL SECTOR AERONÁUTICO

Isabella Tamayo[1], Ramiro Rodriguez[2]
[1]Aeronautical Consulting and Solutions SRL - Via Masaccio 87/89 (50132), Florencia, Italia.
www.aeronauticalcs.com +39 3510583390 isabellatmejia04@gmail.com
[2]Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Av. Vélez Sarsfield 299, CP (5000), www.fcefyn.unc.edu.ar +54 351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar
[3]Calden Consultoría SRL – Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba
www.caldenconsultoria.com +54 351 7000717, rrodriguez@calcenconsultoria.com

RESUMEN

Este trabajo presenta el análisis de viabilidad técno-económica y de emisiones de la producción de e-kerosene (SAF) mediante la síntesis química de Fischer-Tropsch para su uso en el sector transporte aéreo italiano. La viabilidad técnica se analiza usando como materia prima sostenible hidrógeno verde y dióxido de carbono (CO_2) capturado. La valoración económica analiza el Costo Nivelado de SAF y su producción en la Unión Europea (UE) y el análisis de emisiones analiza la reducción de estas al usar SAF en reemplazo de combustibles fósiles. Proyectos en marcha en 9 países de la UE demuestran la viabilidad técnica. El costo medio del SAF disminuirá con una tendencia cuadrática desde el año 2020 hasta el 2050, por lo que en el futuro podrá competir en el mercado si se consideran incentivos fiscales y externalidades, como las emisiones de CO_2, en el costo del kerosene fósil. El análisis ambiental muestra que las emisiones de CO_2 del e-kerosene, igualan al CO_2 capturado, neutralizando las emisiones netas globales.

Palabras clave: Captura de carbono, hidrógeno verde, combustibles sintéticos, e-kerosene, síntesis química de Fischer-Tropsch, syngas.

INTRODUCCIÓN

Se estima que las actividades humanas, en especial la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía, han contribuido al incremento de aproximadamente 1°C al calentamiento global, por encima de los niveles preindustriales. La temperatura media global podría aumentar en 1,5°C entre 2030 y 2050 si continúa el ritmo de crecimiento actual. Esto implicaría una serie de riesgos ambientales que podrían poner en peligro los ecosistemas del planeta. Para tratar de mitigar el efecto climático, que se acelera con las emisiones de GEI a la atmósfera, se han pactado importantes acuerdos internacionales como el de París firmado en la COP21 en el año 2015 donde se estableció el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C y preferiblemente a 1,5°C (IPCC, 2022).
La producción de electricidad y calor son los mayores contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) globales, seguidos por el sector transporte y la industria (Ritchie et al., 2020a). Se estima que el sector transporte es responsable de aproximadamente el 25% del total de las emisiones de CO_2 antropogénico a nivel mundial, por lo que su descarbonización se convierte en un punto de acción clave para lograr los objetivos ambientales (Agudelo, 2023). Dentro de la Unión Europea (UE), el sector del transporte representó el 28,5% de las emisiones totales de GEI en el año 2022, donde los mayores contribuyentes dentro del sector fueron el transporte por carretera, la navegación y el transporte aéreo. Aunque la aviación representa apenas el 4% de las emisiones totales de GEI en la UE, ha sido la fuente con mayor velocidad de crecimiento. En 2019, las emisiones de la aviación internacional aumentaron un 146% en comparación con los niveles de 1990 y se prevé que sigan en aumento (Parlamento Europeo, 2022a). Para enfrentar esta problemática se han venido estudiando alternativas para

reemplazar los combustibles fósiles en el sector del transporte aéreo. Una de éstas es el kerosene sintético de fuentes renovables que podría impulsar la transición energética hacia vuelos con balance nulo en las emisiones de carbono. Al utilizar energía renovable y CO_2 de la atmósfera se produce un gas de síntesis (syngas) y a partir de éste se pueden fabricar combustibles sintéticos que pueden usarse directamente en los motores aéreos actuales. El proceso de producción consiste en la captura de CO_2 de la atmósfera para luego desdoblarse en CO y O_2 utilizando energía proveniente de fuentes renovables. El syngas se mezcla con hidrógeno y finalmente se convierte en hidrocarburo líquido a través de la síntesis química de Fischer-Tropsch (FT). El CO_2 que se requiere como materia prima para producir combustibles sintéticos puede encontrarse en los gases que emite la combustión de combustibles fósiles o en procesos biogénicos. Dichos gases están directamente relacionados con el calentamiento global ya que incrementan el efecto invernadero al absorber radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético. La remoción de estos gases de la atmósfera a través de la captura y almacenamiento de carbono y su utilización (CCSU) contribuiría a la mitigación de emisiones de GEI y por ende a limitar el calentamiento global (Agudelo, 2023).

El segundo componente necesario para la fabricación de combustibles sintéticos es el hidrógeno. Este vector energético puede clasificarse por colores según su método de obtención y la fuente de energía primaria utilizada en su producción. El hidrógeno marrón, gris y negro es producido con combustibles fósiles mediante métodos contaminantes que generan altas emisiones de GEI (por ejemplo, la producción de 1 kg de hidrógeno gris lleva asociada la emisión de 11 kg de CO_2). Por el contrario, el hidrógeno verde (H2V) que se produce mediante electrólisis de agua con electricidad proveniente de energías renovables (ER), conlleva bajas emisiones de carbono (Syirat et al., 2024).
Con la captura de CO_2 y la producción de H2V se garantiza un procedimiento de síntesis de combustibles limpio y con bajas emisiones de GEI que contribuye a la desfosilización de los sectores que utilizan combustibles fósiles. La producción de los combustibles sintéticos aún presenta desafíos técnico-económicos que limitan su comercialización (Nemmour et al., 2023). Durante el periodo 2018-2022 se llevó a cabo el proyecto "Kerogreen" donde participaron 4 países de la UE (Bélgica, Alemania, Noruega y los Países Bajos) financiados con fondos de la Comisión Europea para investigar sobre la producción de e-kerosene a partir de agua y aire usando electricidad renovable, mediante el desdoble de CO_2 y la formación de syngas a través de la síntesis de FT. El objetivo fue desarrollar y probar una ruta de conversión innovadora para la producción segura y rentable de e-kerosene para su uso en la aeronáutica. Una ventaja importante del e-kerosene como combustible para el transporte aéreo, es que el sector puede mantener la infraestructura y los motores existentes. Además, el e-kerosene no emite azufre y minimiza las emisiones totales cumpliendo con los estándares de contaminación cada vez más estrictos. El proyecto fue exitoso a escala de laboratorio y los elementos del sistema diseñado lograron integrarse en un contenedor (Goede, 2022; Goede et al., 2022).

El e-kerosene muestra una capacidad de adaptación prometedora a los estrictos requisitos de la industria de la aviación, ya que está diseñado para coincidir químicamente con el combustible convencional para aviones, lo que permite su uso en motores de aeronaves y sistemas de combustible existentes sin modificaciones. Esta compatibilidad lo convierte en una opción práctica para la transición hacia una aviación sostenible sin necesidad de grandes cambios de infraestructura. El concepto de vías de conversión de energía en líquido (PtL), donde se utiliza energía renovable para convertir materias primas renovables en combustibles electrónicos, ha sido recientemente investigado por Ozkan et al. (2024), donde indican que el e-kerosene se puede producir utilizando fuentes de ER, lo que lo hace escalable y factible para satisfacer las demandas de combustible del sector de la aviación de manera neutral en carbono.

Por otra parte, desarrollos actuales en la UE, como la iniciativa ReFuelEU Aviation (ReFuelEU, 2024), que promueve un mayor uso de combustibles de aviación sostenibles (SAF) como la herramienta más poderosa para reducir las emisiones de CO_2 de la aviación, exigen la mezcla de e-kerosene en combustible para aviones, aumentando gradualmente su proporción para apoyar los esfuerzos de descarbonización. Los proyectos en toda Europa están aumentando la producción y, aunque algunos permanecen en la fase de estudio de viabilidad, se prevé un despliegue a gran escala en los próximos años. Sin embargo, el costo de producir e-kerosene sigue siendo alto en comparación con los combustibles convencionales. Superar estas barreras económicas requerirá innovación, subsidios y

colaboración internacional en estándares e incentivos para escalar la producción de manera eficiente. Con las políticas y los avances tecnológicos adecuados, el queroseno electrónico puede satisfacer las necesidades de la industria de la aviación y, al mismo tiempo, reducir significativamente su huella de carbono. Por consiguiente, profundizar y continuar con estos estudios es de gran importancia. En este trabajo se realiza un análisis de viabilidad tecno- económica y de emisiones sobre la producción de e-kerosene usando la captura de carbono e H2V para su uso en el sector del transporte aéreo en Italia.

METODOLOGÍA

La evaluación de viabilidades tecno-económica y de emisiones conduce a la elección de variables a investigar vinculadas a estos tres conceptos. En este sentido, la descripción de la síntesis química de FT se vincula a la viabilidad técnica, el análisis de los costos del proceso y su rentabilidad justificará (o no) la viabilidad económica y se contempla la comparación de emisiones con otros tipos de combustibles fósiles con aplicaciones similares. Para la consecución de estos objetivos se analizan resultados de la bibliografía más reciente referida a esta temática. Entonces, las variables para investigar son: la síntesis química de FT, la reducción de emisiones de CO_2, los costos del proceso y los beneficios ambientales y sociales, que se resumen en la siguiente lista:

- *Descripción de los procesos de*:
  - emisiones, captura, almacenamiento y uso de CO_2 (CCSU)
  - la síntesis química de FT para convertir la mezcla H2V/CO_2 en e-kerosene.
- *Análisis y discusión de*:
  - la potencialidad de las energías renovables en Italia.
  - el mecanismo de producción de H2V en Italia.
  - la reducción de emisiones de GEI.
  - los costos nivelados de producción vinculados al e-kerosene.
  - el alcance de los últimos acuerdos ambientales globales.

DESARROLLO

1. Análisis técnico

Se lleva a cabo el análisis técnico de la producción de e-kerosene a través de la síntesis química de FT. Para esto se partirá de la descripción de la obtención del H2V:

1.1 Electrólisis de agua

Para finales del año 2022, los electrolizadores alcalinos representaron el 60% de la capacidad instalada, seguida por los PEM con el 30% y los SOEC alcanzaron menos del 1% (IEA, 2022). Si bien la tecnología alcalina resultó ser la más económica y eficiente, se espera que para 2030 haya un crecimiento importante de capacidad instalada de PEM y SOEC (IEA, 2022). La reacción química general que describe el proceso de obtención de H_2 a partir de agua y energía viene dada por la ecuación (1):

$$\text{energía} + \mathrm{H_2O(l)} \rightarrow \mathrm{H_2(g)} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2(g)} \qquad (1)$$

La energía libre de formación para esta reacción endotérmica viene dada por la ecuación (2):

$$\Delta G = -nFE^0 \qquad (2)$$

donde:

$n = 2$; es el número de electrones transferidos por mol en la ecuación (1)
$F = 96500\ C/mol$; constante de Faraday
E^0: Potencial estándar de electrodo (voltios)

Esta energía libre de formación de la ecuación (2) es fuertemente dependiente de la temperatura, así en condiciones estándar $(P = 1\ bar, T = 298K), \Delta G = 273{,}75\ kJ/mol$, mientras que llevando las condiciones a $(P = 1\ bar, T = 1273K), \Delta G = 177{,}66\ kJ/mol$, es decir un 25,3% más eficiente. Por

este motivo, la electrólisis alcalina se lleva a cabo a presiones y a temperaturas mayores que la estándar (Sánchez Delgado, 2019).
El alto costo energético requerido para la electrólisis conduce a plantear diversos caminos para su consecución:

1. Uso de energía renovable no despachada
2. Construcción de un parque eólico o solar dedicado para la electrólisis
3. Contratos de adquisición de energía renovable adquirida mediante Power Purchase Agreement (PPA), que certifica el origen renovable de la energía para la producción de H2V

Considerando la estequiometría de la reacción de la ecuación (1), para la producción de 1 kg de H_2 y 8 kg de O_2 se requieren teóricamente 9 litros de agua y 1,23 V en condiciones estándar.

1.2 Captura de carbono por sistemas de pre-combustión

La captura de CO_2 puede llevarse a cabo de manera directa extrayéndolo del aire o de manera indirecta cuando se evita su liberación a la atmósfera. Su posterior utilización para producir combustibles sintéticos como el e-kerosene conlleva una reducción de la concentración de dicho gas en la atmósfera. La Figura 1 ilustra el ciclo de producción y uso de los combustibles sintéticos verdes de manera esquemática.
Es importante destacar que el CO_2 con el que se sintetizan los combustibles sintéticos verdes se libera a la atmósfera nuevamente luego de la combustión, por esta razón se los clasifica como neutros en carbono.

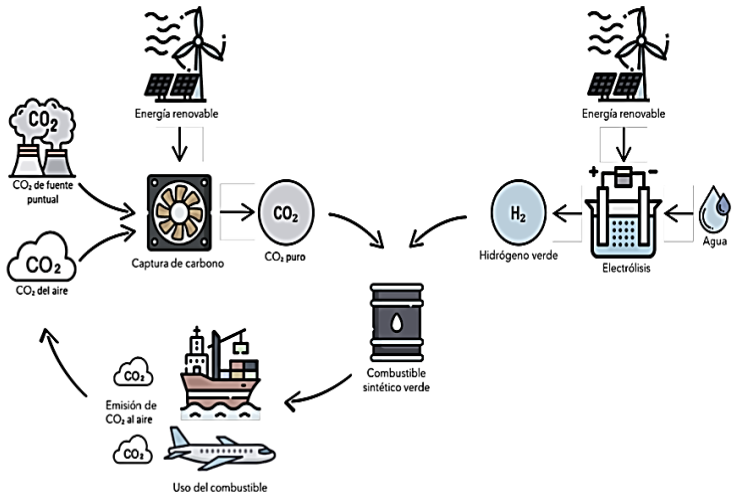


Figura 1: Ciclo de producción y uso de los combustibles sintéticos verdes.
Fuente. Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile (p.8), por INODÚ, 2021, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Actualmente existen sistemas con tasas de captura del orden de 90% lo que puede implicar costos considerablemente altos. Hay tres tipos de fuentes desde las que se puede capturar CO_2:

1. *Fuentes Puntuales (FP):* generan emisiones estacionarias y puntuales por un proceso industrial.
2. *Fuentes biogénicas (BtL):* son emisiones de CO_2 que dependen del ciclo natural del carbono, como las resultantes de la combustión, cosecha, fermentación, descomposición o procesamiento de materiales biológicos.
3. *Aire atmosférico (DAC):* captura de CO_2 directamente de la atmósfera (DAC, por sus siglas en inglés).

Para que un combustible sintético pueda considerarse sustentable se debe asegurar la renovabilidad de los insumos y de las fuentes de energía utilizadas para su fabricación y debe tener el potencial de generar emisiones netas cero o incluso ser negativo en carbono, especialmente si se captura y almacena más CO_2 del que se emite. La tecnología de captura más adecuada para una aplicación específica depende de la concentración inicial y final deseada, la presión y la temperatura de funcionamiento, la composición y costos, entre otros (Fasihi et al., 2019; INODÚ, 2021). El sistema de pre-combustión suele usarse para la producción de syngas (Peres et al., 2022) por lo que en este trabajo se enfatiza esta

técnica, priorizando la captura de CO_2 directamente de fuentes puntuales por su menor coste respecto a las otras tecnologías (Christensen y Petrenko, 2017; Terwel y Kerkhoven, 2018).

