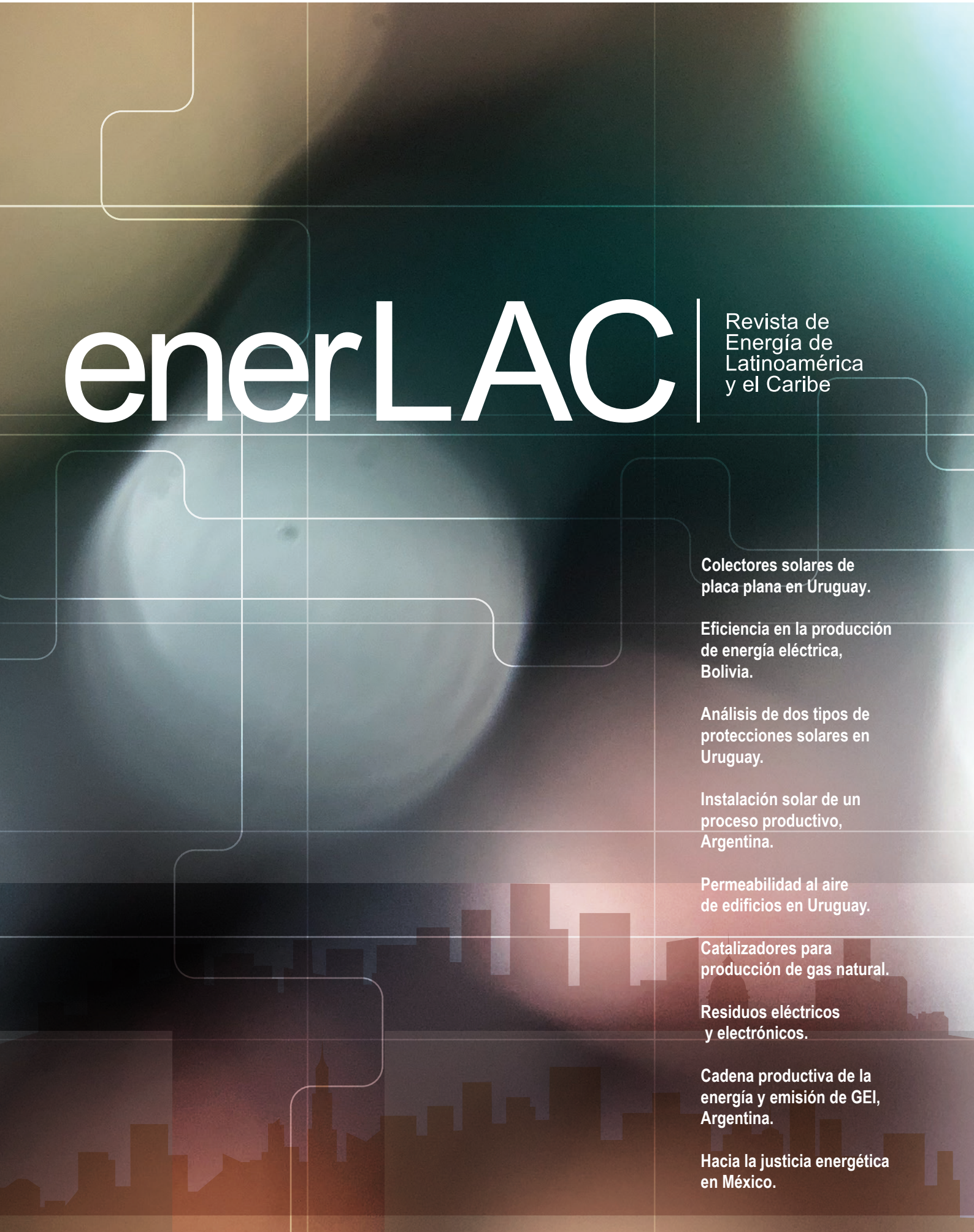
olade ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA

Asociación de Universidades GRUPO MONTEVIDEO

Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020
ISSN 2602-8042 impreso / 2631-2522 digital

enerLAC

Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe



Colectores solares de placa plana en Uruguay.

Eficiencia en la producción de energía eléctrica, Bolivia.

Análisis de dos tipos de protecciones solares en Uruguay.

Instalación solar de un proceso productivo, Argentina.

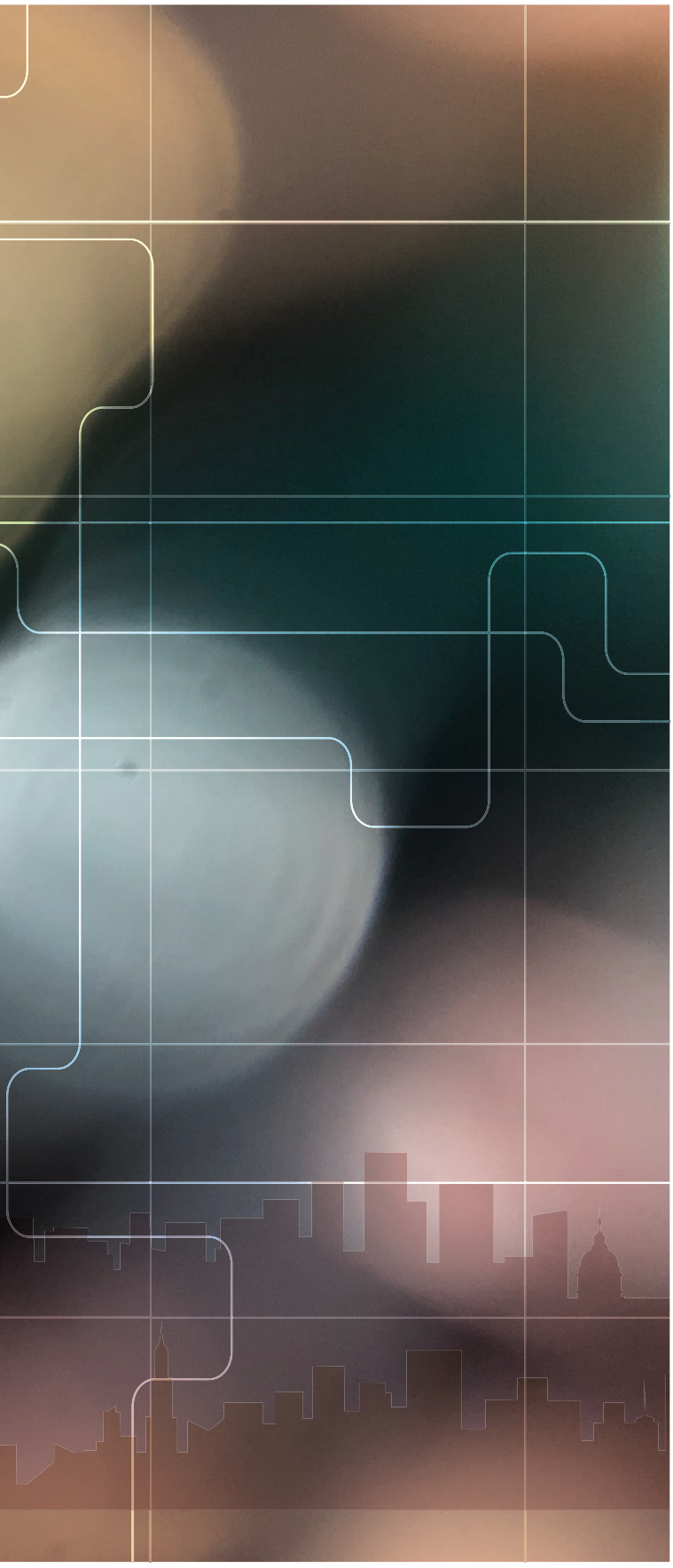
Permeabilidad al aire de edificios en Uruguay.

Catalizadores para producción de gas natural.

Residuos eléctricos y electrónicos.

Cadena productiva de la energía y emisión de GEI, Argentina.

Hacia la justicia energética en México.



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Pablo Garcés. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Marcelo Vega. *Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Uruguay.*

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación.*

REVISORES

Aldo Delgado Acevedo.
Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Alvar Carranza.
Universidad de la República (UdelaR).
Centro Universitario Regional del Este, CURE, Sede Maldonado.
Departamento de Ecología y Gestión Ambiental. Uruguay.

Augusto Manuel Durán.
Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Claudia Alejandra Pilar.
Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Argentina.

Daniela Flores Ramírez.
Investigadora independiente. México.

Guillermo Garrido.
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Argentina.

Gustavo Figueredo.
Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) Argentina.

Henry Milton Espada Romero.
Universidad Pública de El Alto. Bolivia.

José Ricardo Sánchez Martínez.
Investigador independiente. México.

Luis Felipe Gómez Fernández.
Ministerio de Energía y Minas. Perú.

Manuel Enrique Chacón Morales.
Empresa Propietaria de la Red S. A. Costa Rica.

Marco Antonio Flores Barahona.
Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
Instituto de Investigación en Energía. Honduras.

Marco Daniel Silva Ramos.
Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ecuador.

Maxime Le Bail.
Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. México.

Pedro Andrés Galione Klot. *Universidad de la República (UdelaR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial. Uruguay.*

Rafael Bernardi.
Universidad de la República (UdelaR). Uruguay.

Rodrigo Alonso Suárez. *Universidad de la República (UdelaR). Facultad de Ingeniería. Uruguay.*

Rolando Madriz-Vargas. *Universidad Nacional. Laboratorio Energía Solar. Departamento de Física. Costa Rica.*

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) 2020. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)
ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

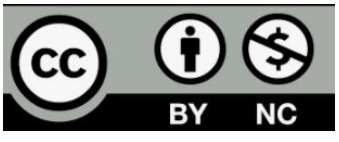
Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: http://enerlac.olade.org
Página web OLADE: www.olade.org
Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO
Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.



“ Según estimaciones del FMI, América Latina y El Caribe ha sido una de las regiones más afectadas por la pandemia que llevará a una contracción de 7.9% en el PIB nominal 2020 respecto a 2019. ”

2020 ha sido un año complejo en el que debemos lamentar las aproximadamente 1.4 millones de víctimas del SARS-COV2 a nivel mundial, la crisis sanitaria derivada de la transmisión acelerada del virus ha impactado de manera relevante el comportamiento social y la situación económica a nivel mundial.