Existen 4 tipos principales de tecnologías pre-combustión (Peres et al., 2022):

1. *Adsorción:* esta tecnología se basa en la transferencia de masa de las moléculas de CO_2 a una superficie sólida (adsorbente) a altas temperaturas y presión atmosférica. Es una tecnología simple y económica pero no logra capturar grandes cantidades de masa.
2. *Absorción:* se usa un solvente químico que solubiliza el CO_2 y forma una nueva solución. Es un proceso que presenta bajo costo, pero conlleva procesos considerablemente tóxicos y corrosivos. Dos proyectos americanos que usan esta tecnología reportan que la demanda energética es de 0,25 a 0,30 MWh por tonelada capturada de CO_2.
3. *Membranas:* se utilizan membranas permeables porosas para separar el CO_2. Es un proceso sencillo, eficiente, escalable y más amigable con el medio ambiente si se lo compara con la absorción y la adsorción, pero no es suficientemente específico para CO_2 y no tiene larga vida útil.
4. *Bucle químico:* implica procesos químicos de combustión indirecta de combustibles fósiles o renovables, dividiendo el procedimiento en dos pasos.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de captura registran una tasa de captura del 85 al 90% en el mejor de los casos. Las principales combinaciones electrólisis/fuente de carbón utilizadas para la CCS para la producción de e-combustibles son: AEL/DAC; PEM/DAC; SOEC/DAC - AEL/ BtL; PEM/ BtL; SOEC/ BtL - AEL/FP; PEM/ FP; SOEC/ FP.

1.3 Kerosene Verde (e-kerosene)

El kerosene de aviación es un hidrocarburo con una cadenade carbono de C8 a C16. Suele estar formado por grupo de parafinas, naftenos o cicloparafinas y aromáticos, estando presentes las olefinas en pequeñas cantidades (Blakey et al, 2011). La Figura 2 muestra un esquema de la producción del e-kerosene. El valor estándar de emisiones de CO_2 para el kerosene, según el informe de emisiones de CO_2 del tráfico aéreo de la Confederación Suiza (s.f), determina que 1 kg de kerosene fósil produce 3,16 kg de CO_2.

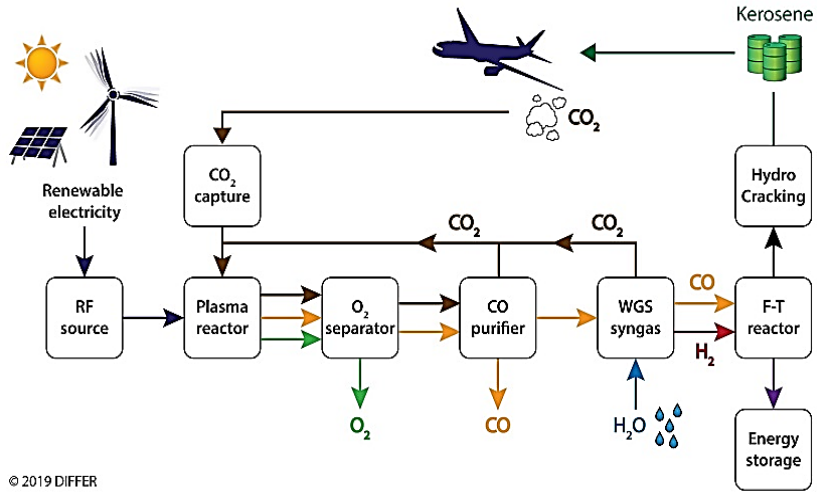


Figura 2: Esquema de la producción del e-kerosene.
Fuente. Production of Sustainable aircraft grade Kerosene from water and air powered by Renewable Electricity, through the splitting of CO2, syngas formation and Fischer-Tropsch synthesis, Comisión Europea, Horizon 2020 Kerogreen, recuperado el 23 de enero de 2024 de: https://cordis.europa.eu/project/id/763909/reporting/es

Como se mencionó anteriormente, una de las principales ventajas del su uso de e-kerosene en la aviación es que permite utilizar la infraestructura y los motores existentes sin necesidad de reemplazos o modificaciones. La flota comercial global activa actualmente es cercana a las 35000 aeronaves (Wyman, 2024). Una vez obtenido el e-kerosene se almacena en tanques para la posterior distribución hacia el cliente final (Rojas-Michaga et al., 2023). En diferentes países de Europa un estudio de la ONG

europea Transport & Environment contabiliza 25 proyectos industriales y 20 proyectos piloto más pequeños que prometen producir combustibles sintéticos para la aviación, que se muestran en la Figura 3. Los 25 proyectos industriales identificados en el estudio tienen la ambición de producir 1,7 Mt de e-kerosene para 2030, que podrían abastecer el equivalente a 70000 vuelos transatlánticos con una mezcla de 50% de e-kerosene y ahorrar un total de 4,6 millones de toneladas de CO_2 (Transport and Environment, 2024).

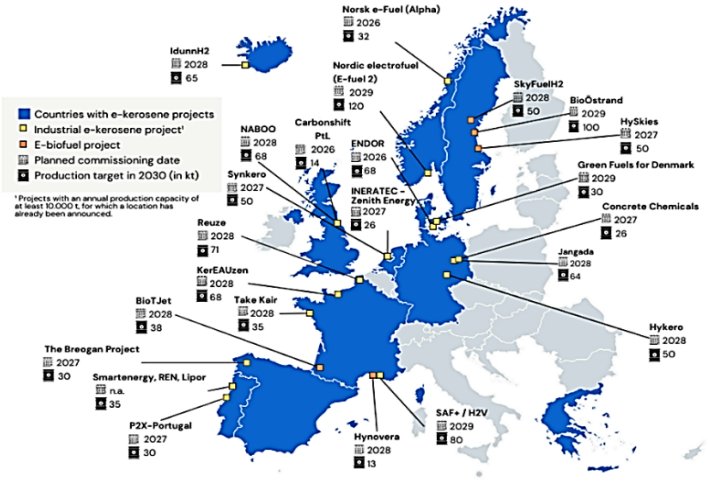


Figura 3. Proyectos de e-kerosene anunciados en Europa para 2023. Fuente: The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe, (p.2), por Transport and Enviorment, 2024.

La cadena de producción del e-kerosene contempla los siguientes pasos:

1. *Plasmólisis:* un reactor de plasma permite la división del CO_2 en CO y O_2. El plasma (gas ionizado) sirve como vehículo para facilitar las condiciones de descomposición del CO_2. Es producido mediante aceleración de electrones por microondas que excitan vibracionalmente las moléculas a un estado que propicia su disociación.
2. *Separador de oxígeno:* emplea membranas conductoras de oxígeno a alta temperatura que transportan selectivamente el oxígeno fuera de la corriente de gas mezclado lo que aumenta la producción de CO.
3. *Purificación de CO:* el CO debe ser purificado para remover moléculas de otros gases a través de técnicas de destilación criogénica, eliminación de gases ácidos y deshidratación.
4. Generación de syngas: es la principal fuente de CO e H_2 y se obtiene mediante la oxidación parcial o reformado con vapor de materias primas carbonosas (Evans et al., 2018). El CO previamente purificado se mezcla con agua o directamente con H2V para producir el syngas (Kerogreen, s.f).
5. *Síntesis química de Fischer-Tropsch:* con el uso del syngas y un reactor para la síntesis se obtiene un hidrocarburo sintético.
6. *Hidrocraqueo:* es un proceso de craqueo catalítico en el cual, mediante la adición de hidrógeno, las moléculas de hidrocarburos de cadena larga se rompen en moléculas más cortas. (Weitkamp, 2012).

Actualmente la única opción posible para descarbonizar el transporte aéreo con combustibles sintéticos es el e-kerosene ya que no requiere un cambio en la infraestructura existente.

2. Análisis económico-Costo nivelado del e-kerosene

En este apartado se realiza el análisis económico de la producción del e-kerosene, considerando la cadena de valor PtL como se muestra en la Figura 4.

A diferencia de otros SAF que son relativamente maduros, PtL es un mercado emergente y la aplicación del e-kerosene enfrenta múltiples desafíos. En primer lugar, como se indica en la Figura 4, convertir la electricidad en hidrógeno y luego en e-kerosene es poco eficiente: aproximadamente la mitad de la energía se disipa, lo que plantea la cuestión de si debieran utilizarse estos valiosos recursos (electricidad e hidrógeno) directamente como combustibles, en lugar de desperdiciar energía en pérdidas por

conversión (Searle, 2020). En segundo lugar, el costo es una barrera importante. Algunos estudios han mostrado una enorme variación en el costo estimado de la producción de e-kerosene debido a diferentes supuestos con respecto a las fuentes y precios de la electricidad y el CO_2 (Isaacs et al., 2021).

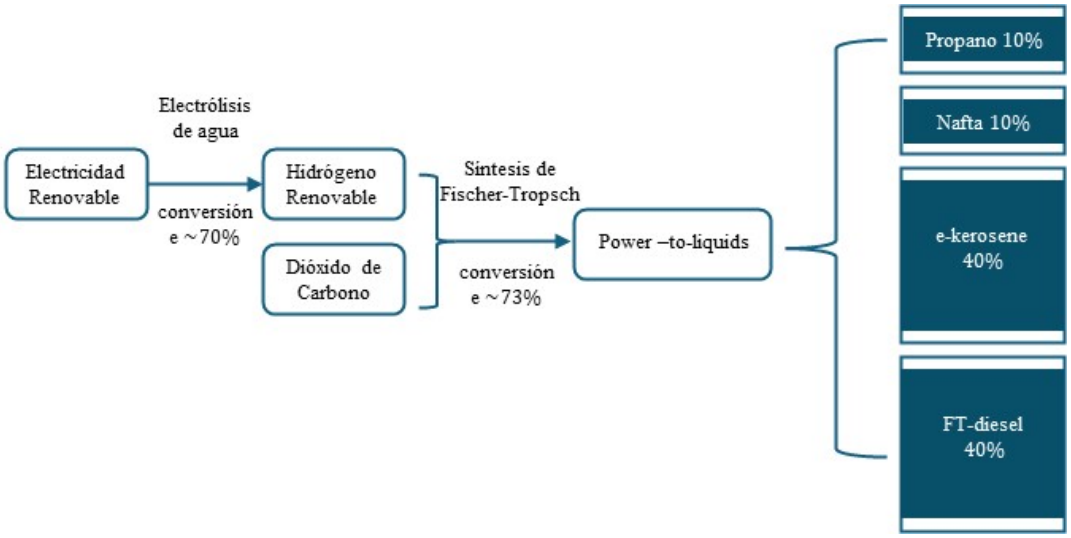


Figura 4. Descripción general de un esquema PtL y distribución de productos por porcentaje de energía. Fuente. Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe, (p.1), Zhou et al., 2022, International Council on Clean Transportation.

Para comprender el papel potencial del e-kerosene en la descarbonización del sector de la aviación en Italia, se toman datos estimados del costo de producción en la UE de 2020 a 2050 (Zhou et al., 2022). El estudio considera la electricidad renovable para la producción y asume que el CO_2 se proporciona desde una fuente puntual. Luego se analiza la competitividad de costos del e-kerosene en comparación con otros combustibles fósiles de aviación, así como la necesidad de apoyo político. La metodología empleada estima el costo de producción de PtL utilizando un modelo de flujo de caja descontado (DCF) (Christensen y Petrenko, 2017). Este modelo DCF calcula el costo nivelado para que una inversión sea económicamente viable y alcance una tasa de rendimiento objetivo. Los componentes principales del modelo DCF incluyen la inversión de capital inicial, los costos operativos anuales y los ingresos por ventas de productos. Además de estos componentes de costos, los supuestos financieros relacionados con la deuda y el capital también son cruciales en un modelo DCF, ya que determinan el rendimiento requerido para que el proceso sea económicamente viable. Para este análisis se utilizan los costos de producción nivelados de PtL de 27 países de la UE, considerando el promedio aritmético del costo estimado entre regiones o países para representar la UE. El plazo para las estimaciones de costes es entre 2020 y 2050 y todas las cifras de costes se dan en euros valor 2020.

2.1 Supuestos para los costos nivelados de producción

Estimar el costo de PtL requiere el análisis de tres procesos clave: generación de electricidad renovable, electrólisis del agua y síntesis FT. Este estudio, combina dos conjuntos de análisis DCF, uno para estimar el costo nivelado de la electricidad renovable (LCOE) y el otro para PtL (PtLcost) que cubre la electrólisis del agua y la síntesis FT. El precio del CO2 se recopila de estudios anteriores.

Los factores de capacidad (FC) solar y eólica de los 27 países europeos se toman de (Zhou et al., 2022), suponiendo que la capacidad instalada de la planta de electricidad capital y operativos (CAPEX y OPEX) de las plantas de energía solar y eólica asumen los mismos costos en toda la región europea y la proyección de los precios futuros de la electricidad renovable, sigue la tasa de reducción de costos y la tasa de mejora del FC de NREL (2021).

La instalación PtL tiene dos opciones: conectarse directamente a un parque de electricidad renovable o a la red eléctrica y aquí se consideran ambas opciones. En el primer caso, se toma el (LCOE) calculado para la producción de PtL. En el caso de la conexión a la red, se agregan costos de transmisión y distribución de electricidad (T&D) tomados de Searle y Christensen (2018) y se supone la celebración de un PPA para la compra de electricidad renovable.

El FC —la fracción de un año que una planta de energía puede operar— de la instalación PtL depende del escenario; si está conectado directamente a una generación de electricidad renovable, el FC de la instalación PtL coincide con el del parque de renovables; si se utiliza electricidad de la red, el FC es cercano a 1, es decir, la planta podría funcionar casi a tiempo completo. Por lo tanto, el beneficio de la conexión directa son menores costos de electricidad renovable (LCOE), mientras que el beneficio de la conexión a la red es un mayor FC de las instalaciones, lo que reduce el costo nivelado de los gastos de capital por unidad de PtL producida. La opción más barata depende del FC renovable específico y de las tarifas de la red en cada sitio de instalación.

2.2 Supuestos para el Costo de producción de PTL - LCOK

La Tabla 1 presenta los supuestos clave para el costo del proceso Pt (LCOK) y detalles adicionales se encuentran en Zhou et al. (2022). Se asume el uso de una gran planta de producción central de PtL con una capacidad instalada anual de 400 MW de potencia de entrada. En el modelo económico, la capacidad de la planta PtL supuesta no es relevante para la capacidad de electricidad renovable admitida en el cálculo de LCOE, que representa el precio de mercado de las energías renovables que los productores de PtL deben pagar). No obstante, la producción real está determinada por el FC, que en el caso de la conexión directa estaría restringido por el FC del parque de renovables y en el caso de la conexión a la red, se asume un FC de 95% que considera las posibles pérdidas en la distribución de electricidad y en el tiempo de inactividad de las instalaciones.

Tabla 1: Supuestos de parámetros de producción PtL

PARÁMETROS DE ENTRADA	SUPOSICIÓN DE DATOS		
Capacidad Instalada	400 MW		
Factor de Capacidad	Conexión a la red: 95%	Conexión Directa: igual a la de la generación renovable	
Factor de Contingencia	1.2		
CAPEX del Electrolizador (USD/kW-2020)	AEL	PEM	SOEC
	988	1,182	1,346
Reducción futura del CAPEX del Electrolizador	2% anual		
Eficiencia del Electrolizador en 2020	70%	60%	81%
Eficiencia del Electrolizador en 2050	80%	74%	90%
Vida útil del Electrolizador en 2020 (hs)	75.000	60.000	20.000
Vida útil del Electrolizador en 2050 (hs)	125.000	125.000	87.500
CAPEX síntesis de FT	450 USD/kW de combustible		
Eficiencia síntesis de FT	73%		
OPEX Costos fijos de Operación anual	4% del CAPEX		
Precio de la energía LCOE	Específico para cada país		
Precio del agua LCOW	Específico para cada país		
Precio del CO_2	40USD/t		
Precio mayorista del oxígeno	0.15 USD/m^3		

Nota. Elaboración propia con datos de Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe (Zhou et al., 2022).

Se estiman los costos de PtL utilizando solo CO_2 de fuente puntual a $40/t (Christensen y Petrenko, 2017; Terwel y Kerkhoven, 2018). El costo de producción de e-kerosene calculado es un precio mayorista que excluye los costos de entrega y combustible, así como los impuestos.

2.3 Resultados para el LCOK

Las estimaciones de costos obtenidas se comparan con diferentes combustibles de aviación (SAF) para evaluar la competitividad de costos del e-kerosene y proporcionar elementos a los formuladores de políticas y a la industria para comprender mejor el papel potencial del e-kerosene. En la Tabla 2 se muestra el coste medio estimado de producción de e-kerosene y otros SAF en la UE.

Tabla 2: Coste medio estimado de producción de e-kerosene y otros SAF en la UE

Año	e-kerosene USD/MJ	HEFA USD/MJ	Jet A USD/MJ	e-kerosene USD/Galón*	e-kerosene USD/Litro
2020	0,098	0,030	0,010	12,840	2,822
2025	0,086	0,029	0,015	11,168	2,455
2030	0,073	0,028	0,018	9,585	2,107
2035	0,067	0,026	0,019	8,802	1,935
2040	0,062	0,025	0,020	8,133	1,787
2045	0,057	0,024	0,022	7,499	1,648
2050	0,053	0,023	0,023	6,939	1,525

* Galón imperial aprox. 4,55L.

En la Figura 5 se grafica este coste medio estimado de producción de e-kerosene que muestra una disminución cuadrática entre 2020 y 2050.

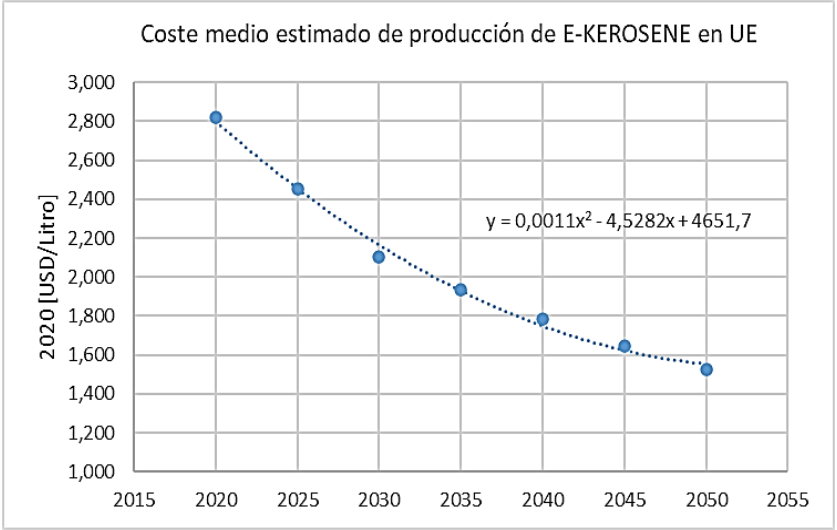


Figura 5: *Coste medio estimado de producción* de e-kerosene *en UE*. Elaboración propia a partir de los datos recopilados de Zhou et al, 2022.

En la Figura 6 se grafican los datos de la Tabla 4 a modo de comparación, mostrando los precios mayoristas de e-kerosene, HEFA y el combustible Jet A, es decir, kerosene fósil, recopilado de la Administración de Información Energética de EE. UU. (2021) y de aceite de cocina usado como materia prima para representar el precio de HEFA. Debido a su mejor desempeño climático y menor costo en comparación con los aceites vegetales se asume una disminución lineal del precio de HEFA para los años entre 2020 y 2050 (Pavlenko et al., 2019). Este estudio no considera ayudas gubernamentales y/o incentivos financieros. Tampoco considera las externalidades como pueden ser las emisiones de CO_2 (externalidad negativa) o, por el contrario, el ahorro en emisiones de CO_2 (externalidad positiva). Al momento que se consideren las externalidades en los costes del kerosene fósil, y que se cuenten con apoyos gubernamentales de diferentes tipos, el e-kerosene podrá competir en el mercado con otros combustibles como lo son los HFA y el Jet-A.

3. Análisis de emisiones de CO_2

El análisis ambiental del proceso se basa en la reducción de emisiones de CO_2, asumiendo que el emitido en la combustión de los e-combustibles es igual al CO_2 capturado para producirlo como se ha explicado anteriormente. Producir 1 kg de combustible de aviación sostenible (SAF), se requiere aproximadamente 3,1 kg de CO_2. (OACI, 2023) lo que quiere decir que la combustión de 1 kg de e-kerosene genera 3,1 kg de CO_2.

Cuando el e-kerosene se produce a partir de H2V y captura y utilización de carbono (CCU, por sus siglas en inglés), las emisiones de CO_2 igualan al CO_2 capturado y retirado de la atmósfera, siendo las

emisiones netas globales de su combustión prácticamente cero. Por otro lado, el kerosene de origen fósil que entra en combustión liberará esos mismos 3,1 kg. Sin embargo, el CO_2 no es el único componente de esta combustión, sino que produce dióxido de azufre (SO_2) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) además de óxidos de nitrógeno (NO_x) pero estos no estarían presentes en la combustión del PtL kerosene por lo que se reduciría casi al 100% la emisión de estos gases secundarios (Micheli et al., 2022). Según la IEA, en el año 2022, el consumo total de kerosene para la aviación en Italia fue de 51,146 TJ.

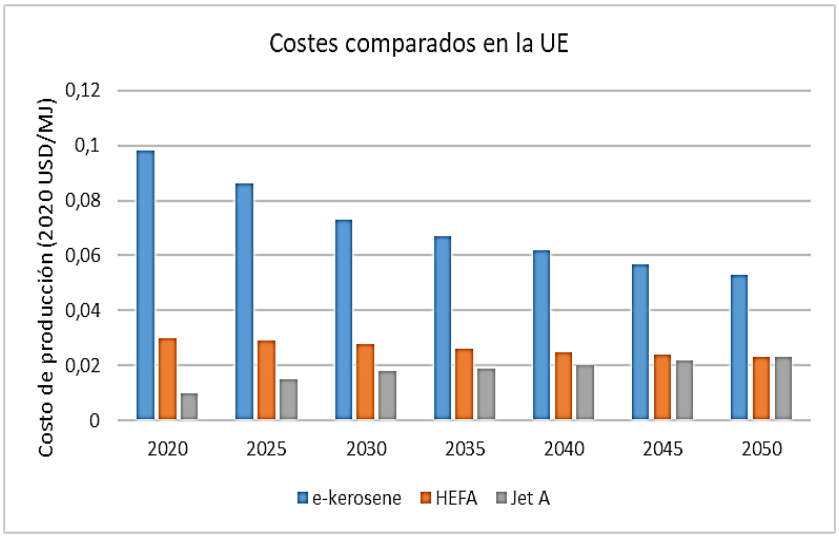


Figura 6: Costo estimado de producción de e-kerosene en la UE, en comparación con los ésteres y ácidos grasos hidroprocesados (HEFA) y el combustible fósil Jet A. Elaboración propia a partir de los datos recopilados de Zhou et al, 2022.

Teniendo en cuenta que el poder calorífico medio de este combustible es de 41.600 kJ/kg, se puede calcular el consumo en masa como se indica en la ecuación (3):

$$5{,}1146 \times 10^{13}\text{kJ} \times \left(\frac{1\text{kg}}{41600\text{kJ}}\right) \approx 1.229.471.154\ \text{kg} \qquad (3)$$

Entonces, en el año 2020 el consumo de kerosene fósil en Italia fue de más de mil doscientos millones de kilogramos. Las emisiones de CO_2 por combustión de esta cantidad de kerosene para transporte aéreo se calculan como se muestra a continuación en la ecuación (4):

$$1.229.471.154\ kg \times \left(\frac{3{,}1kg\ CO_2}{1kg}\right) \approx 3.811.360.576\ \text{kg}\ CO_2 \qquad (4)$$

Las emisiones resultaron de casi cuatro mil millones de kilogramos de CO_2. Si se usara el e-kerosene en vez de kerosene de origen fósil, se podrían evitar las emisiones netas calculadas, haciéndolas circular por la atmósfera donde habría periodos donde se capturan y se remueven para volverlas a liberar en la combustión y así cíclicamente.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se llevó a cabo el análisis técnico, económico y de emisiones de la producción de e-kerosene en Italia. Con base en los resultados obtenidos, se puede conjeturar que su producción y uso es viable según el conjunto de variables analizadas. De este análisis es posible concluir lo siguiente:

- La descarbonización del sector aéreo es urgente para cumplir con los objetivos ambientales globales. El e-kerosene podría ser clave en este proceso como opción renovable y sostenible.
- Aunque la producción de e-kerosene es técnicamente viable, se necesita mejorar la eficiencia y reducir pérdidas energéticas.
- Los altos costos de energía eléctrica y CCU dificultan que el e-kerosene compita con el fósil.

- La producción de e-kerosene es carbono-neutral y evita emisiones de gases contaminantes como los de nitrógeno y azufre, comunes en el kerosene fósil.
- Su uso es compatible con los motores y sistemas de combustible actuales, lo que evita la necesidad de nuevas infraestructuras, a diferencia del hidrógeno o la electricidad.
- Considerar las externalidades en el costo de los combustibles permitiría que el e-kerosene se abarate y que el kerosene fósil se encarezca por impuestos a las emisiones.
- Incentivos financieros y apoyo gubernamental son esenciales para que el e-kerosene se adopte a gran escala y se convierta en un actor clave en la descarbonización de la aviación, integrando subsidios y políticas de apoyo e inclusión de externalidades, para competir en el mercado.

Recomendaciones para la reducción de costos del e-kerosene:

- Ampliar plantas para aprovechar economías de escala y reducir costos.
- Optimizar procesos de electrólisis y uso de energía solar/eólica para producir hidrógeno verde.
- Mejorar tecnologías de CCU para obtener CO_2 de manera eficiente y económica.
- Implementar créditos fiscales y mandatos de mezcla para asegurar mercados y reducir costos.
- Desarrollar procesos avanzados que optimicen la conversión de CO_2 e hidrógeno.

REFERENCIAS

Agudelo, I.M. (2023). Análisis técnico, económico y ambiental del proceso power to fuel. Trabajo de Fin de Máster, Universidad Internacional de Valencia VIU.

Blakey, S., Rye, L. y Wilson, C.W. (2011). Aviation gas turbine alternative fuels: A review. Proceedings of the Combustion Institute Volume 33, Issue 2, 2011, Pages 2863-2885

Evans, A., Luebke, R. y Petit, C. (2018). The use of metal-organic frameworks for CO purification. Journal of Materials Chemistry A.

Christensen, A., y Petrenko, C. (2017). CO2-based synthetic fuel: Assessment of potential European capacity and environmental performance. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/co2-based-synthetic-fuel-assessment-of-potential-european-capacity-and-environmental-performance/> [consulta: 10 de enero de 2024]

Fasihi, M., Efimova, O. y Breyer C. (2019). Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants. Journal of Cleaner Production 224 (2019) 957 - 980.

Goede, A., Pandiyan, A., Kyriakou, V., Neagu, D., Welzel, S., Van de Sanden, M. y Tsampas, M. (2022). CO2 conversion via coupled plasma-electrolysis process. Europhysics News. The magazine of the European Physical Society.

Goede, A. (2022). Kerogreen: for green kerosene. Glossy brochure for policy makers. Kerogreen.

Green Car, (2024). <https://www.greencarcongress.com/2024/01/20240125-ekerosene.html>

IEA. (2022). Global Hydrogen Review 2023.

INODÚ Chile energy & sustainability. (2021). Análisis de la captura de carbono para la producción de combustibles sintéticos en Chile. Informe Final. <https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/media_elements/Studies/20210818_Carbon_Capture_Full_Study.pdf> [consulta: 10 de julio de 2024]

IPCC, (2022). Global Warming of 1.5°C. Intergovernmental panel on climate change special report.

Isaacs, S. A., Staples, M. D., Allroggen, F., Mallapragada, D. S., Falter, C. P., y Barrett, S. R. H. (2021). Environmental and Economic Performance of Hybrid Power-to-Liquid and Biomass-to-Liquid Fuel Production in the United States. Environmental Science & Technology, 55(12), 8247–8257.https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07674

Micheli, M., Moore, D., Bach, V., y Finkbeiner, M. (2022). Life-Cycle Assessment of Power-to-Liquid Kerosene Produced from Renewable Electricity and CO2 from Direct Air Capture in Germany.

Nemmour, A., Inayat, A., Janajreh, I., y Ghenai, C., 2023. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review. International Journal of Hydrogen Energy. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.240>

NREL. (2021). Data | Electricity | 2021 | ATB | NREL. <https://atb.nrel.gov/electricity/2021/data>

OACI. (2023). Training Material on Model Regulations to Assist States in the Implementation of CORSIA. International Civil Aviation Organization.

Ozkan, M., Narappa, A. B., Namboodiri, T., Chai, Y., Babu, M., Jennings, J. S., & Watkins, J. M. (2024). Forging a sustainable sky: Unveiling the pillars of aviation e-fuel production for carbon emission circularity. Iscience.

Pavlenko, N., Searle, S., y Christensen, A. (2019). The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/the-cost-of-supporting-alternative-jet-fuels-in-the-european-union/> [consulta: 14 de febrero de 2024]

Peres, C.B., Resende, P.M.R., Nunes, L.J.R., Morais, L.C.d. (2022). Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO2 Mitigation Potential Analysis. Clean Technol. 2022, 4, 1193-1207. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040073>

Parlamento Europeo. (2022a). Emisiones de aviones y barcos: datos y cifras (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191129STO67756/emisiones-de-aviones-y-barcos-datos-y-cifras-infografia> [consulta: 8 de febrero de 2024]

ReFuelEU Aviation (2024). Disponible en: < https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueleu-aviation_en> [consulta: 10 de octubre de 2024]Ritchie, H., Roser, M., y Rosado P. (2020a). Emissions by sector: where do greenhouse gases come from? Our World in Data. Recuperado el 7 de enero de 2024 de: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>

Rojas-Michaga, M.F., Michailos, S., Cardozo, E., Akram, M., Hughes, K.J., Ingham, D., y Pourkashanian, M. (2023). Sustainable aviation fuel (SAF) production thorugh power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. Energy Conversion and Management. ELSEVIER.

Searle, S., y Christensen, A. (2018). Decarbonization potential of electrofuels in the European Union. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/decarbonization-potential-of-electrofuels-in-the-european-union/> [consulta: 20 de abril de 2024]

Searle, S. (2020). E-fuels won't save the internal combustion engine. ICCT Staff Blog. <https://theicct.org/e-fuels-wont-save-the-internal-combustion-engine/>

Sánzhez Delgado, M. (2019). Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid).

Syirat, Z., Ker, J., Mohamed, H., y Ong, H.C. (2024). Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. ELSEVIER

Terwel, R., y Kerkhoven, J. (2018). Carbon neutral aviation with current engine technology: The take-off of synthetic kerosene production in the Netherlands (p. 62). <https://kalavasta.com/assets/reports/Kalavasta_Carbon_Neutral_Aviation.pdf>

Transport & Enviornement. (2024). The challenges of scaling up e-kerosene production in Europe. <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2024/01/2024_01_E-kerosene_Tracker_TE.pdf> [consulta: 20 de mayo de 2024]

Weitcamp, J. (2012). Catalytic Hydrocracking—Mechanisms and Versatility of the Process. CHEMCATCHEM.