América Latina y El Caribe ha sido una de las regiones más afectadas por la pandemia, no solo en la cantidad de personas contagiadas, sino en la crisis económica subyacente que, según estimaciones del FMI, llevará a una contracción de 7.9% en el PIB nominal 2020 respecto a 2019. Recuperar el nivel precrisis tomará a la región varios años.

El sector energético se ha visto sometido a fuertes tensiones, por un lado, debiendo apalancar el suministro eléctrico desplazado hacia el sector residencial y servicios de sanidad, desde la demanda industrial, transporte y comercial drásticamente contraída y, por otro, las medidas de restricciones de movilidad provocaron una dramática disminución de la demanda de combustibles, aumentando los *stocks* de crudo que presionaron los precios a la baja pronunciadamente, obligando a la OPEP, conjuntamente con productores no OPEP, a tomar medidas de recorte de la oferta para intentar revertir el desplome de los precios. Éstas entre otras consecuencias de las medidas adoptadas para intentar la contención de la transmisión de la enfermedad.

OLADE, en su panorama energético publicado recientemente[1], estima una contracción de la demanda total de energía cercana al 8% respecto a los niveles de 2019. La generación eléctrica al cierre del año presentará una disminución de 5% en relación al año anterior, disminuyendo principalmente la generación térmica con GN, CM y derivados de petróleo.

Las transiciones energéticas en marcha en la región y los compromisos climáticos se verán ante la incertidumbre de un escenario de contracción económica y precios relativamente bajos de los hidrocarburos. Las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético en este período han reducido drásticamente (11% respecto a 2019[2]), explicado principalmente por las restricciones de movilidad y desaceleración de los sectores industrial y comercial, un resultado positivo para el ambiente.

El sector energético apalancará la recuperación económica de la región. Es imprescindible acelerar las transiciones energéticas y la innovación en el sector, la digitalización en la cadena eléctrica, la aceleración del recambio de combustibles en el trasporte, el acceso universal más necesario en esta crisis sanitaria, son ejes necesarios de impulsar en esta coyuntura. Estos temas fueron tratados extensamente en la reciente edición de la Semana de la Energía, evento desarrollado de manera virtual del 16 al 25 de noviembre que se ha convertido en el principal espacio de encuentro de los actores energéticos en la región. El material grabado del evento se encuentra en el sitio web: https://semanadelaenergia.olade.org/

El futuro inmediato está lleno de desafíos para el sector, por lo que este espacio de divulgación mantiene abiertas sus puertas para apoyar a la comunidad energética en la tarea de análisis y búsqueda de soluciones para afrontar el período postcrisis.

Para finalizar, una buena noticia: en agosto de este año, la revista ENERLAC ha ingresado en el índice LATINDEX gracias a sus procesos que aseguran la calidad de sus publicaciones. Queremos extender las gracias a todos los colaboradores: autores, revisores, comité editorial, edición y toda la gente que hace posible mantener este espacio creado con el objetivo de contribuir a la difusión de resultados de investigaciones y trabajos científicos de carácter técnico del sector energético de América Latina y el Caribe, elaborados por académicos e investigadores pertenecientes a instituciones vinculadas con el sector de los 27 países miembros de OLADE.

1 Panorama Energético de América Latina y El Caribe, 2020, OLADE.

2 ídem.

Pablo Garcés
Asesor Técnico
OLADE

ÍNDICE
INDEX

p. 10

ENSAYO CUASI-DINÁMICO DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN URUGUAY DE ACUERDO A LA NORMA ISO 9806:2017

QUASI-DYNAMIC TEST OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS IN URUGUAY ACCORDING TO THE ISO 9806:2017 STANDARD

Juan Manuel Rodríguez Muñoz, Andrés Monetta, Italo Carlos Bove Vanzulli, Rodrigo Alonso-Suárez

p. 28

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA DE 50 kW CONECTADA A LA RED, EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO DE COTA COTA, UBICADA EN LA CIUDAD DE LA PAZ, BOLIVIA

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF ELECTRICITY IN THE PHOTOVOLTAIC SOLAR CENTRAL OF 50 kW, IN THE UNIVERSITY CAMPUS OF COTA COTA, LOCATED IN LA PAZ, BOLIVIA

Álvaro Montano Saavedra, María Belén Aruquipa Saravia, Cristian Limachi Ochoa

p. 40

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN SOLAR DE DOS TIPOS DE PROTECCIONES SOLARES PARA DISTINTAS POSICIONES EN MONTEVIDEO, URUGUAY

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE SOLAR TRANSMISSION OF TWO TYPES OF SOLAR PROTECTIONS FOR DIFFERENT POSITIONS IN MONTEVIDEO, URUGUAY

Lucía Pereira Ruchansky, Lucía Gutiérrez Bazterrica, Daniel Sosa Ibarra, María Noel López Salgado, Magdalena Camacho Roberts

p. 58

EVALUACIÓN TÉRMICA Y EFECTOS DE LA DEMANDA EN UNA INSTALACIÓN SOLAR DE UN PROCESO PRODUCTIVO

THERMAL ASSESSMENT AND EFFECTS OF DEMAND ON A SOLAR INSTALLATION OF A PRODUCTIVE PROCESS

† Enrique Donato Albizzati

p. 76

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE DE EDIFICIOS EN URUGUAY

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AIR PERMEABILITY OF BUILDINGS IN URUGUAY

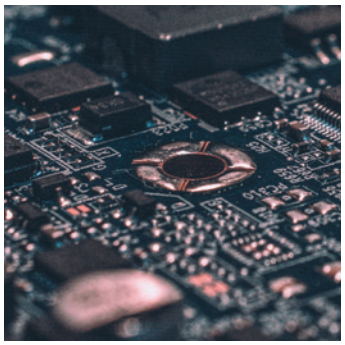
Juan Manuel Rodríguez Muñoz, Andrea Sevrini, Gunnar Gil, Italo Carlos Bove Vanzulli

p. 92

DESARROLLO DE NUEVOS CATALIZADORES BASADOS EN NÍQUEL PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL SINTÉTICO A PARTIR DE LA HIDROGENACIÓN DE CO_2

DEVELOPMENT OF NEW NICKEL-BASED CATALYSTS FOR SYNTHETIC NATURAL GAS PRODUCTION FROM CO_2 HYDROGENATION

Santiago German Veiga Bacci, Juan Bussi



p. 108

RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE): IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL, GESTIÓN Y METODOLOGÍAS SOBRE SU MANEJO

WASTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES (WEEE): SOCIAL, ENVIRONMENTAL IMPACT, MANAGEMENT AND METHODOLOGIES ON ITS HANDLING

Dulce Kristal Becerra Paniagua, Araceli Hernández Granados, Evelyn Betsabe Díaz Cruz, Karla Graciela Cedano Villavicencio, Horacio Martínez Valencia

p. 132

CONTRIBUCIÓN DE LA CADENA PRODUCTIVA DE LA ENERGÍA EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ARGENTINA

CONTRIBUTION OF THE ENERGY VALUE CHAIN IN ARGENTINA'S GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Maxime Le Bail

p. 146

HACIA UNA JUSTICIA ENERGÉTICA EN MÉXICO. UN ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TARIFARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO Y SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN LA REPÚBLICA MEXICANA

TOWARDS AN ENERGY JUSTICE IN MEXICO. AN ANALYSIS OF THE TARIFF REGIME OF THE COLOMBIAN ELECTRICITY SECTOR AND ITS POSSIBLE IMPLEMENTATION IN THE MEXICAN REPUBLIC

Ernesto Beltrán Nishizakis

ENSAYO CUASI-DINÁMICO DE COLECTORES SOLARES DE PLACA PLANA EN URUGUAY DE ACUERDO A LA NORMA ISO 9806:2017

QUASI-DYNAMIC TEST OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS IN URUGUAY ACCORDING TO THE ISO 9806:2017 STANDARD

Juan Manuel Rodríguez Muñoz [1], Andrés Monetta [2], Italo Carlos Bove Vanzulli [3], Rodrigo Alonso-Suárez [4]

Recibido: 30/05/2020 y Aceptado: 03/08/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (10 - 26)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Samyag Shah de Unsplash.

1 Universidad de la República (UDELAR). Centro Universitario Litoral Norte. Departamento de Física del Litoral. Laboratorio de Energía Solar. Uruguay.
jrodrigue@fing.edu.uy
http://orcid.org/0000-0001-8523-0582

2 Universidad de la República (UDELAR). Centro Universitario Litoral Norte. Departamento de Física del Litoral. Laboratorio de Energía Solar. Uruguay.
andres130402@gmail.com
http://orcid.org/0000-0003-1087-2569

3 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Física. Laboratorio de Energía Solar. Uruguay.
italo@fing.edu.uy
http://orcid.org/0000-0001-8450-8183

4 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Física. Laboratorio de Energía Solar. Uruguay.
r.alonso.suarez@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-5216-5232

RESUMEN

Los ensayos de colectores solares en estado transitorio permiten aumentar la capacidad de ensayo de los laboratorios respecto a los ensayos en estado estacionario. Esto ha sido validado en laboratorios internacionales, especialmente en Europa. En Latinoamérica este método no ha tenido mucha difusión y a la fecha ningún laboratorio de esta región había validado (ni implementado) su uso en climas locales, por lo que los laboratorios de la región que están desarrollando capacidades de ensayo de colectores solares no consideran aún este método en forma comercial. En este trabajo se presentan los resultados de un ensayo en estado transitorio (cuasi dinámico) de un colector solar de placa plana de acuerdo a la norma ISO 9806:2017 en Uruguay, región de la Pampa Húmeda en Sudamérica. Se compara sus resultados con la metodología de ensayo tradicional en estado estacionario y se demuestra que es posible aplicarlo en la región incluso con la ventaja de ampliar la cantidad anual de ensayos, como se ha observado en Europa.