Zhou, Y., Searle, S., Pavlenko, N. (2022). Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe. International Council on Clean Transportation

TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY AND EMISSIONS ANALYSIS OF THE USE OF E-KEROSENE IN ITALY IN THE AERONAUTICAL SECTOR

ABSTRACT: This paper presents the technical, economic feasibility and emission analysis of the production of e-kerosene (SAF) by Fischer-Tropsch chemical synthesis for use in the Italian air transport sector. The technical feasibility is analysed using green hydrogen and captured carbon dioxide as sustainable feedstock. The economic assessment analyses the SAF Levelised Cost and its production in the European Union and the environmental analysis analyses the emission reduction by using SAF instead of fossil fuels. Ongoing projects in 9 EU countries demonstrate technical feasibility. The average cost of SAF will decrease with a quadratic trend from 2020 to 2050, so that in the future it will be able to compete in the market if fiscal incentives and externalities, such as CO_2 emissions, are considered in the cost of fossil kerosene. Environmental analysis shows that CO_2 emissions from e-kerosene equal the CO_2 captured, offsetting global net emissions.

Keywords: Carbon Capture, Green Hydrogen, Synthetic Fuels, e-kerosene, Fischer-Tropsch Chemical Synthesis, Syngas

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 489-500, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

EXPECTATIVAS DE LOS POBLADORES DE OLACAPATO (SALTA, ARGENTINA) EN RELACIÓN CON LA INSTALACIÓN DE GRANDES PLANTAS SOLARES EN SU TERRITORIO

Facundo D.F. Gonzalez[1], Candelaria Cornú[2], Nahuel Salas[3], Facundo Corro Tosoni[4], Jorge Miller[5], Ana Orte[6], Claudia E. Bonifacio[7], Carlos A. Cadena[8] Facundo A. Pérez Machado[9]
[1,8]Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina. Tel. 3875809428. Correo:
facundoinenco@gmail.com
[2,3,4,5,6,7,9]Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta.
Av. Bolivia 5150, Salta Capital, CP 4400, Argentina

RESUMEN: la Puna argentina, por sus niveles de radiación solar, es un escenario ideal para la instalación de Plantas Fotovoltaicas. A su vez, el avance de la minería del litio la convierte en un territorio formidable para la transición energética. Por ello, la región experimenta el desembarco de inversiones y el desarrollo de una industria novedosa para las comunidades locales. En este artículo analizamos la experiencia de la comunidad de Olacapato (Salta, Argentina) con relación a la instalación de la Planta Solar Cauchari. Es de principal interés retomar las expectativas de los pobladores locales y reconstruir sus condiciones de acceso a la energía. Las nociones de Supra e Infra hábitat, como modos de entender la producción del hábitat, direccionaron el trabajo de campo, que constó de 3 etapas: acercamiento y observaciones participantes, despliegue de entrevistas y conversaciones con referentes, y encuesta en la comunidad. El trabajo presenta resultados parciales de la encuesta. La experiencia en el acceso a la energía configuró expectativas altas en relación con la mejora de sus condiciones: la instalación de una planta solar en su territorio (aunque jurisdiccional diferente) debería mejorar el servicio. Al mismo tiempo las prácticas, usos y costumbres locales tensionan las relaciones planta solar-comunidad y comunidad-referentes.

Palabras clave: energía solar, tecnología, transferencias y educación.

INTRODUCCIÓN

San Antonio de los Cobres es la cabecera del Departamento de Los Andes, ubicado en el extremo oeste de la Provincia de Salta. Ese territorio aloja comunidades indígenas y criollas que habitan una zona clave para el mercado mundial y la transición energética. Allí existen salares con grandes reservas de litio en salmuera, que se suma a la actividad minera que ya modificaba el paisaje puneño. Esto configura nuevos interrogantes que demandan analizar de qué manera se vincula el desarrollo minero con las expectativas de hábitat de las comunidades locales que, a diferencia de lo que señalaba el periodista porteño, si existen.

El artículo se ocupa de pensar un conjunto de esas expectativas, específicamente las relacionadas con la dimensión energética del hábitat. ¿Qué expectativas circulan en comunidades históricamente situadas en condiciones de pobreza energética? ¿Cómo perciben la actividad minera en relación con su experiencia? A partir de esos interrogantes iniciales, se analizan las experiencias y expectativas de los pobladores locales.

Olacapato está situado en la Puna de Salta (ver figura 1) y es el poblado ubicado a mayor altura en Argentina, a 4.100 metros de altura sobre el nivel del mar. Cuenta con menos de trescientos habitantes

(INDEC, 2024). Su actividad económica principal gira, como lo ha sido en tiempos anteriores, en torno a la minería porque su ubicación geográfica se halla en lo que se denomina la zona del "triángulo del litio". De esta manera, es la segunda vez que encuentran promesas de progreso en la actividad minera. Anteriormente, esas promesas estaban vinculadas al antiguo Ramal C14 del ahora inactivo ferrocarril General Belgrano. Este ramal conectaba Argentina con las costas del Océano Pacífico, a través de Chile. Tanto el salitre como las piedras preciosas minerales extraídas en la minería eran las riquezas potenciales que auguraban un posible progreso económico y social.



Figura 1: Olacapato en la puna salteña en el noroeste de Argentina. Fuente: Instituto Geográfico Argentino (IGA).

Esta localidad, cercana a la Ruta Nacional 51 y al Salar Cauchari (ver Figura 2), ha accedido mayoritariamente a la energía por fuentes convencionales y no están integrados a la red de distribución energética nacional. En la actualidad, despierta interés por dos motivos: por un lado, pertenece al denominado "triángulo del litio" en la actividad minera. Por otro, por sus condiciones geográficas y climáticas, se encuentra en el medio de dos de los más grandes parques solares del país "Parque Solar Fotovoltaico Altiplano 200" y el "Parque Solar Cauchari", ubicado en las cercanías del pueblo, pero perteneciente a la jurisdicción de la provincia de Jujuy (Bonifacio *et al*).

Las expectativas de progreso y desarrollo de los pobladores no se han materializado en mejoras concretas. Más aún, cuando en el primer gobierno de Carlos Menem se decidió privatizar la red ferroviaria en Argentina, por lo que los servicios de Ferrocarriles Argentinos fueron segmentados y concesionados a empresas privadas o cancelados definitivamente (Cena, 2003). En el caso del ramal C14, dejó de estar operativo. Esto profundizó el aislamiento de la población, precisamente con el Estado como un actor de cambio negativo.

En la actualidad, varios hitos sitúan nuevamente a Olacapato en el panorama de actividades y desarrollos económicos prominentes. Por un lado, la actividad minera vinculada a la extracción de litio. Por otro lado, la agenda internacional de transición energética, debido al potencial de generación de energía fotovoltaica en zonas de esas características geográficas.

El poblado cuenta con la mayoría de los servicios, agua corriente, gas, internet y electricidad. En el caso del servicio eléctrico, se brinda a través de un grupo electrógeno generador de energía que funciona utilizando gasoil como combustible. El servicio tiene ciertas limitaciones, pues el generador necesita un mantenimiento especial, por lo que se interrumpe el suministro dos veces al día, una vez por la mañana y otra por la tarde. El grupo electrógeno es proporcionado y administrado a través de EDESA (Bonifacio *et al*).

Retomando la definición de pobreza energética de Ottavianelli *et al.* (2021), podemos caracterizar a los habitantes de Olacapato dentro de este grupo, porque no se les garantizan los niveles mínimos de consumo necesario para el desarrollo de dicha comunidad, destacando la intermitencia y las bajas de tensión como obstáculos principales. Además, el frío extremo en algunos meses del año hace colapsar el sistema de energía eléctrico local y la población se debe calefaccionar con braseros a base de biomasa. Si bien lo descrito acerca de Olacapato no muestra diferencias sustanciales con lo que sucede en diversos parajes y localidades del noroeste argentino, la cercanía con los dos parques fotovoltaicos mencionados lo convierte en un lugar de especial interés para la investigación académica y la política.

La proximidad del pueblo con estos parques de paneles solares, sumado a su ubicación cercana a la zona de explotación minera, que lo colocan dentro del "triángulo del litio", son dos fenómenos que no pasan desapercibidos para los habitantes y que generan expectativas y/o reclamos respecto a sus condiciones de vida, sobre todo si se tiene en cuenta el devenir histórico que hemos descrito sucintamente en este mismo apartado.

La instalación de estos parques solares se inscribe en la agenda mundial de transición energética que promueve la descarbonización (González *et al,* 2023). El Parque Solar Cauchari, está ubicado en la provincia de Jujuy casi al límite de la provincia de Salta (ver Figura N°3). La distancia entre la estación transformadora del parque y el pueblo de Olacapato es de menos de diez kilómetros, aunque gran parte de los paneles fotovoltaicos son contiguos con el pueblo. El parque fue inaugurado en octubre de 2019 y pertenece a la empresa JEMSE (Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado), una empresa pública-privada que encargó la construcción del proyecto a las empresas China Power Construction Group (*China Power Construction*) y Shanghai Electric Power Construction Co., Ltd. (JEMSE, 2020). Según la información disponible, el parque fue financiado por el Banco chino Eximbank (Export-Import Bank of China) y cuenta con 1.180.000 paneles solares, siendo el más grande de América Latina. Su capacidad de producción energética es de 300 megavatios, el equivalente para abastecer a 100.000 hogares, según fuentes gubernamentales (Vicejefatura de Gabinete del Interior de Argentina, 2019).
La disposición de estos dos parques solares y el impacto que generan en los habitantes lleva a preguntar acerca de las condiciones de acceso y las expectativas surgidas a partir de su instalación. Particularmente, se circunscribirá el trabajo a la experiencia de la comunidad con el Parque Cauchari, que es el colindante con Olacapato y que se encuentra en funcionamiento.



Figura 2: imagen satelital del Paque Solar Cauchari y su distancia con Olacapato. Fuente: Google maps.

Para abordar la cuestión de acceso a la energía y la producción energética, se retomarán perspectivas sociales que proponen la necesidad de considerar la justicia social y ecológica, la perspectiva de género y el respeto por la democracia y la autonomía de los pueblos como ejes articuladores de las políticas energéticas (Gonza et al, 2022; Svampa y Bertinat, 2022). A raíz de esto, el trabajo parte del presupuesto de que la cercanía del pueblo con ambos parques podría despertar esperanzas, miedos o demandas en los pobladores.

MÉTODO

En línea con la posición ético-epistemológica se trabaja desde la indagación de sentido, las autopercepciones que tienen los pobladores y el involucramiento del Estado y del sector privado. González (2020) propone pensar dos dimensiones de la producción social del hábitat: infra hábitat y supra hábitat. El autor señala que estas dimensiones del hábitat permiten revisar aspectos que dan cuenta de la diversidad de prácticas e ideologías que hacen al hábitat. "*Lo supra representa un modelo occidentalizado, colonial hegemónico y homogeneizador, desde el cual se piensa, diseña y configura el hábitat y, al mismo tiempo, se limitan o potencian las experiencias sociales en y con el espacio*"

(González, 2020, p. 225). Lo infra, en cambio, se ofrece como un modo de resistencia que atiende a una diversidad de modos de significar, ser y estar en el mundo, no se limita al diseño y construcción del territorio, sino que se expresa como una multiplicidad de elementos que van desde la salud, al vínculo con la naturaleza y el entorno. Así, estas dimensiones dan cuenta de cómo operan las desigualdades sociales y cómo esas desigualdades se materializan en las asignaciones y uso de los espacios y sus recursos. La relevancia de este problema de investigación puede vincularse con la crisis de legitimidad del Modelo Civilizatorio Moderno Colonial (MCMC). Conocer los modos de vida de las personas que habitan contextos de diversidad cultural y que conciben el ser y estar en el mundo de formas diferentes y hasta contradictorias (González y Rodriguez, 2020) constituye un elemento de interés para las ciencias sociales ocupadas de la cuestión energética.

Para dar cuenta de la experiencia de Olacapato, se retoman estas categorías, pues permiten revisar componentes que, aunque son analizados por separado, son parte de la misma experiencia de habitar. Para reconstruir estas dimensiones se utilizaron tres instrumentos de indagación que nos permiten dar cuenta de cómo emergen lo infra hábitat y lo supra hábitat. Estos fueron: un cuestionario, realizado a 51 personas, conversaciones con referentes y testimonios extraídos de los medios de comunicación.

Para llevar a cabo el trabajo y obtener una comprensión holística, integral y compleja, se recurrió a una metodología cualitativa (Vercelli y Thomas, 2008). El universo de análisis fueron todos los habitantes del pueblo, mayores de 17 años. Para realizar la encuesta, se elaboró una muestra no probabilística, debido a limitaciones presupuestarias y de tiempo. La selección de la muestra fue de tipo estratégico, pues "*responde a criterios subjetivos, acordes con los objetivos de la investigación. [...] Estos estudios no siempre precisan de la selección rigurosa de las unidades muestrales. Basta con escoger [...] a individuos que compartan las características de la muestra diseñada para la investigación definitiva*" (Cea D'Ancona, 1992, p. 201). En este caso, la selección de cada unidad de análisis se dio en el marco de una segmentación de los hogares del pueblo.

El primer contacto con los pobladores se realizó a partir de un viaje indagatorio. En este se llevaron a cabo observaciones participantes y conversaciones con informantes claves y miembros activos de la comunidad, tales como maestras, policías, agentes del Estado municipal, comerciantes, etc. Además, este primer acercamiento permitió caracterizar el terreno en el que se desarrolló el trabajo de campo: gran cantidad de tránsito pesado, vinculado al desarrollo minero en la región y características propias de la Puna, como cerros con vegetación escasa y agreste de tonalidades marrones (ver figura 3). Una vez cerca del pueblo, resaltan las casas de adobe del poblado más alto del país.



Figura 3: Camino Salta- San Antonio de los Cobres en la ruta nacional 51. Fuente: Banco de imágenes de los proyectos de investigación.

Después de este primer acercamiento, se realizó un diseño tentativo, prueba, reajuste e implementación de la encuesta. La misma se denominó "Encuesta de Acceso a la Energía en Olacapato 2024" con el objetivo de conocer los sentidos en torno al acceso a la energía. Este instrumento se compone de tres bloques temáticos:

El bloque 1 tuvo como fin obtener un panorama socio demográfico de los habitantes de la zona, con base en datos como su zona de residencia, edad, género y algunos datos sobre el servicio eléctrico.

El segundo bloque tuvo el objetivo de conocer la vinculación que tienen los pobladores con el acceso a la energía, para ello se indagó cuestiones relacionadas con la manera en la que acceden al servicio, costos, particularidades de cada caso en cuanto al uso de diferentes fuentes energéticas, etc.
El tercer bloque se denominó "Energía como derecho humano" y buscó conocer qué concepción tienen los pobladores de su experiencia particular con respecto a la Energía.

Por último, el bloque número cuatro se nominó "Parque solar fotovoltaico: Altiplano 200" y "Cauchari", con el objetivo de indagar íntegramente las expectativas con los parques solares fotovoltaicos.
Para la recolección de información y el despliegue de la encuesta, se realizó un segundo viaje. A tal fin, se conformó un equipo de trabajo compuesto catorce personas que integran los proyectos de investigación en los que se enmarca este trabajo, entre las que se encuentran los y las autoras. A su vez se trazó un mapa del pueblo (ver figura 4), para dividirlo en secciones y así favorecer al desarrollo del instrumento.

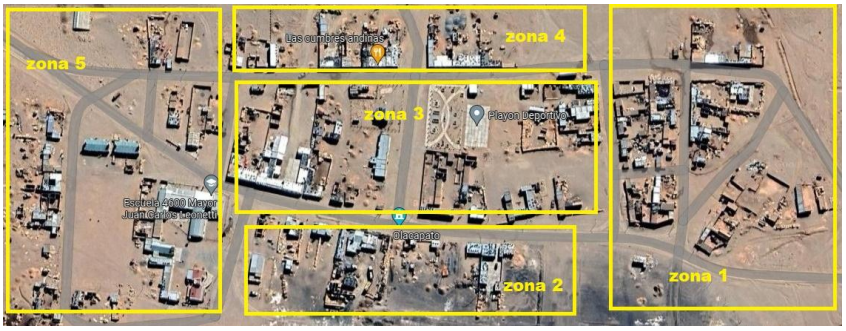


Figura 4: Foto satelital del poblado de Olacapato. Fuente: elaboración propia en base a Google Maps

Luego del viaje, con colaboración de los integrantes de los proyectos de investigación, se elaboró la matriz de datos para su posterior sistematización. Del análisis de la información recolectada, se elaboraron cruces de variables para responder a los interrogantes propuestos.

Para analizar los datos obtenidos, se recurrió al análisis estadístico descriptivo. El análisis se realizó por medio de la observación de la matriz de datos y la aplicación de criterios interpretativos relacionados con los conceptos teóricos y con la información recolectada. A partir de este, se determinaron algunos cruces de variables que, bajo la mirada analítica, arrojan información acerca de las categorías infra y supra hábitat y sobre las expectativas que emergen de las respuestas de los pobladores. El análisis estadístico descriptivo se combinó a su vez con el análisis sociológico y la interpretación de las conversaciones en el marco de la encuesta y las observaciones realizadas en el campo. Los resultados compartidos aquí retoman centralmente los bloques 2 y 4 de la encuesta.

RESULTADOS

Condiciones sociodemográficas: la cuestión de la Identidad y la situación socioeconómica

De acuerdo con el Censo 2022 (Indec, 2024) en Olacapato no viven más de 300 personas, sin contar aquellos trabajadores mineros migrantes que se alojan por temporadas de alta demanda. La mayoría de la población son mujeres (ver figura 5), que se dedican a tareas de cuidado y a la prestación de servicios domésticos.

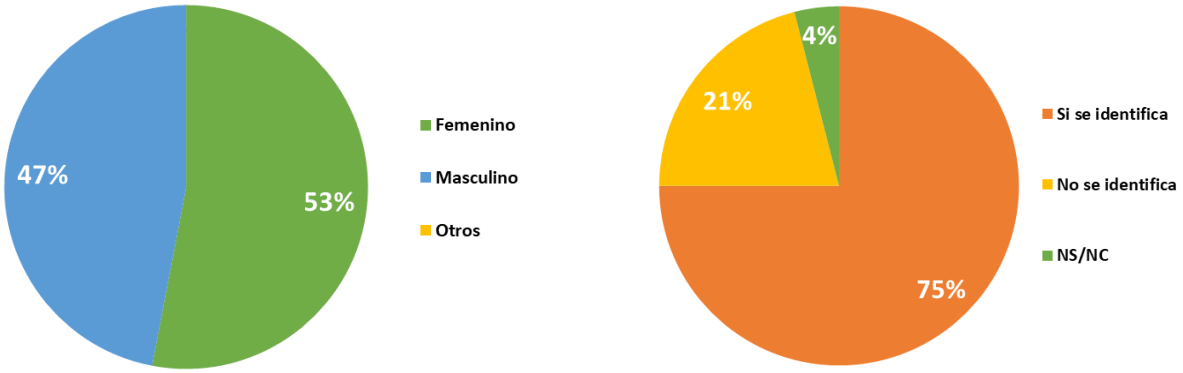


Figura N°5: Género de los pobladores de Olacapato e identificación con la comunidad Kolla Qewar. Fuente: Elaboración propia.

La dimensión de identidad, y su autopercepción con el pueblo *Kolla Quewar,* representa una variable importante de destacar, pues, más adelante será insumo para comprender la relación del pueblo con la actividad minera. Como se puede observar en la figura N°5, la mayoría se autopercibe indígena originario (75%), mientras que el 21% no reconoce un vínculo con la comunidad ancestral.

En cuanto a la situación laboral de los pobladores de Olacapato, en primer lugar, se indagó sobre si cuentan o no con trabajo (ver figura 6). El 61% señaló que cuenta con trabajo formal asalariado, mientras que un 39% dijo que no. Además, en conversaciones informales, muchos de los encuestados señalan que esto es positivo y mejora desde la llegada de inversiones mineras. El 39% que señaló no trabajar se compone, en su mayoría, por mujeres adultas que cumplen tareas de cuidado. Además, se observa la persistencia de hogares donde el proveedor es el varón, cabeza de familia y único aportante de dinero.

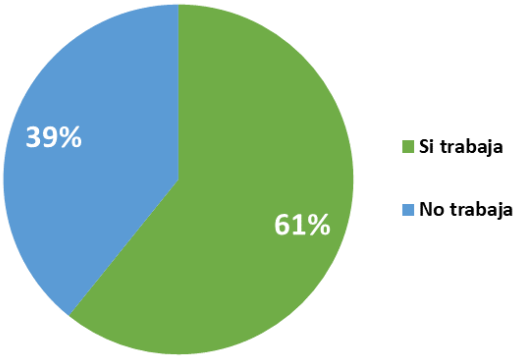


Figura 6: Situación laboral de los pobladores de Olacapato (Si: tiene trabajo. No: no tiene). Fuente: Elaboración propia.

De esta variable se desprende la figura 7, en la que el objetivo fue conocer en qué rubro se desempeñan quienes sí cuentan con trabajo en el pueblo. Este dato da cuenta del impacto de dos grandes sectores que ofrecen trabajo: el Estado (16% la Escuela y 23% la Municipalidad) y la minería (29%). Además, si revisamos otras opciones como hotelería (3%) y otros -que incluyen servicios de proveedores locales- (23%) suman más porcentaje en rubros vinculados con la actividad extractivista.

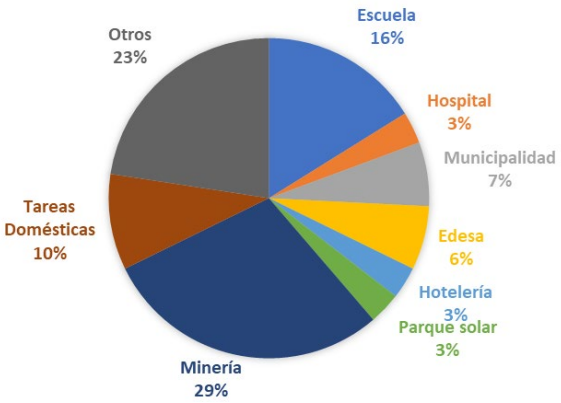


Figura 7: Rubros laborales de los pobladores con trabajo. Fuente: Elaboración propia.

En una población que, en su mayoría se considera como perteneciente a una comunidad originaria, es visible como la irrupción del Modelo Civilizatorio impone condiciones y formas de vida. Queda evidenciado desde un primer momento, como la actividad minera y sus derivados configuran las formas de habitar, diferenciándose de las prácticas ancestrales como pastoreo y cría de animales y la vida en comunidad. Aquí la tensión entre lo supra (nuevas formas de habitar el territorio y relacionarse con él) y lo infra (las condiciones identitarias ancestrales que preconfiguran el vínculo con la tierra que es objeto de extractivismo minero) da cuenta de una reconfiguración en la producción social del hábitat.

Situación del servicio energético en Olacapato

Como se dijo antes, el pueblo de Olacapato cuenta con la mayoría de los servicios y su acceso es casi total. Pero, como hemos mencionado antes, el servicio eléctrico se interrumpe 15 minutos a las 6 de la mañana y a las 18 hs. Una porción importante de los encuestados, el 94 % tiene tan naturalizada esta rutina cotidiana, que respondieron que no poseen interrupciones en el servicio (ver figura 8). Esto tiene relación con la historia del pueblo y su servicio eléctrico que hasta 2010 sólo cubría 12 horas diarias (de 6 a 18 hs.). La experiencia de acceso al servicio eléctrico colabora en la evaluación de la calidad y frecuencia del servicio.

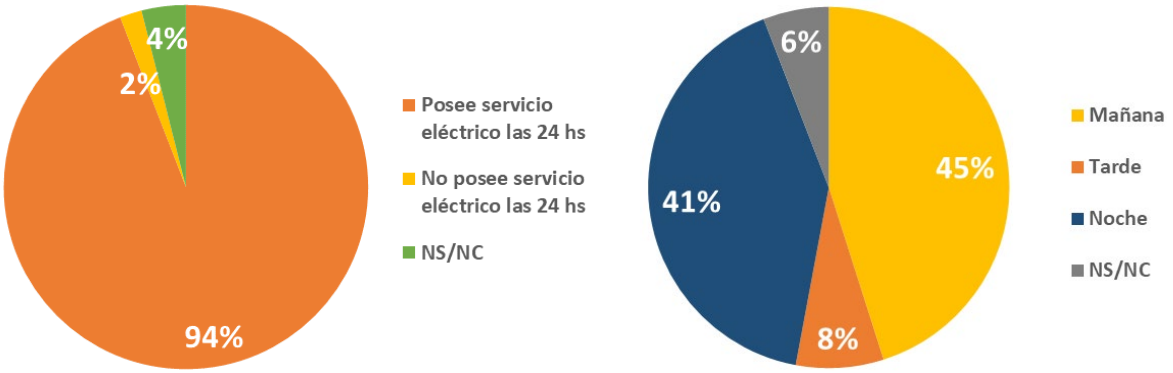


Figura 8: Interrupción del servicio energético y momento de mayor uso energético. Fuente: Elaboración propia.

Considerando estas interrupciones que tiene el servicio eléctrico, se indagó sobre cuál es el momento del día en que más utiliza la energía eléctrica (ver figura 8). El 45% señaló que por la mañana y un 41% por la noche.

Los resultados de la figura N°9 se cruzaron con la variable de género y eso confirmó la sospecha de que las mujeres hacen mayor uso del servicio eléctrico durante la mañana (ver figura 9).

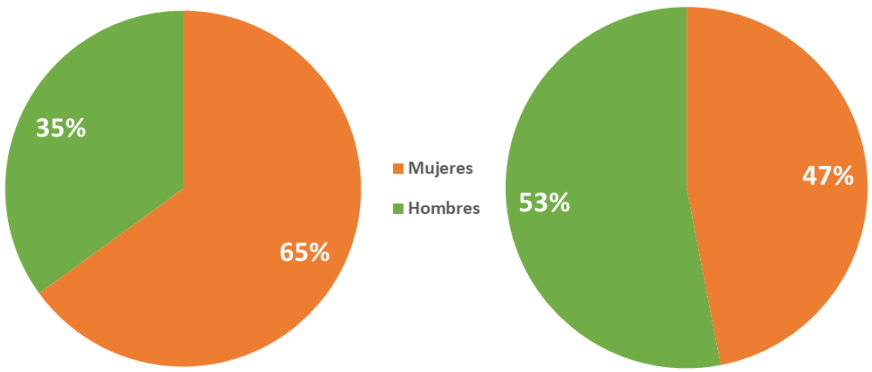


Figura 9: Mayor uso matutino con relación al género. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, son los hombres quienes hacen mayor uso del servicio eléctrico durante la noche (ver figura 9). Este dato no es menor, pues el uso de electrodomésticos y el aseo, son actividades de alto consumo energético. Si las actividades no se distribuyen más o menos durante el día, el servicio colapsa y se interrumpe. En los meses de mucho frío esto suele suceder cuando se incrementa el uso de estufas.

En línea con el tipo de uso de la energía según género, corresponde determinar el tipo de energía empleada. La principal fuente es la energía eléctrica y esto se expresa en un 66% (ver figura 10). Mientras que la segunda fuente es el gas natural domiciliario y representa un 22%. El uso de la leña y otros recursos representa menos del 10% cuando se les consulta por la fuente principal. Sin embargo, los testimonios señalan que para calefacción de los ambientes se utilizan braceros a base de leña o carbón. Esto se erige como una fuente secundaria y complementaria, pero no menos importante considerando las bajas temperaturas puneñas (hasta -20° durante las noches del invierno).

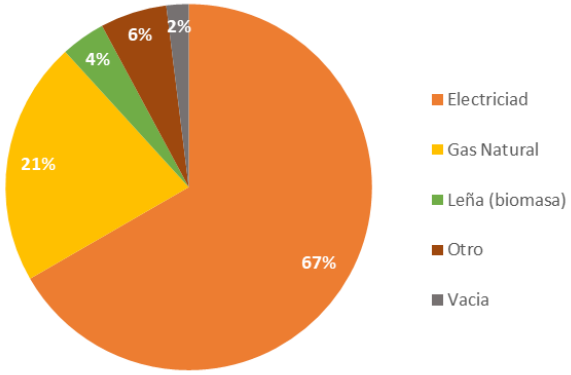


Figura 10: Principal fuente de energía. Fuente: Elaboración propia.

Expectativas con relación al acceso a la energía

Para conocer la experiencia subjetiva de acceso a la energía se diseñó una variable que consultó sobre palabras que asociaran con "Energía" y luego se les pidió que explicasen. Más de la mitad asoció "Energía" con "Servicio" (ver figura 11) y al explayarse en la justificación sostuvieron argumentos relacionados con el espíritu intrínseco de oferta y demanda en el servicio eléctrico. Algunas de las frases fueron: "*nada es gratis, algo hay que pagar*", "*todo sale caro y debemos comprar la electricidad*", "*si fuera gratis cualquiera tendría*". En estas aseveraciones queda latente el enfoque occidental sobre bienes y servicios como transacciones en las relaciones, emergiendo con claridad un elemento supra hábitat.

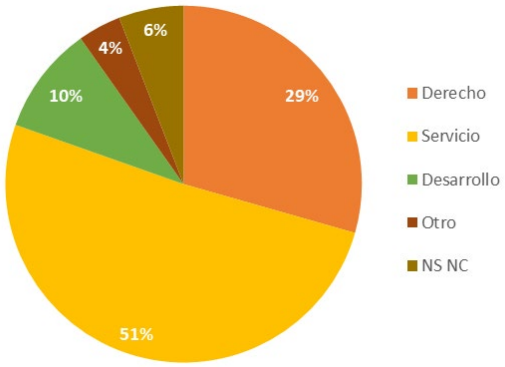


Figura 11: Palabra asociada a "Energía". Fuente: Elaboración propia

Para profundizar los sentidos se les pidió a los encuestados que indiquen cómo era su acceso a la energía antes de la instalación de las plantas fotovoltaicas (ver figura 12). El 41 % respondió que era buena que un 27 % señaló "no sabe/no contesta", un 16% dijo que la experiencia fue mala y otro porcentaje idéntico advirtió que "no recuerda". Ensayando una explicación para la configuración de esta variable se advierte que la implementación de este tipo de preguntas puede orientar respuestas vergonzantes. El encuestador es otro ajeno que expone una realidad. Esto se comprobó al finalizar el operativo de relevamiento. La mayoría de los encuestados, sobre todo los mayores de 30 años advirtieron que si recordaban pero que les daba vergüenza comentar que hasta hace unos años no contaban con energía eléctrica.

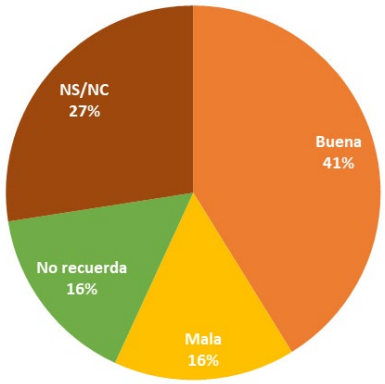


Figura 12: Experiencia previa a las plantas. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto la instalación de las plantas solares vecinas, se les consultó si consideran que estas deberías inyectar energía de manera directa a Olacapato. El 94% consideró que "si" (ver figura 13).

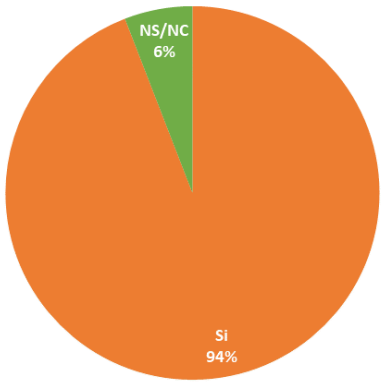


Figura 13: Recepción de energía de las plantas. Fuente: Elaboración propia.