Palabras clave: Colectores Solares Térmicos, Ensayos de Desempeño, Modelos Dinámicos, Estado Estacionario, ISO 9806, Uruguay

ABSTRACT

Transient-state efficiency tests for solar thermal collectors allow increasing the laboratories annual test capacity in comparison to steady-state efficiency tests. This characteristic has been evaluated by international laboratories, especially in Europe. In Latin America this method has not been widely disseminated and to date no regional laboratory had validated (or implemented) its utilization under the local climates, so laboratories in the region that are developing solar collector testing capabilities do not yet consider this method commercially. This article presents the results of a transient-state (quasi-dynamic) test of a flat plate solar collector according to ISO 9806:2017 standard in Uruguay, a part of the broader Pampa Húmeda region in South America. Test results are compared to those of the traditional steady-state methodology, demonstrating that the method can be applied in the region and has also the advantage of increasing the annual test capacity, as observed in Europe.

Keywords: *Solar Thermal Collectors, Performance Test, Dynamic Model, Steady State, ISO 9806, Uruguay.*

INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido del consumo final de energía mundial sumado al hecho de que el 85% proviene de combustibles fósiles (IEA, 2016a) genera gran preocupación respecto a las emisiones de CO_2 y su efecto en el cambio climático. Las dos acciones más importantes para reducir estas emisiones son la incorporación de fuentes de energías renovables al uso final de energía y la reducción de la demanda a través de medidas de eficiencia energética. En 2016, el sector edilicio fue responsable del 30 % del consumo final de energía mundial (IEA, 2016a) mientras que en Uruguay este sector represento el 25 % (IEA, 2016b). Una parte importante de este consumo se debe al calentamiento de agua sanitaria (ACS) y a los sistemas de calefacción y refrigeración.

La energía solar térmica de baja temperatura se presenta como una candidata para sustituir el uso tradicional de energía para ACS y para los sistemas de acondicionamiento térmico en el sector edilicio. Entre 2007 y 2017, la capacidad instalada de colectores solares térmicos aumentó de forma sostenida pasando de 145 GW en 2007 a 472 GW en 2017 (REN21, 2018). No obstante, si bien la energía solar térmica ha crecido de forma notoria, la participación de esta tecnología en la matriz energética mundial sigue siendo pequeña. Para lograr una mayor participación se deben abordar distintas problemáticas, una de ellas es la calidad de los productos que se comercializan. En este sentido, varias organizaciones internacionales de reconocido prestigio, como la *International Organization for Standarization* (ISO) y la *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Enginners* (ASHRAE), han elaborado normativas que describen procedimientos para evaluar el desempeño térmico de colectores solares y la calidad de los materiales con los que se fabrican. El hecho que un país cuente con estas capacidades de ensayo no garantiza que la capacidad instalada de colectores solares aumente, dado que esto dependerá en definitiva de las políticas energéticas que adopte cada país. No obstante, dicha capacidad es necesaria para el desarrollo del sector, ya que difícilmente una política energética tendrá éxito si la calidad de los colectores comercializados no es la adecuada. Además, los ensayos de desempeño térmico constituyen un insumo básico para la evaluación económico financiera de los proyectos.

Tradicionalmente los ensayos de eficiencia de colectores solares (desempeño térmico) se han realizado en estado estacionario (*Steady State Testing*, SST). Para asegurar el estado estacionario se requiere mantener con gran estabilidad diversas variables durante el ensayo. Algunas de ellas son controlables, como la temperatura del fluido a la entrada del colector y el caudal, y otras son no controlables, como la irradiancia solar o las condiciones de viento sobre el colector. Es posible mitigar la acción del viento en los alrededores forzando viento de forma artificial a una velocidad determinada sobre el colector, elemento que es considerado por todos los laboratorios al exterior. El control del ángulo de incidencia es también una limitante, dado que el movimiento aparente del sol varía para cada momento del año. Por ende, dada todas las restricciones geométricas, no es sencillo conseguir los ángulos de incidencia necesarios para un ensayo bajo norma, incluso utilizando sistemas de seguimiento solar. Estas condicionantes, en especial, las relacionadas con irradiancia solar y ángulo de incidencia, limitan la cantidad de ensayos que un laboratorio puede realizar en un año.

Buscando solucionar esta situación, en la década de los 90' se realizaron los primeros ensayos de eficiencia en estado transitorio (*Quasi Dynamic Testing*, QDT) para colectores solares (Muschaweck y Spirkl, 1993; Perers, 1993) y se comenzaron a evidenciar las ventajas de este método en sitios con nubosidad variable,

donde las condiciones meteorológicas para el ensayo SST son difíciles de conseguir. Algunos laboratorios en Europa ubicados en sitios con estas características climáticas adoptaron esta metodología (Fischer et al., 2004; Osório y Carvalho, 2014; García de Jalón, 2011; Zambolin, 2010) y también en Estados Unidos (Rojas, 2008), pero en Latinoamérica, por distintos motivos, esta metodología no ha sido adoptada por la mayoría de los laboratorios, existiendo muy pocos antecedentes a la fecha (Kratzenberg, 2006). Dado que el método SST requiere condiciones exigentes de cielo despejado para su correcta implementación, el método QDT se presenta como una alternativa más factible de realizarse en climas con mayor presencia de nubosidad, donde los días de cielo despejados son escasos. Dadas sus características, la metodología QDT no sólo permite, sino que es un requisito de la misma, que durante el ensayo hayan ocurrido diferentes condiciones de cielo (cielo despejado, parcialmente nublado y nublado), siendo difícil de implementar en sitios con predominancias de cielos despejados (en climas áridos o desérticos, por ejemplo). Los laboratorios pueden optar por utilizar una u otra metodología según sean las condiciones meteorológicas locales (utilizando la misma infraestructura de ensayo).

El objetivo central de este artículo es demostrar la aplicabilidad del método QDT en el clima de la región conocida como la Pampa Húmeda, sudeste de Sudamérica, que abarca la región climática afín de Uruguay, las provincias de Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y la Pampa, y el sur de Brasil. Para ello se realizan dos cosas: (1) se presenta en este trabajo el ensayo de un colector solar de placa plana en Uruguay bajo las metodologías QDT y SST, siguiendo normativa ISO vigente, y se muestra que sus resultados de ensayo son equivalentes, y (2) se proporciona un análisis de la cantidad de ensayos por mes y por año de la metodología (QDT) en la región, encontrándose que esta metodología es capaz de aportar más del doble de ensayos anuales en la región en comparación con la metodología tradicional. El trabajo busca además darle mayor difusión a la metodología de ensayo QDT en Latinoamérica, describiendo una implementación del método realizada y validada por un laboratorio local.

Este artículo se organiza de la siguiente forma. En primer lugar se describe el modelado matemático de la norma ISO 9806:2017 para describir el comportamiento térmico de un colector solar con cubierta, incluyendo una descripción de las variables de ensayo relevantes. En la siguiente sección (p.17) se presenta brevemente la plataforma de ensayo, a saber, el Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS) del Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Udelar, y se describen las características comunes a ambos ensayos. Posteriormente, (p.20) se describe el procedimiento de ensayo utilizado para ambas metodologías (SST y QDT) y la siguiente sección (p.23) presenta y compara sus resultados. Se presenta al final de la misma el análisis de la cantidad de ensayos anuales que se podrían obtener con ambas metodologías, evidenciando las ventajas del método QDT en la región. Finalmente, se resumen las conclusiones (p.25).

Las dos acciones más importantes para reducir las emisiones de GEI son la incorporación de fuentes de energías renovables al uso final de energía y la reducción de la demanda a través de medidas de eficiencia energética.

MODELADO TÉRMICO DEL COLECTOR

La norma ISO 9806:2017 (ISO, 2017) propone dos modelos matemáticos para describir el desempeño térmico de un colector solar con cubierta. El primer modelo es el más simple y se describe según:

$$C\frac{dT_m}{dt} = A_g\,[\,\eta_{o,hem}\,.\,K_{hem}\,(\theta)\,.\,G - a_1\,(T_m - T_a) - a_2\,(T_m - T_a)^2\,] - \dot{m}c_p(\,T_o - T_i\,) \quad \textbf{(1)}$$

El segundo modelo surge de separar la irradiancia global en sus subcomponentes directa y difusa, y remplaza el modificador de ángulo considerando su efecto distinto sobre ambas componentes, de la siguiente manera:

$$\eta_{o,hem}\,.\,K_{hem}\,(\theta)\,.\,G = \eta_{0,b}\,.\,[K_b\,(\theta)\,.\,G_b + K_d\,.\,G_d\,] \quad \textbf{(2)}$$

Lo que da lugar a:

$$C\frac{dT_m}{dt} = A_g\,[\,\eta_{o,b}\,.\,K_b\,(\theta)\,.\,G_b + K_d\,.\,G_d\,] - a_1\,(\,T_m - T_a\,) - a_2\,(\,T_m - T_a\,)^2\,] - \dot{m}c_p(\,T_o - T_i\,) \quad \textbf{(3)}$$

En el caso del método SST se determinan los coeficientes $\eta_{0,hem}$, a_1, a_2, $K_{hem}(\theta)$ y C de la Ecuación (1) en forma separada a través de tres ensayos independientes: (i) Ensayo de rendimiento en donde se determinan los coeficientes $\eta_{0,hem}$, a_1 y a_2; (ii) Ensayo de modificador por ángulo de incidencia en donde se determina $K_{hem}(\theta)$; y (iii) Ensayo de capacidad térmica en donde se determina la constante C. Cabe destacar que los primeros dos ensayos son en estado estacionario pero el tercero no. En el caso del método QDT se determinan los coeficientes $\eta_{0,b}$, a_1, a_2, $K_b(\theta)$, K_d y C de la Ecuación (3) en un único ensayo que integra los tres ensayos independientes del método SST.