Al indagar sobre los argumentos que conducen a pensar que las plantas deben inyectar energía directa, el 37% indicó razones vinculadas a lo "Económico" (ver figura 14). Esto se sostiene en una percepción que asume lo costoso que les resulta el servicio eléctrico en comparación con quienes reciben electricidad del suministro conectado al SADI (Sistema Argentino de Interconexión). Luego, el 23% "no sabe o no contesta".

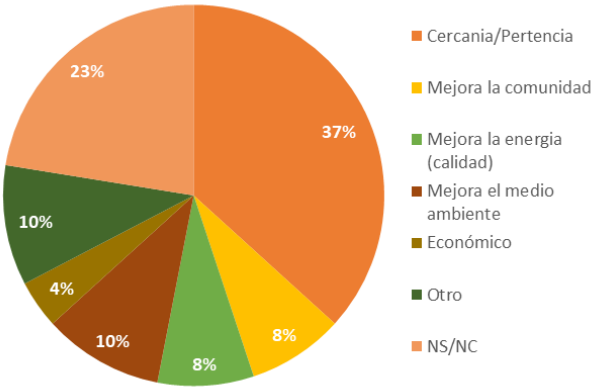


Figura 14: Razó4n de la recepción de energía de las plantas. Fuente: Elaboración propia.

En el sentido se les consultó si, como consecuencia de la instalación de la Planta Cauchari, pensaban que mejoraría su acceso a la energía (ver figura 15). Un contundente 74% señaló que "Si", que la instalación y funcionamiento de la planta solar mejoraría su acceso a la energía. Este porcentaje se reafirma en lo expresados por referentes de la comunidad, quienes asumieron "cierto derrame de desarrollo y modernización". Aquí, nuevamente opera el Modelo Civilizatorio Moderno Colonia, configuran el elemento Supra Hábitat. Se relaciona la mejora del hábitat con la instalción de un elemento externo a la comunidad, traído desde un lugar moderno a uno no moderno.

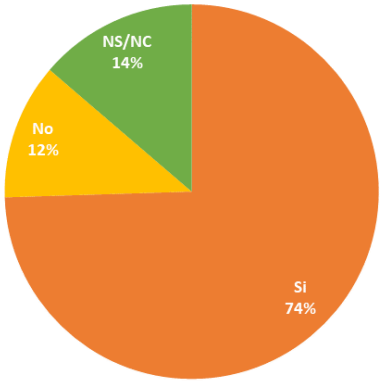


Figura 15: Expectativas ante la instalación de las plantas. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se les preguntó por el cumplimiento de esas expectativas (Ver figura 16). La mayoría considera que no se cumplieron: un 57% señala que "nada" y un 15% "poco". Este último porcentaje puede asociarse con quienes consideran que las expectativas se cumplieron "mucho" (12%) y "Regular" (12%). Resulta interesante revisar los motivos de quienes consideran que las expectativas se cumplieron "poco", "mucho" y "regular". Estos se apoyan en enunciados esperanzadores y de paciencia: "ya nos van a ayudar", "va de a poco", "no se puede todo de una vez".

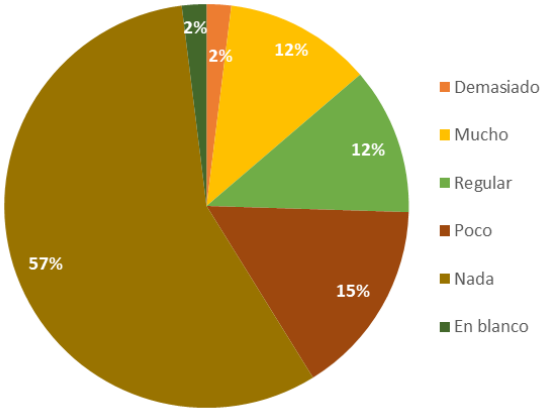


Figura 16: Cumplimiento de las expectativas. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La experiencia de habitar la puna, como región andina, se produce en condiciones diferentes a las "normales" urbanas/occidentalizadas que impregnan los sentidos de un buen hábitat promovidos por políticos, científicos y activistas. Pero es innegable la reconfiguración en la producción del hábitat, producto de elemento del modelo civilizatorio. En este trabajo se pude observar cómo lo supra y lo infra hábitat tensionan un modo de habitar que se dirime entre concepciones andinas y versiones "modernas". Lo supra hábitat se expresa con firmeza en la concepción de la energía como servicio, mientras se tensiona con la idea de que las plantas deben inyectar energía al pueblo.

Lo infra hábitat emerge en la demanda de inyección de electricidad directa desde las plantas motivada por un sesgo económico pero que no acepta el límite jurisdiccional que señala que Olacapato pertenece a Salta mientras la Planta Cauchari a la Provincia de Jujuy. Sucede que el territorio, en términos culturales, es preexistente a los estados provinciales. Olacapato forma parte del territorio andino Kolla y sus relaciones de reciprocidad impregnan aún algunas prácticas.

Respecto de la experiencia de acceso a la energía, la misma no cumple estándares de calidad urbanas (suministro de electricidad permanente, continuo y seguro) y la instalación de las plantas solares abrió un intersticio que esperanzó al pueblo (Gonzalez, 2020). Las expectativas no se cumplieron, a pesar de convivir con los paneles fotovoltaicos diariamente, como vecinos inmóviles, el suministro eléctrico no mejoró. Los expertos advierten lo costoso, técnica y económicamente, de esta posibilidad.

Usar la heladera, el microondas y prender el lavarropas al mismo tiempo resulta una experiencia común en las ciudades argentinas, pero en Olacapto es un evento que aún no resulta viable. Y es que parece que, efectivamente, para el Estado, allí había un desierto y las poblaciones dispersas no eran objeto de políticas de electrificación. Sin embargo, con el "boom" del litio y la minería, se abre una posibilidad de visibilización. Sin desconocer las potenciales consecuencias negativas de esta actividad, la región tiene una oportunidad de mostrarse y participar de decisiones que mejoren sus condiciones de hábitat.

REFERENCIAS

Bonifacio, C. E., Gonzalez, F. D. F., Miller, J., & Orte, A. I. (2024). De la Puna al Mundo: Energía Solar Fotovoltaica en Salta. Imaginarios de Transición Energética en el Pueblo Kolla de Olacapato (2023). En *XXI Encuentro Nacional de Carreras de Comunicación (ENACOM)* (p. 20).

Cea D'Ancona, María Ángeles (1992). Metodología Cuantitativa: Estrategias Y Técnicas De Investigación Social. Madrid: Síntesis.

Cena, J.C. (2003). El ferricidio. Buenos Aires: La Rosa Blindada.

Gonza, C.; González, F.; Durán, P. (2022). "Hábitat, pobreza energética y mujeres indígenas en el norte argentino: una propuesta interseccional para comunidades en zonas rurales aisladas del chaco salteño". Hábitat y sociedad, 15, 183 - 209. https://doi.org/10.12795/HabitatySociedad.2022.i15.09

Gonzalez, Facundo (2020) Producción y circulación de sentidos en la configuración de las dimensiones supra e infra hábitat. Experiencias de producción de hábitat en la Puna y en el Chaco salteños a partir de proyectos de extensión con la comunidad Kolla de Hurcuro y el pueblo Wichí de El Cocal (Salta, 2017-2018) Tesis (Doctor en Estudios Sociales de América Latina). Córdoba, Argentina, Universidad Nacional de Córdoba, pp 1-350. González, F.; Picabea, F.; Durán, P. (2023). "Sentidos en torno a la dimensión energética en procesos de producción de hábitat en territorios indígenas en la provincia de Salta". Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Salta.

González, F. y Rodríguez, N. (2020). "Fundamentos teórico-metodológicos en la producción de hábitat en territorios interculturales: experiencias de extensión universitaria en Salta (2017-2019)". Perspectivas Revista de Ciencias Sociales. Año 5, Nro. 9, Enero-Junio 2020, pp. 691-723.

González, F.; Sarmiento Barbieri, J.; Frascarolli, C. (2023). "LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA COMO PROBLEMA SOCIAL: UNA APROXIMACIÓN DESDE LA ECONOMÍA POLÍTICA". Revista ERMA.

INDEC (2024). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Resultados definitivos. Fecundidad. Edición ampliada. Mayo de 2024

JEMSE (6 de septiembre de 2020). PARQUE SOLAR CAUCHARI INICIÓ OPERACIONES COMERCIALES EN ARGENTINA. Recuperado el 18 de mayo de 2024, de Jemse: https://jemse.gob.ar/2020/09/30/parque-solar-cauchari-inicio-operaciones-comerciales-en-argentina/

Ottavianelli, E.; González, F.; Cadena, C. (2021). "Hábitat y pobreza energética en zonas rurales aisladas en el noroeste argentino". Ciencia Latina, vol. 5. México.

Svampa, M. y Bertinat, P. (2022). La transición energética en Argentina. Siglo XXI Editores. Bs. As.

Vercelli, A. y Thomas, H. (2008). Repensando los bienes comunes: análisis socio-técnico sobre la construcción y regulación de los bienes comunes. Scientiae Studia, 6, 427-442.

Vicejefatura de Gabinete del Interior de Argentina (1 de octubre de 2019). Recuperado el 01 de julio de 2024, de https://www.argentina.gob.ar/noticias/se-inauguro-el-parque-solar-cauchari-en-jujuy-que-dara-energia-renovable-160000-hogares

EXPECTATIONS OF THE INHABITANTS OF OLACAPATO (SALTA, ARGENTINA) IN RELATION TO THE INSTALLATION OF LARGE SOLAR PLANTS IN THEIR TERRITORY

ABSTRACT: The Argentine Puna, due to its levels of solar radiation, is an ideal scenario for the installation of Photovoltaic Plants. The advance of lithium mining makes it a formidable territory for energy generation. For this reason, the region is experiencing the arrival of investments and the development of a new industry for local communities. In this article we analyze the experience of the community of Olacapato (Salta, Argentina) in relation to the installation of the Cauchari Solar Plant. It is of main interest to take up the expectations of local people and rebuild their conditions of access to energy. The notions of Supra and Infra habitat, as ways of understanding habitat production, directed the fieldwork, which consisted of 3 stages: approach and participant observations, deployment of interviews and conversations with referents, and survey in the community. The work presents partial results of the survey. The experience in accessing energy set high expectations in relation to the improvement of their conditions: the installation of a solar plant in their territory (although different jurisdictional) should improve the service. At the same time, local practices, uses and customs stress the relationships between solar plant-community and community-referents.

Keywords: solar energy, technology, transition and education.

ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 28, pp. 501-512, 2024, ISSN 2796-8111
ASADES 2024

CO-DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN DESHIDRATADOR MODULAR HÍBRIDO EN LA COMARCA ANDINA

Lucas Zanovello[1], Santiago Martinez[1], Verónica Chillo[2], Manuel Goglino[3], Julieta Caló[3], Valeria La Manna[3], Paloma Elena[3], Mercedes Ejarque[1]
[1]Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Agricultura Familiar Región Patagonia (IPAF Patagonia) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Autovía 22 s/n, Colonia San Francisco, Plottier, Neuquén, CP8316
[2]Agencia de Extensión Rural El Bolsón del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA - AER El Bolsón), Mármol 50, El Bolsón, Río Negro, CP8430
[3]Instituto Nacional de Tecnología Industrial sede Bariloche. (INTI Bariloche). Rolando763 1A, Baroloche, Río Negro, CP8400
Tel. 011-40350087 – e-mail: zanovello.lucas@inta.gob.ar

RESUMEN: El presente trabajo comprende los aportes a la resolución de la problemática productiva priorizada por un grupo heterogéneo de familias productoras de alimentos, fitopreparados[1] y aromáticas de la Comarca Andina en la Patagonia argentina: la conservación y el agregado de valor de sus productos. Mediante la conformación de un grupo interdisciplinario y la aplicación de técnicas de diseño participativo en un proceso de adecuación tecnológica, se diseñó, fabricó y evaluó un deshidratador híbrido que permite el secado en condiciones ambientales no favorables. La realización de una serie de talleres con participación de productores y técnicos locales se tradujo en un programa de diseño, adecuando las variables a los usuarios finales de los equipos de deshidratado. La estrategia de abordaje llevó a un diseño abierto que se traduce en una estrategia de comunicación que permite la replicación por parte de otros usuarios y fabricantes. A su vez se escogió una configuración modular considerando la posible expansión de los cultivos y el uso comunitario. De acuerdo a los resultados obtenidos en los talleres se utilizaron las dos fuentes de energía de mayor disponibilidad para la realización del proceso. Luego de su fabricación se realizó una prueba de secado en uno de los deshidratadores bajo condiciones adversas obteniendo resultados acordes a lo esperado para los productos evaluados.

Palabras clave: Diseño participativo, adecuación tecnológica, deshidratado solar, agricultura familiar, agregado de valor.

INTRODUCCIÓN

El deshidratado de alimentos, aromáticas y fitopreparados es uno de los procesos más antiguos de conservación. Este proceso es parte de las estrategias de diversificación de las familias agricultoras permitiéndoles reducir el desperdicio, optimizar el aprovechamiento de lo cultivado y lo recolectado, y garantizar el consumo de estos productos en los momentos más necesarios (Juan Pérez, 2013; Lermen et. al. 2020).
Existen numerosas técnicas para realizarlo, algunas tradicionales que se transmiten oralmente y mediante la fabricación de infraestructuras como tenderos, y otras técnicas que se realizan con la

[1] Se entiende por fitopreparado a aquellas preparaciones elaboradas a partir del uso de productos de origen vegetal, para la utilización y consumo humano con fines cosméticos, alimenticios y de prevención, cura o alivio de afecciones de la salud. El deshidratado de estos compuestos debe hacerse teniendo en cuenta temperaturas máximas para evitar el deterioro de enzimas y proteínas.

asistencia de equipamientos diseñados especialmente para realizar la tarea (Bhur et al. 2000). Sin embargo, la falta de técnicas e infraestructura para el procesamiento y aprovechamiento de los alimentos es una de las principales causas que generan su desperdicio (FAO, 2012)

En la región patagónica, algunas investigaciones evidenciado cómo el cultivo de aromáticas puede contribuir a la diversificación productiva en las familias agricultoras (Ríos et al., 2020), la importancia en la terapéutica popular del uso de plantas medicinales (nativas y exóticas) (Cuassolo et al., 2009) y el creciente desarrollo de la fitocosmética, ligada a valores de calidad, cuidado ambiental y comercio justo (La Manna et al., 2021).

En la Comarca Andina, territorio que abarca desde Dina Huapi en Río Negro hasta Epuyén en Chubut (Figura 1), se cultivan 101 hectáreas de hortalizas por parte de 2.619 familias productoras, con una producción total anual estimada en 3.405 toneladas (Cardozo et al., 2022). Asimismo, hay 94 emprendimientos de fitopreparados de pequeña escala: 32 en Bariloche y 62 en la Comarca Andina. La mayoría se encuentran a cargo de mujeres y desarrollan varias actividades, que van desde la producción y recolección hasta la comercialización (local-regional a través de contactos, internet, ferias y comercios locales). Debido a las condiciones climáticas (nevadas invernales, escasa exposición solar en otoño-invierno y acotados períodos libres de heladas), tanto la producción como el proceso de secado se concentra principalmente en el verano. Sin embargo, la afluencia turística en la temporada estival, atraída por los paisajes naturales y en búsqueda del consumo de alimentos regionales que asocian a criterios de naturalidad y salud, y la presencia de un segmento de consumidores locales que valorizan estas mismas características (Ejarque, 2024; Ejarque et al. 2022; Ladio et al., 2013), generan oportunidades para la comercialización de productos cultivados y elaborados a partir de materias primas locales.