Para el modificador por ángulo de incidencia $K_{hem}(\theta)$ se utiliza la siguiente relación:

$$K_{hem}\,(\,\theta\,) = 1 - b_0\left(\frac{1}{cos\theta} - 1\right) \quad \textbf{(4)}$$

En el anexo B de la norma ISO 9806:2017 se describe como determinar $\eta_{0,b}$, $K_b(\theta)$ y K_d a partir $\eta_{0,hem}$ y $K_{hem}(\theta)$ y viceversa. Para calcular K_d primero se asume que $K_{hem}(\theta) \cong K_b(\theta)$ y luego $K_b(\theta)$ es promediado y normalizado sobre el ángulo sólido visto por el colector, esto es:

$$K_d = \frac{\int_0^{90^o} k_b\,(\,\theta\,)sin\theta cos\theta d\theta}{\int_0^{90^o} k_b\,sin\theta cos\theta d\theta} \quad \textbf{(5)}$$

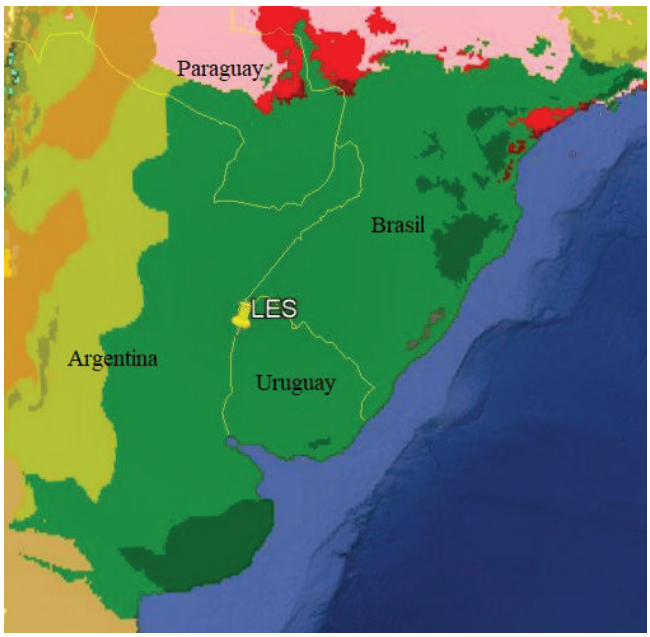
La constante $\eta_{0,b}$ se calcula a partir de la Ecuación (2) asumiendo incidencia normal y una fracción difusa de 15% en el plano del colector. Para calcular $\eta_{0,b}$, se utilizó la mejora propuesta por Kovacs et al. (2011) de utilizar en la Ecuación (6) la fracción difusa promedio en el plano del colector durante el ensayo de rendimiento en estado estacionario. Entendemos que este procedimiento es el más apropiado.

$$\eta_{o,b} = \frac{\eta_{o,hem}}{(1 - f_d) + f_d K_d} \quad \textbf{(6)}$$

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ENSAYOS

Las pruebas se realizaron en el Banco de Ensayos de Calentadores Solares (BECS) del Laboratorio de Energía Solar (LES, http://les.edu.uy/) de la Universidad de la República (Udelar) ubicado en la localidad de Salto (31° sur), Uruguay. En la Figura 1 se muestra la ubicación del LES dentro de la región climática afín de la pampa húmeda (verde claro). Dicha región se ubica al sureste de Sudamérica y está clasificada como Cfa (clima templado-cálido, húmedo, con veranos calurosos) según la clasificación actualizada de Köppen-Geiger (Peel et al., 2007). Las zonas identificadas en verde oscuro corresponden a la clasificación Cfb, muy similar a Cfa, con la excepción de que los veranos son más frescos por la influencia de la costa.

Figura 1. Ubicación del LES dentro de la región de la pampa húmeda (verde)



Fuente: Mapa de Peel et al. (2007) para la aplicación Google Earth

Se utilizó el mismo banco de ensayos para los dos métodos (SST y QDT). Cabe destacar que dicho banco fue diseñado por investigadores del propio laboratorio, en base a las instalaciones preexistentes del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de España. Recientemente esta capacidad de ensayo participó de una inter-comparación de laboratorios de ensayo a nivel de Latinoamérica organizada por el PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), Instituto Metrológico de Alemania. En esta inter-comparación (de ensayos SST) se obtuvo una puntuación satisfactoria en todos los parámetros medidos (valor absoluto de Z-score menor 2). El BECS fue el único laboratorio de Latinoamérica que presentó además resultados de ensayo bajo la metodología QDT, obteniendo valores satisfactorios en todos los parámetros medidos, excepto en el parámetro K_d, en el que se obtuvo un valor absoluto de Z-score entre 2 y 3. El informe final de dicha actividad se encuentra en (Fisher, 2020).

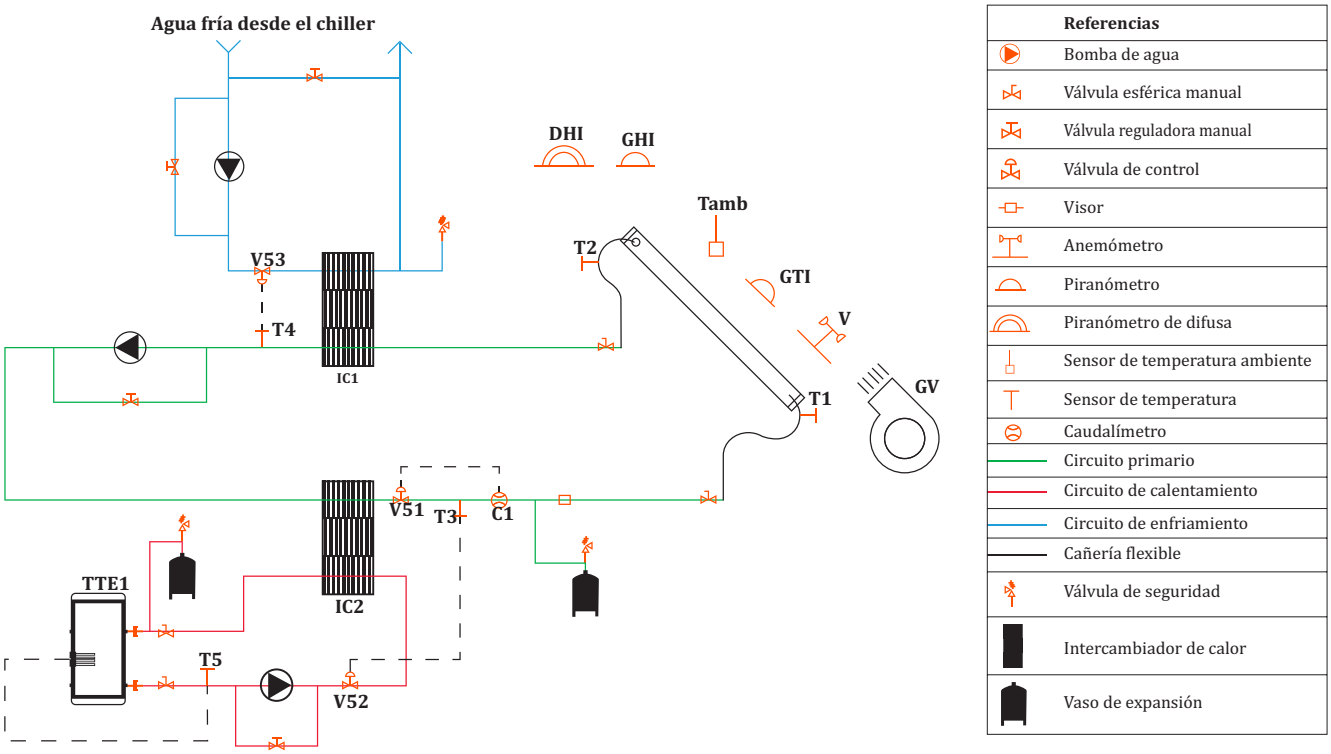
Figura 2. Instalación de ensayo

Fuente: Elaboración propia

Para este trabajo se ensayó un colector solar térmico de placa plana de 2.01 m^2 de área bruta entre el 17 y el 25 de noviembre de 2019. Los datos se procesaron de diferente forma según el método empleado, SST o QDT. El colector se montó sobre un seguidor móvil como se muestra en la Figura 2. La inclinación horizontal de este seguidor se puede ajustar manualmente entre 0° y 75° y el azimut se puede ajustar de forma manual o automática con un paso de 2 minutos entre -90° y 90°. Se impuso una velocidad de 3 m/s (promedio espacial) sobre el colector utilizando los ventiladores axiales que se muestra en Figura 2. El caudal de ensayo se fijó en 2.4 lts/min y durante todas las pruebas el ángulo de inclinación del seguidor se fijó en 45°, el azimut se ajustó de forma manual o automática según el ensayo. En todos los casos, antes del periodo de medición, al colector se lo hizo pasar por un periodo de acondicionamiento previo de 15 minutos a la temperatura de ensayo correspondiente; dicho período no fue incluido en la identificación de parámetros de ensayo en ninguna de las metodologías.

En la Figura 3 se muestra un esquema simplificado de la instalación termo-hidráulica del BECS. La misma cuenta con tres circuitos independiente: (1) circuito primario, en verde, (2) circuito de calentamiento, en rojo, y (3) circuito de enfriamiento, en azul. Los tramos de cañería en negro en el circuito primario corresponden a las cañerías flexibles que se pueden observar en la Figura 2. El control temperatura a la entrada del colector (circuito primario) se realiza en dos etapas. Primero el fluido caliente a la salida del colector debe ser enfriado, proceso que se realiza en el intercambiador de calor IC1. Luego el fluido es calentado en forma precisa a la temperatura de entrada establecida para el ensayo a través del intercambiador de calor IC2. El circuito de enfriamiento utiliza agua a 10 °C que proviene de una enfriadora eléctrica de agua (no mostrada en el diagrama) y el circuito de calentamiento utiliza agua caliente que proviene del termotanque TTE1. Los caudales en los tres circuitos son regulados mediante válvulas reguladores electroneumáticas (V51, V52 y V53) accionadas por controladores PID (indicados en línea punteada). Todo el sistema de control se desarrolló localmente utilizando un PLC marca Siemens modelo S7-1200. El diagrama indica además la ubicación de los sensores de temperatura de agua (T1, T2, T3, T4 y T5), el sensor de temperatura ambiente (Tamb), los sensores de irradiancia global horizontal (GHI) y en plano inclinado (GTI), el sensor de irradiancia difusa horizontal (DHI), la medida de viento (V) y el forzador de viento (GV).