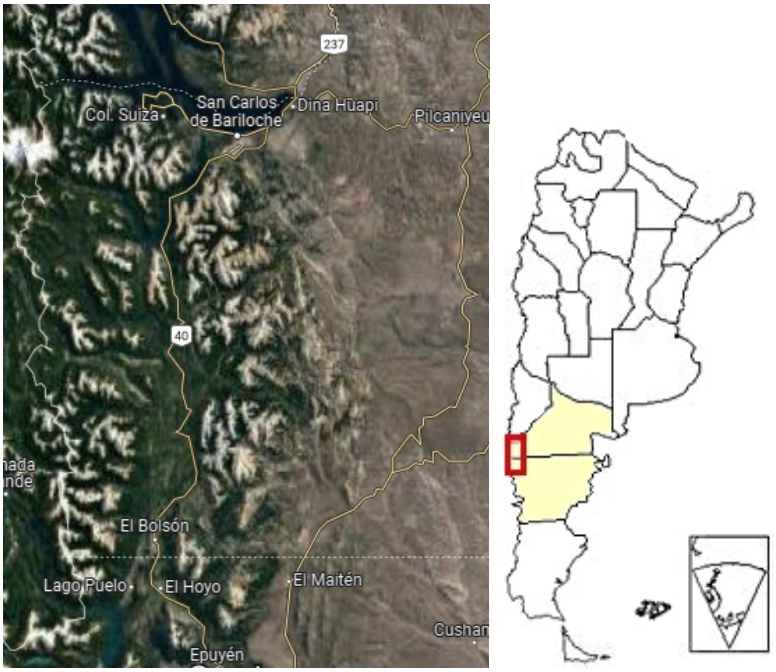


Figura 1. Área de influencia del proyecto: Comarca Andina del paralelo °42 hasta la zona de Villa Llanquín

Sin embargo, en el territorio nacional no existe una oferta comercial de equipamiento para el deshidratado solar a escala predial o familiar, sino que sólo se encuentra de escala industrial que funcionan con electricidad o gas natural como fuentes exclusivas de energía. El público objetivo de estos equipamientos son procesadores de alimentos, pero los productores familiares no logran tener acceso a los mismos por la inversión necesaria y el costo operativo. Por otro lado, existen a su vez numerosos antecedentes de diseños de deshidratadores solares que se ajustan a escalas familiares, pero que no responden a las condiciones ambientales, de uso y fabricación de los potenciales usuarios de la región y que no se encuentran disponibles comercialmente, sino para autoconstrucción en el mejor de los casos (INTI, 2007; Escalante et al., 2012).

Tomando en cuenta esta problemática priorizada por los productores, agentes del INTA e INTI locales propusieron desarrollar prototipos de deshidratadores para el secado de materias primas locales adaptados para la producción familiar del área cordillerana del sudoeste de Río Negro (Figura 1). Para alcanzarlo formularon un proyecto que fue financiado desde el Programa Federal de Inversiones bajo la coordinación de COFECyT (EX-2021-60338529-APN-DDYGD#MCT) que plantea los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las características, necesidades y requerimientos de las/os usuarios/as y sus sistemas productivos.
2. Co-diseñar y validar prototipos de deshidratadores.
3. Evaluar la usabilidad, accesibilidad y eficiencia de los prototipos.

El co-diseño se define como un proceso de creación colectiva que incorpora a los usuarios finales o partes interesadas en el diseño de un producto o servicio, colaborando durante todo o partes del proceso con los diseñadores profesionales y los expertos de otros ámbitos, para encontrar las soluciones más adecuadas a sus necesidades y problemas situados (Pelta Resano, 2022). Para ello, un equipo interdisciplinario, interinstitucional e interactoral trabajó en el diseño y desarrollo de deshidratadores solares adecuados a las capacidades constructivas locales, a las fuentes de energía disponibles y adaptables a los requerimientos de secado de cada producto. Mediante este proyecto se buscó dar respuesta a las demandas de los entramados productivos de la región, con el desarrollo de tecnologías de proceso e innovación que agregan valor a las materias primas locales (plantas nativas y exóticas, de cultivo y recolección) y permiten la producción de fitopreparados cosméticos, medicinales y alimenticios.

METODOLOGÍA

Diagnóstico y proceso de co-diseño

Se realizaron dos talleres de planificación participativa (Pelta Resano 2022), en el que participaron en total 24 productores y productoras. Uno se realizó en El Bolsón (Río Negro), convocado por el grupo de Cambio Rural Fitopreparados y Hierbas de la Comarca Andina; y el otro se hizo en Bariloche (Río Negro) con la Comunidad Millanlonco - Ranquehue, participantes de la Feria Franca y de la Huerta Intercultural. Cada taller se dividió en varias etapas siguiendo las que plantea Burns (1979) como etapas necesarias de un proceso de diseño participativo: (1) Conciencia, (2) Percepción, (3) Toma de decisión, (4) Implementación. En los primeros momentos se hizo una introducción a las cadenas de producción y al proceso de deshidratado por parte del equipo técnico, a los fines de unificar el lenguaje y establecer criterios en común para abordar el diseño futuro (1). Luego se realizó una encuesta autoadministrada por quienes participaban de los talleres, para recolectar información general sobre los establecimientos, los productos que elaboran, los problemas de conservación que afrontan y las capacidades que los/as productores/as tienen actualmente para deshidratar (2). A continuación, se llevó a cabo una sensibilización sobre las tipologías de deshidratadores, sus ventajas y desventajas, y los productos finales o intermedios secos que se pueden obtener. Por último, se trabajó en grupos para el co-diseño, intercambiando acerca de la estacionalidad de las tareas de cultivo, cosecha y deshidratado de las diversas hierbas, flores y frutos cultivados y recolectados. También se discutió sobre el formato más adecuado de los equipos de deshidratado (3). Esta instancia se cerró con un trabajo en plenario, donde se presentaron los resultados de la discusión en grupos y se construyó un calendario consensuado de cosecha y secado para cada especie mencionada. Las participantes también tomaron decisiones acerca del diseño adecuado de los deshidratadores (4). Todo lo acontecido en el taller fue registrado en notas de campo y audiovisuales y luego fue procesado en una matriz cuantitativa en Excel por parte del equipo técnico. Los resultados fueron analizados y se identificaron los elementos centrales para tener en cuenta a la hora del diseño y fabricación de los prototipos. Los resultados fueron traducidos a distintas propuestas formales para ser evaluadas por algunos participantes (4), mediante una instancia virtual.

Evaluación térmica del deshidratador

En una segunda instancia, con los resultados del proceso de diseño, fabricación e instalación de los deshidratadores, se realizó una evaluación de funcionamiento. Para llevar a cabo el ensayo se tomaron

cuatro productos de estación provistos por el Centro de Educación Agropecuaria Nº3 (CEA3) obtenidos de su producción hortícola, estos fueron zanahoria rallada, remolacha rallada, ajo puerro picado y hojas de menta. Se dispusieron los productos en bandejas individuales y se pesaron. Para el pesado de los productos en las distintas etapas, se utilizó una balanza de cocina y se montó la bandeja de cada producto sobre un recipiente plástico dispuesto sobre la platina de la balanza. Los productos se pesaron previo al comienzo del ensayo y se pesaron en intervalos de 1h hasta finalizar el mismo (Figura 2).



Figura 2. Procedimiento de pesado de los productos. Frecuencia: cada 1h.

Los parámetros que se midieron fueron temperaturas, humedad ambiente, humedad y flujo de aire a la salida del deshidratador. La temperatura se registró con 4 dataloggers de tipo *ebuttons* dispuestos en la entrada de aire al colector, en la salida del colector previo a las resistencias, a la salida del gabinete de temperatura deshidratado y en el interior del gabinete (Figura 3). Los dataloggers registraron mediciones de temperatura en intervalos de 10 minutos a lo largo del ensayo. A su vez, se registró la temperatura interior y exterior al recinto donde se realizó el ensayo con un sensor programable del tipo DHT11 conectado a un Arduino Mega. Las mediciones realizadas con este sensor se realizaron en intervalos de 15 minutos a lo largo del ensayo. La velocidad del flujo de aire a la salida del deshidratador se registró con un anemómetro de la marca Testo modelo 410 i, montado sobre una de las salidas de aire ubicadas en la parte superior frontal del equipo. Por último, se tomó registro de la radiación solar con un piranómetro marca HT Instruments modelo HT204 ubicado sobre la superficie colectora en el exterior del recinto, copiando la inclinación del colector. Con la finalidad de conocer la potencia eléctrica consumida por las resistencias eléctricas, durante todo el ensayo se midió el valor acumulado del consumo eléctrico con un voltímetro digital monofásico. El ensayo tuvo una duración de siete horas y se monitoreó el funcionamiento del equipo durante toda su duración.

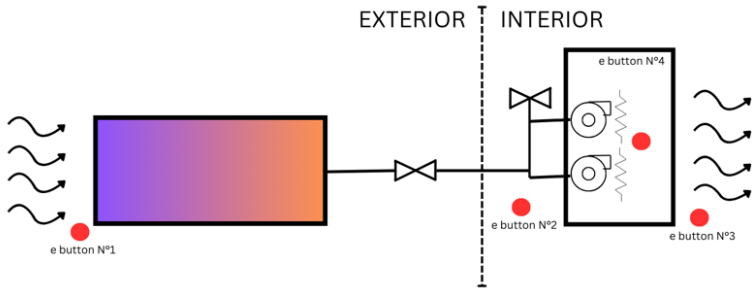


Figura 3. Diagrama unifilar de la instalación con ubicación ilustrativa de los ebuttons

RESULTADOS

Aportes del diagnóstico al proceso de co-diseño

Según la información recogida en las encuestas realizadas, participaron de los talleres mayormente mujeres (79%), con edades que iban entre los 33 y los 65 años, siendo el promedio los 44 años de edad. Estos resultados son coincidentes con el perfil de productores de aromáticas en la región (Elena, La Manna, Barbosa, Mazzoni, Cardozo y Tula, 2021). Habitan en áreas muy diferentes, desde los valles de secano, como Villa Llanquín, hasta las laderas del bosque andino patagónico, como en Lago Puelo o Epuyén.

Respecto a las tareas relacionadas con el secado y la deshidratación, se observaron tres distintas situaciones: quienes llevan adelante las acciones de forma individual; quienes las comparten con otros integrantes de la familia; y los que se dividen con un socio o empleados. La actividad del deshidratado se concentra en los meses estivales, inmediatamente posterior a la cosecha o recolección. Esta materia prima es mayormente obtenida a través del cultivo, aunque en algunas especies silvestres se destaca la actividad de recolección (principalmente en los hongos, la paramela y el pañil). Esta superposición temporal, y las limitantes de espacio que la mayoría declaran tener, hace que las productoras deban priorizar con qué productos trabajar.

Se registraron 52 especies que se deshidratan actualmente, incluyendo flores, frutos, raíces, hojas y hongos. Cada establecimiento trabaja con entre 5 y 6 especies, aunque esta situación es diversa ya que se encuentran tres que solo deshidratan un producto y cuatro que ocupan siete especies o más. Lo mismo sucede con el volumen a deshidratar, cuya media es de 36,4Kg, pero oscila entre el 1Kg y 278Kg. La tabla 1 sintetiza la cantidad de productores/as y el volumen total a deshidratar por cada especie.

Tabla 1: Principales especies deshidratadas, fuente propia 2021.

Especie	Cant. de Productores	Volumen total (kg)
Caléndula	13	22,71
Lavanda	11	319
Romero	11	168,21
Pañil	7	6,71
Hipericum	6	67,05
Menta	5	12,21
Orégano	5	4,21
Salvia	4	9,5
Llantén	4	4
Malva	4	2,5
Hongos	3	45
Mosqueta	3	11
Paramela	3	8,2

Especie	Cant. de Productores	Volumen total (kg)
Lúpulo	3	3,21
Rosas	3	1
Tomillo	3	0,71
Otros	16	240,5
Total	**24**	**875,7**

Al igual que con los volúmenes, la determinación del tiempo que destinan a esta tarea mostró imprecisiones y dificultades de cálculo. Esta situación se debe probablemente a la superposición de importante presencia de tiempos de espera (mientras se deja el producto en la máquina o lugar de desecado) y la desvalorización del tiempo de trabajo, ya que se encuentra combinada la realización de esta tarea con otras actividades domésticas y/o productivas al encontrarse en el hogar o la chacra.

La mayoría de las participantes (71%) conoce tecnologías que les podrían resultar convenientes para su producción, como el secado o el deshidratado solar, el secado en ramilletes, a la sombra y ventilado (especialmente para aromáticas), en cajas con ventilación (para flores) y la utilización de bandejas (metálicas o plásticas). Las primeras opciones son también las más utilizadas en la actualidad en los grupos.

Al consultar sobre la naturaleza de los problemas al deshidratar, con preguntas no estructuradas, surgieron una diversidad de situaciones vinculadas a la especialización del emprendimiento y a las características de la infraestructura actual de deshidratado. Se construyeron categorías para clasificar las problemáticas en tipologías que pueden ser abordadas desde el punto de vista del diseño de producto o de procesos. El 71% de los/as productores/as hizo mención a problemas con el equipamiento de secado/deshidratado que genera deficiencias o pérdidas de producto. En segundo lugar, el 46% sostiene que no tiene control sobre el proceso y el 42% menciona que las condiciones climáticas de la zona, en los momentos de deshidratar, no favorecen el proceso de secado natural y deshidratado. Las siguientes preocupaciones fueron la contaminación por vectores y la pérdida de propiedades organolépticas.

Solucionando estos problemas de deshidratado, 83% de las encuestadas mencionan que incrementarían el volumen de productos deshidratados, lo cual les permitiría en algunos casos, reducir el desaprovechamiento de cultivos que ya tienen disponible y en otros a incorporar nuevas especies. Algunas participantes también destacan que podrían mejorar las condiciones de trabajo y optimizar su tiempo y otras creen que mejoraría la calidad de los productos que ofrecen. El resto de las encuestadas (17%) sostuvieron que mantendrían su producción ya que es para autosustento y para tendrían que incrementar también la superficie de cultivo.

Respecto a las condiciones contextuales y técnicas, la encuesta arrojó que la fuente de energía con mayor presencia en el territorio es la energía eléctrica (75% de los establecimientos). El gas natural de red y licuado alcanzan sólo al 46% y 43% respectivamente. De las fuentes renovables, el 71% destaca que cuenta con radiación solar, el 50% cuenta con leña y el 38% destaca la disponibilidad de viento en sus establecimientos (Gráfico 1). Es de destacar que no se proyecta la ampliación de la red de gas natural por lo que es poco probable que esta situación cambie en el mediano plazo en la comarca.

Luego se consultó cuál de las fuentes mencionadas antes le resultaba más accesible, dado que el costo de obtención de la energía es diferente en cada caso porque hay quienes consiguen leña a un bajo costo de los bosques aledaños, quienes consiguen restos de poda y quienes no pagan el servicio de electricidad por problemas administrativos del prestador del servicio (Pobladores de Puelo y Epuyén). De esta manera, el acceso real a la energía no puede ser establecido a través de los cuadros tarifarios únicamente.