Figura 3. Esquema de instalación termo-hidráulica



Fuente: Elaboración propia

Para medir la temperatura a la entrada y a la salida del colector (T1 y T2) se utilizaron PT100 de 3 hilos con transmisores de 4-20 mA de la marca Herten. Dichos sensores fueron calibrados bajo normativa ISO vigente en el LES reportándose una incertidumbre estándar de 0.02 °C. La temperatura ambiente (Tamb) se registró con un sensor PT1000 de 2 hilos Honeywell también calibrado en el LES con una incertidumbre estándar de 0.02 °C. La medida de caudal (C1) se realizó con un caudalímetro electromagnético de *Endress & Hauser* con una incertidumbre estándar de 0.5 % de la medida. La velocidad del viento paralelo al plano del colector (V) se midió con un anemómetro de copa NGR con incertidumbre estándar de 0.25 m/s. La irradiancia global en el plano del colector (GTI) se midió con un piranómetro *Kipp & Zonen* CMP 10. La irradiancia directa G_b en el plano del colector se estimó de la siguiente manera: por un lado, se midió la irradiancia global en plano horizontal (GHI) con un piranómetro Kipp & Zonen CMP11 y la irradiancia difusa en plano horizontal (DHI) con un piranómetro *Kipp & Zonen* CMP6 montado con una banda de sombra del mismo fabricante, luego, la irradiancia en incidencia normal (DNI) se estimó por diferencia de estas dos medidas, y, multiplicando la DNI por el coseno del ángulo de incidencia en el plano del colector se obtuvo G_b. La medida de irradiancia difusa en plano inclinado con la banda de sombra es corregida con un factor provisto por el fabricante. Dichos piranómetros son calibrados anualmente en el LES de acuerdo a la norma ISO 9747:1992 contra un estándar secundario *Kipp & Zonen* CMP22 que es enviado cada cinco años a calibrar contra la referencia radiométrica mundial en *World Radiation Center* en Davos, Suiza. Todas las medidas se registraron cada 10 segundos usando un adquisidor de datos Fischer Scientific DT85.

PROCEDIMIENTO

Condiciones requeridas

La Tabla 1 muestra las condiciones requeridas por cada metodología para cada variable, incluyendo la variabilidad permitida. Estas son las condiciones que deben cumplir las medidas registradas durante el ensayo para poder ser utilizadas para determinar los parámetros con cada metodología. Como se puede observar, la metodología SST presenta requerimientos más estrictos respecto a los valores requeridos y su variabilidad. Por otro lado, la metodología QDT requiere que se representen diferentes condiciones meteorológicas durante el ensayo, como se explica en la página 24.

Tabla 1. Condiciones de ensayo y variabilidad permitida

Variable	SST		QDT	
Irradiancia solar global (W/m^2)	> 700	± 50	-	-
Fracción difusa (%)	< 30	-	-	-
Ángulo de incidencia (˚)	< 20	-	-	-
Temperatura de entrada (˚C)	-	± 0.1	-	± 1
Temperatura a la salida (˚C)	-	± 0.4	-	-
Temperatura ambiente (˚C)	-	± 1.5	-	-
Velocidad del aire paralela al colector (m/s)	3 ± 1	± 1.0	< 4	-
Caudal másico ($kg/(s.m^2)$)	0.02	1%	0.02	2%

Fuente: ISO 9806:2017

Ensayo en Estado Estacionario SST

Ensayo de Rendimiento: Para este ensayo se midió la energía útil por unidad de área para cuatro temperaturas de entrada diferentes, y la temperatura de ensayo más alta fue 85 ^{0}C. A su vez, por cada temperatura de entrada, se obtuvieron cuatro puntos independientes dando así un total de 16 puntos. Cada punto consistió en un promedio sobre un período de medición 10 minutos. Para verificar el estado estacionario, para cada punto, se tomaron promedios en períodos sucesivos de 30 segundos y se verificaron que las variaciones de dichos promedios respecto al promedio 10 minutal se encontraran dentro de los límites dados por la Tabla 1. Finalmente, los parámetros $\eta_{0,hem}$, a_1 y a_2 se determinaron por regresión lineal usando el siguiente modelo:

$$\acute{Q}_u'' = \eta_{0,hem} . G - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 \quad \textbf{(7)}$$

En donde $\acute{Q}_u''$ es la energía útil del colector por unidad de área bruta y se calcula según:

$$\acute{Q}_u'' = \frac{\acute{m} c_p (T_o - T_i)}{A_g} \quad \textbf{(8)}$$

Se definió como variable dependiente para la regresión lineal a la energía útil por unidad de área y como variables independientes G, $(T_m - T_a)$ y $(T_m - T_a)^2$; los coeficientes a determinar son $\eta_{0,hem}$, a_1 y a_2. Para asegurar la condición de incidencia normal se realizó un seguimiento acimutal durante el ensayo. La Ecuación (7) resulta de imponer la condición de estado estacionario ($dT_m/dt = 0$) y la condición de incidencia normal ($K_{hem} = 1$) en la Ecuación (1).

Ensayo de Modificador por Ángulo de Incidencia: En este caso el acimut del seguidor se fijó en 0° (orientación norte) y se tomaron distintas medidas de energía útil para diferentes ángulos de incidencia entre 40° y 70° antes y después del mediodía solar. El procesamiento de datos se realizó de igual forma que en el ensayo de rendimiento. Se impuso, para cada periodo de medición, una temperatura de entrada tal que la temperatura media del fluido fuera lo más próxima posible a la temperatura ambiente (para disminuir las pérdidas térmicas). El modificador por ángulo de incidencia se determinó usando:

$$K_{hem}(\theta) = \frac{\acute{Q}_u'' + a_1 (T_m - T_a) + a_2 (T_m - T_a)^2}{\eta_{o,hem} . G} \quad \textbf{(9)}$$

La Ecuación (9) resulta de despejar de la Ecuación (1) el modificador por ángulo de incidencia K_{hem} e imponer el estado estacionario ($dT_m/dt = 0$). Finalmente, el parámetro b_0 de la Ecuación (4) se determinó por regresión lineal usando como variable dependiente ($K_{hem} - 1$) y como variable independiente ($1/\cos(\theta) - 1$).

Ensayo de Capacidad Térmica: Este ensayo se hizo de acuerdo a la sección 25.2 de la norma ISO 9806:2017 pero teniendo en consideración el ajuste de segundo orden en las pérdidas térmicas, es decir el coeficiente a_2. Al inicio del ensayo se fijó una temperatura de entrada igual a la temperatura ambiente y luego se cubrió el colector con una manta reflectiva dejando que alcance el estado estacionario. Luego, la cubierta se removió y se dejó que el colector alcance un nuevo punto en estado estacionario, diferente al primero por el efecto de la irradiancia solar. La capacidad térmica efectiva se determinó integrado la Ecuación (1) sobre el periodo de tiempo entre los dos puntos de funcionamiento estacionarios, como se muestra en la Ecuación (10). Para esto se utilizaron los datos promediados cada 30 segundos.

$$\frac{C}{A_g} = \frac{\int_{t1}^{t2} \left(\eta_{0,hem} \cdot G - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \acute{Q}_u'' \right) dt}{T_{m2} - T_{m1}} \quad \textbf{(10)}$$

En este caso, también se realizó un seguimiento acimutal y por este motivo en la Ecuación (10) se asume incidencia normal (K_{hem} = 1).

Ensayo en estado Cuasi-Dinámico QDT

Para este ensayo se midió la energía útil por unidad de área para cuatro temperaturas de entrada diferentes. Los datos fueron promediados cada 5 minutos y para cada temperatura el periodo de medición fue de al menos 3 horas. Se verificó además que durante cada período de medición se cumplieran las condiciones de la Tabla 1, comparando los promedios cada 30 segundos con los promedios de todo el período de medición. Para la temperatura más baja se tomó una serie de datos realizando seguimiento acimutal, de modo de obtener medidas con bajo ángulo de incidencia, y otra serie de datos fijando el azimut del seguidor en 0° (orientación norte) para obtener ángulos de incidencia altos. Ambas series se tomaron bajo condiciones de cielo claro. Las temperaturas restantes se realizaron bajo distintas condiciones de cielo realizando seguimiento acimutal para trabajar con ángulos de incidencia pequeños (K_{hem} = 1). Si bien esto no es requisito de la norma, permite un mayor desacople de las variables dependientes y mejora la identificación de parámetros. Finalmente, las constantes $\eta_{0,b}$, a_1, a_2, b_0, K_d y C se determinaron todas a la vez por regresión lineal utilizando el modelo siguiente:

$$\acute{Q}_u'' = \eta_{0,b} \cdot G_b - \eta_{0,b} b_0 \left(\frac{1}{cos\theta} - 1 \right) G_b + \eta_{0,b} \cdot K_d \cdot G_d - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - \frac{C}{A_g} \frac{dT_m}{dt} \quad \textbf{(11)}$$

En donde la derivada temporal de la temperatura media del fluido se estimó por diferencias hacia adelante según:

$$\frac{dT_m}{dt} \cong \frac{T_m (t + \Delta t) - T_m (t)}{\Delta t} \quad \textbf{(12)}$$

En donde Δt = 300 s (correspondiente a 5 minutos). La Ecuación (11) surge de remplazar la Ecuación (4) en la Ecuación (3) y reordenar algunos términos. La variable dependiente en este caso es la energía útil por unidad de área y las variables independientes G_b, $(1/\cos(\theta)-1)$ G_b, G_d, (T_m-T_a), $(T_m-T_a)^2$ y dT_m/dt; los coeficientes a determinar son $\eta_{0,b}$, $\eta_{0,b}b_0$, $\eta_{0,b}K_d$, a_1, a_2 y C/A_g.

RESULTADOS

Comparación de métodos de ensayo

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos para ambos métodos. En dicha tabla se presentan los coeficientes de los modelos térmicos de las Ecuaciones (1) y (3), sus respectivas incertidumbres y el estadístico t para cada parámetro (cociente entre el valor de un parámetro y su incertidumbre). No se reportó la incertidumbre de los parámetros $\eta_{0,b}$ y K_d para el caso SST por tratarse de magnitudes derivadas (Ecuaciones (5) y (6)).

Tabla 2. Resultados

Parámetro	SST			QDT		
	Valor	Incert.	Valor/ Incert.	Valor	Incert.	Valor/ Incert
$\eta_{0,hem}$	0.716	0.002	358	-	-	-
$\eta_{0,b}$	0.720	-	-	0.718	0.003	290
b_0	0.105	0.006	17	0.108	0.010	11
K_d	0.920	-	-	0.963	0.012	80
a_1 (W/m^2.K)	4.035	0.117	36	3.903	0.179	22
a_2 (W/m^2.K^2)	0.011	0.002	6	0.013	0.003	4.5
C/A_g (J/K.m^2)	6,100	1,400	4.5	6,900	1,600	4.4

Fuente: Elaboración propia

En todos los casos se obtuvo un estadístico t mayor 3, que indica que los parámetros son estadísticamente significativos. Los parámetros $\eta_{0,b}$ y b_0 difieren en menos de 1% (cociente entre diferencia de los valores y el valor promedio) lo cual da cuenta de una buena concordancia entre estos parámetros. En el caso de los coeficientes a_1 y a_2 la diferencia es mayor, 3% y 18% respectivamente. Ahora, si se presta atención a la Tabla 2 se puede observar que el término a_1 en el caso SST es mayor que en el QDT y el término a_2 en el caso SST es menor que en el caso QDT, es decir, que la diferencia tiende a compensarse. El signo negativo de la covarianza entre estos dos parámetros, obtenido en los dos casos, confirma esta relación inversa. Este comportamiento no es nuevo; lo mismo se observa en las referencias (Fischer et al., 2004; Osório y Carvalho, 2014). Una forma más adecuada de comparar los coeficientes de pérdidas es utilizando un coeficiente de pérdida linealizado a una diferencia de temperatura dada ΔT, eso es:

$$a\,(\Delta T) = a_1 + a_2\,\Delta T \qquad \textbf{(13)}$$

Para una diferencia de 50 K se tienen a(50 K) = 4.585 W/m^2.K para el método SST y a(50 K) = 4.553 W/m^2.K para el caso QDT, lo que da una diferencia menor al 1%. Las mayores diferencias se presentan en el modificador de ángulo para la irradiación difusa K_d y para la capacidad térmica por unidad de área C/A_g, 5% y 12% respectivamente. Entendemos que la diferencia en K_d puede deberse en parte al factor de corrección empleado para corregir la media de difusa en plano horizontal por el efecto de

la banda de sombra. Este factor supone que la difusa es isotrópica, por lo tanto, este factor se puede mejorar utilizando factores de corrección que contemplen la anisotropía de la atmósfera (Batlle et al., 1995). Otro causante de esta diferencia puede ser que las horas bajo condiciones de cielo parcialmente y totalmente cubierto durante el ensayo realizado estén sub-representadas, dado que una adecuada representación de estas condiciones es importante para la determinación de este parámetro bajo la metodología QDT. La diferencia en la capacidad térmica efectiva puede deberse a dos motivos: (i) puede ser que la cantidad de horas en condiciones de cielo variable (variable dT_m/dt alta en valor absoluto) estén sub-representadas, y (ii) que el intervalo de tiempo 5 minutos para promediar los datos sea demasiado grande y por este motivo tal vez no se capturó correctamente el comportamiento dinámico del colector. Todos estos aspectos son motivo de nuestro trabajo actual, en particular, en lo que refiere a los factores de corrección de la radiación difusa.

Finalmente, para estudiar el efecto combinado de las diferencias entre los parámetros, se calculó para cada caso la energía útil producida por el colector utilizando la Ecuación (11), asumiendo incidencia normal y estado estacionario, para distintas condiciones de temperatura y de cielo. Para las distintas condiciones de cielo se utilizaron las condiciones de reporte estándar (*Standard Reporting Conditions*, SRC) dadas por la norma ISO 9806:2017. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Potencia útil (W) producida por el colector bajo distintas condiciones de cielo y temperatura

(T_m - T_a)	**Cielo claro** (G_b = 850 W/m^2, G_d = 150 W/m^2)			**Cielo parcialmente nublado** (G_b = 440 W/m^2, G_d = 260 W/m^2)			**Cielo cubierto** (G_b = 0 W/m^2, G_d = 400 W/m^2)		
	SST	**QDT**	**Dif.**	**SST**	**QDT**	**Dif.**	**SST**	**QDT**	**Dif.**
0	1,437	1,442	0.4 %	988	1,001	1.3 %	535	559	4.3 %
20	1,265	1,274	0.7 %	816	833	2.1 %	363	390	7.3 %
40	1,075	1,085	0.9 %	626	644	2.8 %	174	201	15 %
60	868	875	0.8 %	419	434	3.5 %	0	0	-

Fuente: Elaboración propia

Para condiciones de cielo claro la diferencia en la energía útil es poco significativa (menor al 1%). En condiciones de cielo parcialmente nublado la diferencia comienza crecer a medida que crece la diferencia de temperatura, si bien sigue siendo poco significativa. En condiciones de cielo cubierto la diferencia comienza a ser significativa alcanzando el 15 % a una diferencia de temperatura de 40 K. Entendemos que esa diferencia se debe principalmente a la diferencia en el modificador por ángulo de incidencia para la irradiancia difusa K_d, lo que es motivo actual de estudio.

Estimación de cantidad de ensayos anuales

Para mostrar la aplicabilidad del método QDT en el clima de la región, en la Tabla 4 se muestra un estimativo de la cantidad de ensayos posibles por mes en la localidad de Salto (Uruguay)

tanto para seguir el método SST realizando un seguimiento acimutal como para seguir el método QDT con una orientación norte, en ambos casos, con una inclinación horizontal fija de 45°. Una hora se considera válida para un tipo de ensayo si cumple las condiciones presentadas en la Tabla 1. Para el caso SST se verificó además que las horas fueran en condiciones de cielo claro. El análisis se realizó utilizando el año meteorológico típico de la localidad de Salto (latitud = 31.28° S, longitud = 57.92° O, altitud = 56 m sobre el nivel del mar), Uruguay, a escala horaria (Alonso-Suárez et al., 2019). Se supuso una duración de los ensayos de 10 horas para el caso SST y de 15 horas para el caso QDT, tiempo estimado en el cual se logra medir las variables necesarias para cada ensayo si se cumplen las condiciones de la Tabla 1. Además, para el caso QDT se impuso que al menos un 30% de las horas fueran con cielo claro, debido a que es importante para este ensayo capturar cierta dispersión en las condiciones meteorológicas, y las condiciones de cielo despejado no deben ser sub-representadas. Para verificar esta condición se impuso que el índice de cielo claro fuera mayor a 0.8 y que la irradiación horaria en incidencia normal (DNI) fuera mayor a 200 Wh/m^2. Para el cálculo del índice de cielo claro se utilizó la expresión dada por Pérez et al. (1990):

$$k'_t = \frac{k_t}{1 + 1.031e^{\left(\frac{-1.4m}{9.4 + 0.9m}\right)}} \quad \textbf{(14)}$$

En donde k_t es el índice de claridad horario usual (cociente entre la irradiación horaria global en plano horizontal y la correspondiente irradiación en un plano horizontal en el tope de la atmósfera) y *m* es la masa de aire (Duffie y Beckman, 2013).

Tabla 4. Comparativa de cantidad de ensayos posibles por mes

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
SST	1.0	1.2	3.5	5.0	2.3	2.6	3.4	3.4	4.6	2.7	1.9	1.5	33
QDT	2.0	2.4	5.8	10.2	6.8	8.8	10.2	9.2	9.2	5.4	3.8	3.0	76

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se puede ver que la cantidad de ensayos posibles en un año en el caso QDT es más del doble que la cantidad de ensayos en el caso SST. Esta proporción coincide con lo estimado en otras localidades (Rojas, 2008; Osório y Carvalho, 2014).

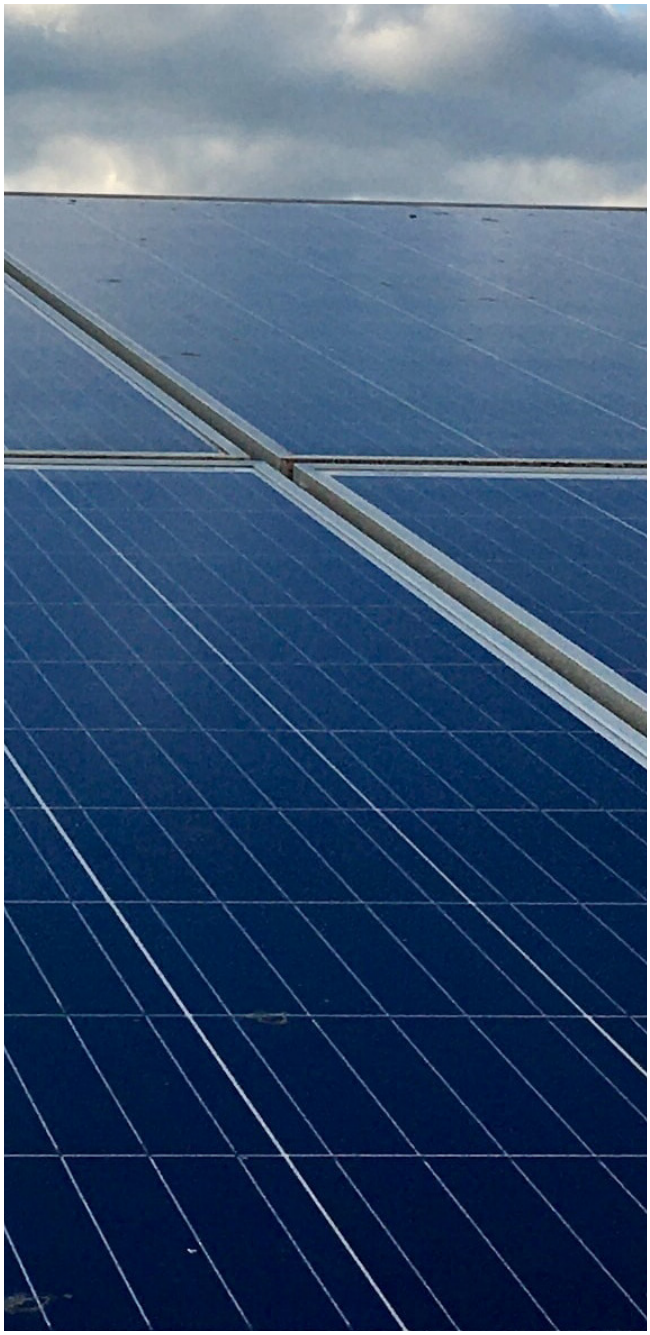
CONCLUSIONES

Se estudió la aplicabilidad del método cuasi dinámico en Uruguay y se determinó la cantidad de ensayos a nivel anual que podrían llegar a realizarse si se siguiera este método. Esta cantidad es mayor al doble de la cantidad de ensayos que podrían obtenerse con la metodología tradicional en estado estacionario, lo cual muestra la ventaja de la metodología QDT en Uruguay y en la región climática homogénea de la Pampa Húmeda del sureste de Sudamérica.