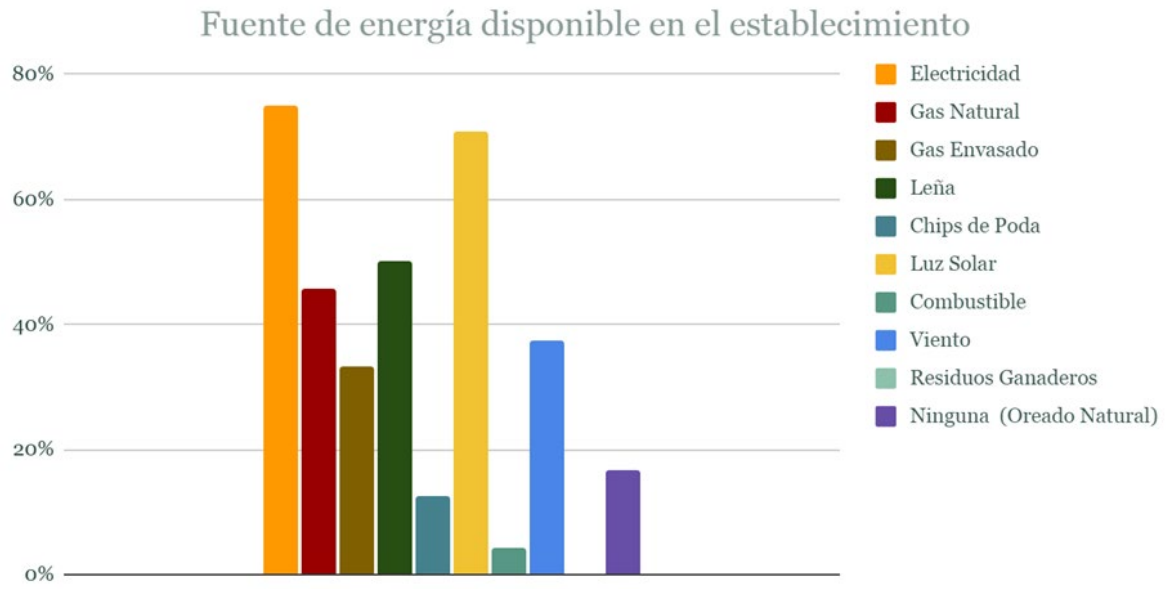


Gráfico 1. Fuente de energía disponible en los establecimientos 2021

Para considerar las capacidades de fabricación, operación y mantenimiento del equipo de deshidratado se consultó si existían capacidades para la construcción de herramientas e infraestructura en el establecimiento o con apoyo externo y cuáles eran estas especialidades. En el 54% de los establecimientos se manejan herramientas de carpintería y la tecnología de la madera, en el 42% de ellas se conocen técnicas de construcción natural (construcción con materiales naturales como madera, paja, barro, etc.). En menor medida (21%) hay capacidades de herrería y construcción tradicional. Entre las capacidades del grupo de apoyo, se destacaron la carpintería y la herrería.

En el intercambio durante los talleres sobre las características que preferían para el deshidratador, hubo consenso sobre las siguientes características: un deshidratador indirecto; con fuente de energía solar y eléctrico (híbrido), que sea manual a semiautomatizado; posible de ser fabricado por autoconstrucción y a partir del oficio de carpintería, y con bandejas planas. En cuanto a la escala, en los grupos de la Comarca Andina del paralelo 42º (El Bolsón, Lago Puelo, El Hoyo, Epuyén), se prefería por uno de tipo familiar, mientras que en Bariloche se optó por el comunitario. Allí se contempló la posibilidad de colocarlo en una institución "neutral"; o la de generar un deshidratador modular que diera respuesta a varias situaciones distintas.

DISEÑO Y FABRICACIÓN

El diseño se realizó tomando en cuenta los parámetros seleccionados en el proceso de co-diseño donde se tomaron las decisiones más relevantes respecto del formato y materialidad del deshidratador.
En función de los resultados de estas instancias, se consideró que el diseño del deshidratador debía tener:

- Tamaño familiar o movible, para que pueda ser utilizado en los hogares. El diseño resultante tiene una cámara de secado de 0,363m3. El volumen fue calculado de acuerdo al ritmo de cosecha de los diferentes productos y su estacionalidad.
- Modular para contemplar la posibilidad de ampliaciones de la escala frente a incrementos en la producción como resultado de la eliminación de problemas que se presentan en los procesos actuales de secado y deshidratado. El diseño modular del deshidratador permite diferentes configuraciones que podrán adoptarse según la necesidad en cada caso. El dispositivo está compuesto por 3 elementos principales: el gabinete, el colector solar y la estructura soporte. Estos se pueden combinar, reconfigurar o evitar según el caso (Figura 4).

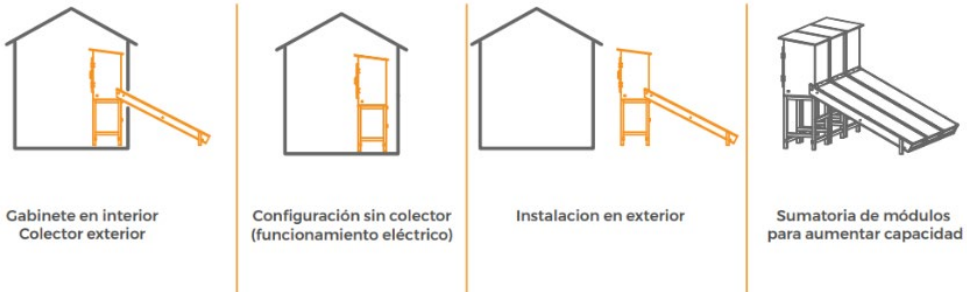


Figura 4. Posibles configuraciones de instalación del deshidratador modular. Fuente: Goglino, 2023.

- Proveerse principalmente de energía solar y complementarse con energía eléctrica. El colector solar tiene una superficie de captación 1,52m^2 con una superficie porosa de metal desplegado como intercambiador.
- Adaptarse a diferentes productos, considerando la diversidad que maneja cada una de las usuarias. Para ello se dispusieron 9 bandejas de borde alto que permite colocar frutos, hojas, raíces y flores, complementadas por 9 ganchos para colgar aromáticas en ramilletes.
- Utilizar materiales de bajo costo y procesos de fabricación de baja complejidad. La tecnología de la madera probó ser la de menor costo y mayor conocimiento en el área de estudio. Se emplearon aglomerados fenólicos y madera de pino ponderosa de vasta distribución en la zona.
- Diseño abierto apto para autoconstrucción o fabricado por taller de oficios para permitir que más productores reproduzcan o adapten el equipo. Para ello se realizaron un *manual de uso* y un *manual de fabricación* con toda la información relevante (Figura 5) (Goglino 2023).

.



Figura 5. Portadas de los instructivos de fabricación y uso de los deshidratadores

Se construyeron 3 prototipos que se entregaron a los grupos participantes del proyecto: la Comunidad Millalonco-Ranquehue (Bariloche), el grupo de elaboradores de Fitocosméticos del Programa de Cambio Rural (El Bolsón) y el Centro de Educación Agropecuaria N°3 (Mallín Ahogado). Los tres prototipos fueron instalados en lugares que permitieran el uso compartido o comunitario. En la comunidad Millalonco-Ranquehue, en la localidad de Bariloche, se instaló en un salón-matera con el gabinete hacia adentro del edificio y el colector en el exterior (*Figura 6a*). El grupo de Cambio Rural decidió instalarlo en la chacra de una de las productoras ubicadas en el Camino de los Nogales, cercano al centro de El Bolsón, ya que el resto de las productoras del grupo se encontraban en zonas alejadas. En ese caso el INTI acompañó con el diseño de una estructura pensada para la preparación de los productos (*Figura 6b*). El CEA N°3 tomó la decisión de instalarlo en la cocina del establecimiento donde se realizan los cursos de agregado de valor, con una adaptación en el colector ubicado afuera del establecimiento (*Figura 7b)* y el gabinete sobre mesada (*Figura 7a*).



Figura 6a) Deshidratador instalado en la comunidad Ranquehue en Bariloche. 6b) Deshidratador instalado en chacra de productora del Grupo de Cambio Rural de El Bolsón.



Figura 7a) Gabinete de deshidratado ubicado en interior de cocina del CEA N°3. 7b) Colector solar ubicado inmediatamente en el exterior.

El ensayo de deshidratado fue realizado en el CEA Nº3 de Mallín Ahogado, donde además de su uso cotidiano para el agregado de valor de productos de producción primaria propia y el empleo para el uso cooperativo, también se utiliza para las prácticas en el taller de agregado de valor impartido en la misma institución educativa. Como ejemplo de la apropiabilidad de la tecnología cabe mencionar que los técnicos de mantenimiento del CEA 3 en conjunto con sus directivos y docentes, tomaron el diseño del deshidratador tal y como se lo describe en el manual (Goglino et al. 2023) y lo adecuaron de tal forma que el colector solar quedase en el exterior del recinto contra la pared de la cocina, lugar donde en su interior se ubica el gabinete de deshidratador, haciendo de su uso más ameno dado que se evita la exposición a la intemperie en épocas de bajas temperaturas y se accede a los productos finales en una zona apta higiénicamente para su previo y posterior tratamiento.

El ensayo se realizó a mediados del otoño con un día inestable y tuvo una duración de 7 h. En la *Tabla 2* se muestran los pesos iniciales y finales de los productos deshidratados. El consumo eléctrico correspondiente al aporte de las resistencias eléctricas y al funcionamiento de los ventiladores durante el ensayo fue de 4,6 KWh.

Tabla 2. Valores del pesaje inicial y final de los productos.

Especie	Zanahoria	Remolacha	Puerro	Menta
Peso inicial (g)	186	284	147	50
Peso final (g)	64	86	30	26
% de pérdida sobre Peso inicial	66	70	80	48

CONCLUSIONES

El uso de técnicas de diseño participativo tuvo como resultado un equipamiento que se ajusta a los requerimientos de productores/usuarios heterogéneos, que producen o recolectan una alta diversidad de productos en distintos momentos del año. La construcción de criterios de diseño partiendo de la toma conjunta de decisiones permite la adecuación en múltiples dimensiones de uso y fabricación, resultando en un diseño flexible.

De las 3 situaciones diversas donde fue instalado, el uso comunitario Millalonco-Ranquehue y del CEA Nº3 tuvieron mejores tasas de apropiabilidad siendo que ambos son espacios que sendas comunidades utilizan cotidianamente. En contraste el uso comunitario por parte de las productoras del grupo de Cambio Rural no tuvo la penetración esperada posiblemente debido a la distancia a sus establecimientos.

Si bien el rendimiento efectivo del equipamiento no pudo ser estudiado en profundidad, las pruebas dieron un consumo eléctrico moderado, por ende, un costo operativo adecuado en condiciones climáticas desfavorables y un secado efectivo para las especies analizadas.

Para poder entender más acerca del desempeño del equipamiento en relación al ambiente se espera realizar una evaluación del rendimiento energético y una evaluación de experiencias de usuario. Con las modificaciones que surjan de estos procesos se avanzará en el desarrollo de proveedores para asegurar la disponibilidad a nivel comercial del deshidratador mejorado.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue posible con el financiamiento del Proyecto Federal de Inversión del Consejo Federal de Ciencia y Tecnología (COFECyT) EX-2021-60338529-APN-DDYGD#MCT, del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Argentina.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las personas que participaron de los talleres, a José Luis Tenivella por la fabricación de los prototipos, a quienes brindaron el espacio y colaboración para la instalación y evaluación de los deshidratadores.

REFERENCIAS

Bhur, G. E., Domini, M.T. y Lara, M.A. (2000). Estudio de viabilidad de un secadero de hierbas aromáticas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 4, 19.

Burns, Jim. (1979) Citizens take part in the process of urban design. Nations Citizen's Weekly, nº 2, p. 43.

Cuassolo, F., Ladio, A. y Ezcurra, C. (2009). Aspectos de la comercialización y control de calidad de las plantas medicinales más vendidas en una comunidad urbana del NO de la Patagonia Argentina. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 9(3), 165-176.

Ejarque, M. (2024). Complejizando la desigualdad alimentaria: compra y consumo de frutas y verduras en la Comarca Andina del Paralelo 42°. 2das Jornadas de la Asociación Argentina de Sociología Rural. Rosario.

Ejarque, M., Lamaisón, G. y Nessi, M.V. (2022). Productores y consumidores: sentidos en tensión en la frutihorticultura de la Comarca Andina patagónica. XI Jornadas de Sociología de la UNLP. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, Universidad Nacional de La Plata. http://jornadassociologia.fahce.unlp.edu.ar/xi-jornadas/actas/ponencia-220708084145153857

Elena, P., La Manna, V., Barbosa, L., Mazzoni, A., Cardozo, A. y Tula, M. (2021) Caracterización general del sector fitopreparados en la región patagónica. Comunicación Técnica Nº 268. Ediciones INTA, San Carlos de Bariloche.

Escalante K. N.; Altamirano M.; Contreras, P. (2012) Desarrollo y Evaluación del secador solar INTI 2012 para uso familiar. INTI-Centro Salta.

FAO (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. Roma.

Goglino, M. (2023) Deshidratador híbrido solar, manual de fabricación, deshidratador para la producción de alimentos, fitocostmética y fitopreparados. Editado INTI. - 1a ed. - San Martín: Instituto Nacional de Tecnología Industrial INTI. Consultado el 08/07/24 https://app.inti.gob.ar/greenstone3/biblio/collection/works/browse/CL1/7#CL1.7.175

Juan Pérez, J. I. (2013). Manejo de recursos naturales y procesos agrícolas para el turismo rural campesino en un Ejido de transición ecológica de México. PASOS Revista de turismo y patrimonio cultural, 11(2), 327-342. https://doi.org/10.25145/j.pasos.2013.11.021

INTI-Noreste (2007). Manual de construcción del deshidratador solar Aureliano Buendía. INTI-Noreste; disponible en https://app.inti.gob.ar/greenstone3/biblio/collection/works/document/304584_pdf;jsessionid=91EF1413CC34C8B8BD8C9701315DA217. consultado el 05/08/24.

La Manna, V., Elena, P., Caló, Goglino, M y Villegas, S. (2023). Deshidratador híbrido solar: manual de uso: deshidratador para la producción de alimentos, fitocosmética y fitopreparados. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, San Martín. Consultado el 08/07/24 https://app.inti.gob.ar/greenstone3/biblio/collection/works/browse/CL1/7#CL1.7.175

Ladio, A. H., Molares, S., Ochoa, J., & Cardoso, B. (2013). Etnobotánica aplicada en Patagonia: La comercialización de malezas de uso comestible y medicinal en una feria urbana de San Carlos de Bariloche (Río Negro, Argentina). Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 12(1), 24-37.

Lermen, F. H., Ribeiro, J. L. D., Echeveste, M. E., Milani Martins, V. L. y Tinoco, M. A. C. (2020). Sustainable offers for drying and storage of grains: Identifying perceived value for Brazilian farmers. Journal of Stored Products Research, *87*, 101579. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101579

Pelta Resano, R. (2022). El diseño participativo en los orígenes del co-diseño. ARXIU. Revista De l'Arxiu Valencià Del Disseny, (1), 11–36. https://doi.org/10.7203/arxiu.1.25333

Ríos Blanco, M., Castillo, L., Frías, J., Giudici, P., Perez, M. y Viñas, J. (2020). Producción de transición agroecológica de plantas aromáticas y nativas en el periurbano de Puerto Madryn. Libro de Resúmenes del 5° Congreso del Foro de las Universidades Nacionales para la Agricultura Familiar, pp. 138-139. Ediciones UNCO, Cinco Saltos.

COMPARATIVE THERMAL AND ECONOMIC EVALUATION OF CLASSROOM BAYS IN BIOCLIMATIC SCHOOL BUILDINGS IN THE MENDOZA PROVINCE

ABSTRACT The present work includes the path of resolution of a productive problem prioritized by a heterogeneous group of family farmers producing phytopreparations and aromatics of the Andean Region in Argentine Patagonia: the conservation and value addition of their products. Through the conformation of an interdisciplinary team and the application of participatory design techniques in a technological adaptation process, a hybrid dehydrator was designed, manufactured and evaluated that allows drying in unfavorable environmental conditions. The holding of a series of workshops with the participation of local producers and technicians resulted in a design program, adapting the variables to the end users of the dehydration equipment. The approach strategy led to an open design that translates into a communication strategy that allows replication by other users and manufacturers. At the same time, a modular configuration was chosen considering the possible expansion of crops and community use. According to the results obtained in the workshops, the two most available energy sources were used to carry out the process. After manufacturing, a drying test was carried out in one of the dehydrators under adverse conditions, obtaining results in line with what was expected for the evaluated products.

Keywords: Co-design, participative design, technological adecuacy, solar drying, family farming, value addition.