Por otra parte, se concluye que el método QDT se implementó correctamente para el colector estudiado y se puede utilizar en el clima de

la región, en tanto, su comparación con los ensayos SST está dentro de lo esperado y reportado en otras publicaciones. La principal diferencia entre los parámetros se observó en K_d y C/A_g. Teniendo en cuenta que el parámetro K_d afecta la producción de energía útil del colector en condiciones de cielo parcialmente nublado y cubierto, y que además una porción significativa de las horas en el año en nuestro país corresponde a este tipo de condiciones (Alonso-Suárez et al., 2019), consideramos importante continuar estudiando los motivos de esta diferencia. La diferencia en el parámetro C/A_g es otro punto a estudiar a futuro. Si bien en muchos programas de simulación de colectores este término no es tenido en cuenta, restándole importancia (asumen estado estacionario), en el ensayo QDT este término es determinado de forma simultánea con los otros parámetros y, por lo tanto, una mala determinación de éste puede afectar negativamente a los otros.

El presente trabajo creemos es un paso significativo en el desarrollo de capacidades de ensayo de colectores solares en la región. No obstante, entendemos necesario continuar ensayando colectores de placa plana y en especial otros tipos de colectores, como los de tubos al vacío, para poner a punto la metodología QDT. Esperamos que el presente trabajo impulse el uso de la metodología de ensayos QDT no sólo en nuestra región, sino en el resto de Latinoamérica y que ésta pueda ser validada para su uso en otros climas o países.



•••

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM, Uruguay), en especial a su Dirección Nacional de Energía (DNE), al Fideicomiso Uruguayo de Ahorro y Eficiencia Energética (Fudaee, Uruguay) y a la Corporación Nacional para el Desarrollo (CND, Uruguay), por haber proporcionado apoyo financiero y logístico para el desarrollo del BECS y haber impulsado este proyecto con capacidades nacionales. Los autores agradecen también al PTB de Alemania por impulsar y financiar el inter-laboratorio de ensayos de eficiencia de colectores solares, lo que nos ha brindado certezas técnicas sobre la capacidad de ensayo local.

NOMENCLATURA

$\mathbf{A_g}$	área bruta del colector (m^2)
$\mathbf{a}$	factor de pérdidas térmicas linealizado ($W/(m^2.K)$)
$\mathbf{a_1}$	factor de pérdidas térmicas de primer orden ($W/(m^2.K)$)
$\mathbf{a_2}$	factor de pérdidas térmicas de segundo orden ($W/(m^2.K^2)$)
$\mathbf{b_0}$	factor de ajuste del modificador de ángulo (adimensionado)
$\mathbf{C}$	capacidad térmica del colector (J/K)
$\mathbf{C_p}$	calor específico del fluido a la temperatura T_m (J/Kg.K)
$\mathbf{f_d}$	fracción difusa en el plano del colector (adimensionado)
$\mathbf{G}$	irradiancia solar global en el plano del colector (W/m^2)
$\mathbf{G_b}$	irradiancia solar directa en el plano del colector (W/m^2)
$\mathbf{G_d}$	irradiancia solar difusa en el plano del colector (W/m^2)
$\mathbf{k_t}$	índice de claridad
$\mathbf{k_t'}$	índice de cielo claro
$\mathbf{K_{hem}}$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar global (adimensionado)
$\mathbf{K_b}$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar directa (adimensionado)
$\mathbf{K_d}$	modificador por ángulo de incidencia de la irradiancia solar difusa (adimensionado)
$\mathbf{m}$	masa de aire
$\boldsymbol{\acute{m}}$	caudal másico de fluido que circula a través del colector (kg/s)
$\mathbf{\acute{Q}_u''}$	energía útil producida por el colector por unidad de área (W/m^2)
$\mathbf{T_i}$	temperatura del fluido a la entrada del colector (°C)
$\mathbf{T_o}$	temperatura del fluido a la salida del colector (°C)
$\mathbf{T_m}$	temperatura media del fluido en el colector (promedio de la entrada y la salida) (°C)
$\mathbf{T_a}$	temperatura ambiente (°C)
$\boldsymbol{\eta_{0,hem}}$	rendimiento máximo del colector referido a irradiancia solar global (adimensionado)
$\boldsymbol{\eta_{0,b}}$	rendimiento máximo del colector referido a irradiancia solar directa (adimensionado)
$\boldsymbol{\theta}$	ángulo de incidencia en el plano del colector (°)

REFERENCIAS

Alonso-Suárez R., Bidegain M., Abal G., Modernell P. (2019). *Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar (AMTUes): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay*. Ediciones Universitarias (UCUR) de la Universidad de la República (Udelar), ISBN 978-9974-0-1674-7.

Batlles, F.J., Olmo, F.J. y Alados-Armboledas, L. (1995). On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy, 54*(2): 105-114.

Duffie, J.A. y Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, third edition, 2006.

Fischer, S., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Perers, B., Bergquist, P., Hellström, B. (2004). Collector test method under quasi-dynamic conditions according to the European Standard EN 12975-2. *Solar Energy, 76*(1-3):117-123.

Fisher, S. (2020). *Expert Report - Quality Infrastructure for Energy Efficiency and Renewable Energy in Latin America and the Caribbean*. + Report #95309. Recuperado de http://les.edu.uy/papers/Expert_Report-RR-Test_R1.pdf

García de Jalón, A., Sallaberry, F., Olano, X., Mateu, E., Astiz R., Ezcurra, M., Ramírez, L. (2011). Comparison of thermal efficiency curves of solar collectors tested in outdoor conditions. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 28 august - 2 september, Kassel, Germany.

International Energy Agency (IEA). (2016a). Final Energy Consumption in the World. Recuperado de https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption

International Energy Agency (IEA). (2016b). Final Energy Consumption in Uruguay. Recuperado de https://www.iea.org/Sankey/#?c=Uruguay&s=Final20consumption

ISO 9806. (2017). *Solar Energy – Solar thermal collectors – Test methods*. Switzerland: International Organization of Standarization.

Kovács, P., Petterson, U., Persson, M., Perers, B., Fischer, S. (2011). Improving the accurancy in performance prediction for new collector deings. *Proceedings of ISES Solar World Congress*, 28 august - 2 september, Kassel, Germany.

Kratzenberg, M.G., Beyer, H.G., Colle, S. (2006). Uncertainty calculation applied to different regression methods in the quasi-dynamic collector test. *Solar Energy, 80*, 1453-1462.

Muschaweck, J. y Spirkl, W. (1993). Dynamic solar collector performance testing. *Solar Energy Materials and Solar Cells, 30*(2):95-105.

Osório, T. y Carvalho, M. (2014). Testing of solar thermal collectors under transient conditions. *Solar Energy, 104*, 71-81.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. y Mcmahon, T.A. (2007). Update world mapo of the köppen-geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 11*, 1633-1644.

Perers, B. (1993). Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation programas. *Solar Energy, 50*(6), 517-526.

Pérez, 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.

Renewable Energy Policy Newtwork for the 21st Century (REN21). (2018). Renewables 2018 Global Status Report. Recuperado de http://www.ren21.net/gsr-2018/pages/foreword/foreword/

Rojas, D., Beermann, S.A., Klein, S.A. y Reindl, D.T. (2008). Thermal performance testing of flat-plate collectors. *Solar Energy, 82*, 746-757.

Zambolin, E. y Del Col D. (2010). Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions. *Solar Energy, 84*, 1382-1396.

olade
ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA | LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION | ORGANIZAÇÃO LATINO-AMERICANA DE ENERGIA | ORGANISATION LATINO-AMERICAINE D'ENERGIE

BID
Banco Interamericano de Desarrollo

V SEMANA DE LA ENERGIA

Modalidad Virtual

https://www.youtube.com/user/oladeorg

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA DE 50 kW CONECTADA A LA RED, EN EL CAMPUS UNIVERSITARIO DE COTA COTA, UBICADA EN LA CIUDAD DE LA PAZ, BOLIVIA

EFFICIENCY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF ELECTRICITY IN THE PHOTOVOLTAIC SOLAR CENTRAL OF 50 kW, IN THE UNIVERSITY CAMPUS OF COTA COTA, LOCATED IN LA PAZ, BOLIVIA

Álvaro Montano Saavedra[1], María Belén Aruquipa Saravia[2], Cristian Limachi Ochoa[3]

Recibido: 30/05/2020 y Aceptado: 09/09/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (28 - 38)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Thomas Despeyroux de Unsplash.

1 Universidad Federal de Pará (UFPA). Brasil
alvaromontano2009@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-3642-7570

2 Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
mabelenmb.mbas@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-7283-1928

3 Universidad Mayor de San Andrés. Facultad de Ingeniería. Bolivia. ecotecelm@yahoo.com
http://orcid.org/0000-0003-4769-1980

RESUMEN

El artículo tiene como objetivo realizar un análisis de energía eléctrica en la Central Solar Fotovoltaica (CSFV) de 50 kW, emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, que fue construida por donación de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) canalizada a través del Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA), y actualmente se encuentra a cargo del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés. La Central comenzó a operar a inicios de 2018 y almacena información periódica de irradiación y temperatura ambiente, la energía generada en la CSFV y la inyectada a la red de la empresa distribuidora de energía eléctrica en La Paz (DELAPAZ). La Central fue diseñada bajo el concepto de generación distribuida, es decir, toda la energía generada es inyectada a la red. Se considera que por su ubicación, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos debe ser mayor al estipulado en condiciones estándar; en ese sentido, el resultado del análisis realizado a los datos recopilados, muestra que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos se encuentra alrededor del 17%, y que se deben considerar otros aspectos que inciden en este valor: limpieza y mantenimiento de los paneles fotovoltaicos, efecto sombra, etc.

Palabras clave: Central Solar Fotovoltaica, Generación de Energía, Eficiencia Energética, Paneles Fotovoltaicos, Irradiación, Bolivia.

ABSTRACT

The article has as objective to perform the analysis of electrical energy on the 50 kW Photovoltaic Solar Central located in Cota Cota's University Campus, which was built thanks to a donation from Japan International Cooperation Agency (JICA), that is now under the charge of Universidad Mayor de San Andrés' Electric Engineering Investigation Institute. This Central began to operate in early 2018, and till the date has stored periodic information regarding radiation and temperature on photovoltaic panels, generated energy of the Photovoltaic Solar Central and injected in the electric distributor company's grid circuit of La Paz (DELAPAZ). The Central was designed under the concept of distributed generation, which means that all the generated energy is injected to the grid. It is considered that due to its geographical location, the photovoltaic panels' efficiency should be greater than stipulated on standard conditions; however, the results of the analysis made to collected data, shows that photovoltaic panels' efficiency is around 17%, and it must be considered other factors affecting efficiency: cleanliness and maintenance of photovoltaic panels, shadow effect, etc.

Keywords: *Photovoltaic Solar Central, Energy Generation, Energy Efficiency, Photovoltaic Panels, Irradiation, Bolivia.*

Bolivia es un país con grandes posibilidades de implementación de sistemas de generación con energías alternativas y renovables, sin embargo, el concepto de generación distribuida todavía no fue colocado en práctica, debido a varios factores.

INTRODUCCIÓN

Bolivia es un país que cuenta con grandes posibilidades de implementación de sistemas de generación con energías alternativas y renovables, y que ha tenido gran relevancia en los últimos años con la construcción de pequeñas centrales fotovoltaicas, parques eólicos y pequeñas centrales hidroeléctricas conectadas al Sistema Interconectado Nacional. Sin embargo, el concepto de generación distribuida todavía no fue colocado en práctica, debido a varios factores, como ser: normativos, regulatorios, técnicos, culturales y otros.

En ese sentido, la energía solar fotovoltaica se presenta como una opción para iniciar el desarrollo del concepto de generación distribuida; entonces, el realizar investigaciones específicas acerca del desempeño de Sistemas Solares Fotovoltaicos conectados a la Red de Energía Eléctrica de la empresa distribuidora en la ciudad de La Paz (que por sus características topográficas y climáticas cuenta con aspectos especiales que deben ser tomados en cuenta) permitirá conocer información relevante acerca de: la radiación solar en la zona, la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en la altura, el rendimiento del conjunto de todo el sistema fotovoltaico, además de otros aspectos importantes; así mismo, posibilitará estimar la cantidad de energía eléctrica que se podrá generar en ciertos períodos de tiempo y realizar la difusión y transferencia de conocimientos de éste tipo de sistemas, entre los alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Mayor de San Andrés.

Al respecto, se debe mencionar que actualmente se cuenta con escasa bibliografía relacionada con estudios realizados al desempeño de sistemas fotovoltaicos en localidades situadas a alturas mayores a 3,000 m.s.n.m.; por otra parte, en Bolivia se cuenta con un mapa solar, el cual promedia extensas regiones de 1° de latitud por 1° de longitud en base a imágenes satelitales de la NASA y un método de interpolación, para

estimar la radiación recibida en función de los meses del año. La exactitud de este mapa no ha sido verificada por un periodo a largo plazo. Al respecto, se estima que en general, la exactitud de datos de satélites es muy variable y en muchos casos supera el 10% (Salcedo at al., 2015). Entonces, una red de medición de radiación solar en Bolivia, podría dar datos más precisos para el diseño de sistemas fotovoltaicos, además de posibilitar que se realice el ajuste al mapa de radiación solar boliviano existente.

En relación a las CFVs en operación en otros países, según (García at al., 2014), las compañías de monitorización están desarrollando métodos de análisis de datos para procesarlos en tiempo real para sus sistemas específicos y medidas de rendimiento; sin embargo, una comprobación de las lecturas de las medidas utilizadas comúnmente por las empresas constató que varios métodos analíticos se utilizan para calcular la misma medida o están utilizando un método analítico con resultados variados debido al entorno del sistema. En consecuencia, estos dos casos son problemáticos porque se obtienen conclusiones incorrectas.

En ese sentido, el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis de la producción de energía eléctrica de la Central Solar Fotovoltaica (CSFV) de 50 kW, emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, determinando la eficiencia de los paneles fotovoltaicos a través de los datos reales recolectados de irradiación y temperatura ambiente, que fueron recopilados y almacenados por los instrumentos y el sistema de adquisición de datos con la que cuenta la Central. En relación a la temperatura de operación del panel, ésta obedece a una relación lineal que depende de la temperatura ambiente, de la irradiación solar sobre el plano del panel y del parámetro “k” que varía según la tipología del panel y la velocidad del viento (Romero at al., 2011).

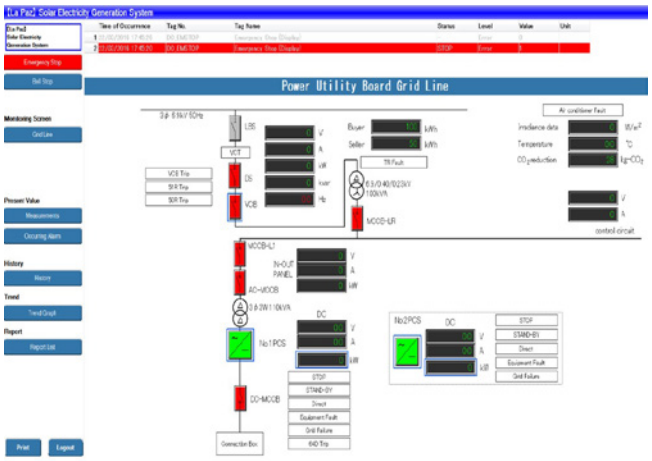
MATERIALES Y MÉTODOS

La Central Solar Fotovoltaica (CSFV) del Campus Universitario de Cota Cota fue inaugurado en el mes de marzo de la gestión 2019 (Fotografía 1) y fue ejecutado gracias a una donación de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Tiene una capacidad instalada de 50 kW (192 paneles FV) y cuenta con equipos de medición de radiación solar, temperatura ambiente y parámetros eléctricos de la Central.

En ese sentido, se realizó la recopilación y sistematización de los datos de la Central, referentes a: la irradiación solar que reciben los paneles fotovoltaicos, la temperatura ambiente a la que se encuentran los mismos y la energía generada por el sistema. Estos datos permitieron determinar la eficiencia real de los paneles fotovoltaicos emplazados a 3,492 m.s.n.m. aproximadamente, y analizar posibles factores que afectan su desempeño.

Fotografía 1. Central Solar Fotovoltaica emplazada en el Campus Universitario de Cota Cota, Facultad de Ingeniería UMSA

Fotografía 2. Sistema de adquisición de datos de la Central Solar Fotovoltaica

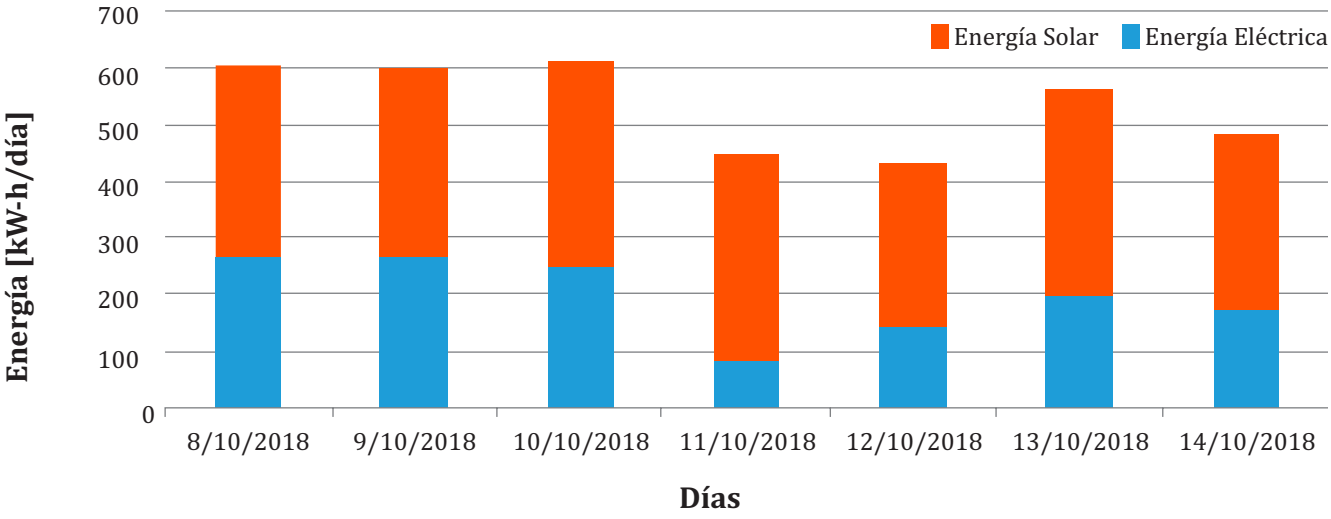


Fotografía 3. Panel de información de parámetros de la Central Solar Fotovoltaica

RESULTADOS

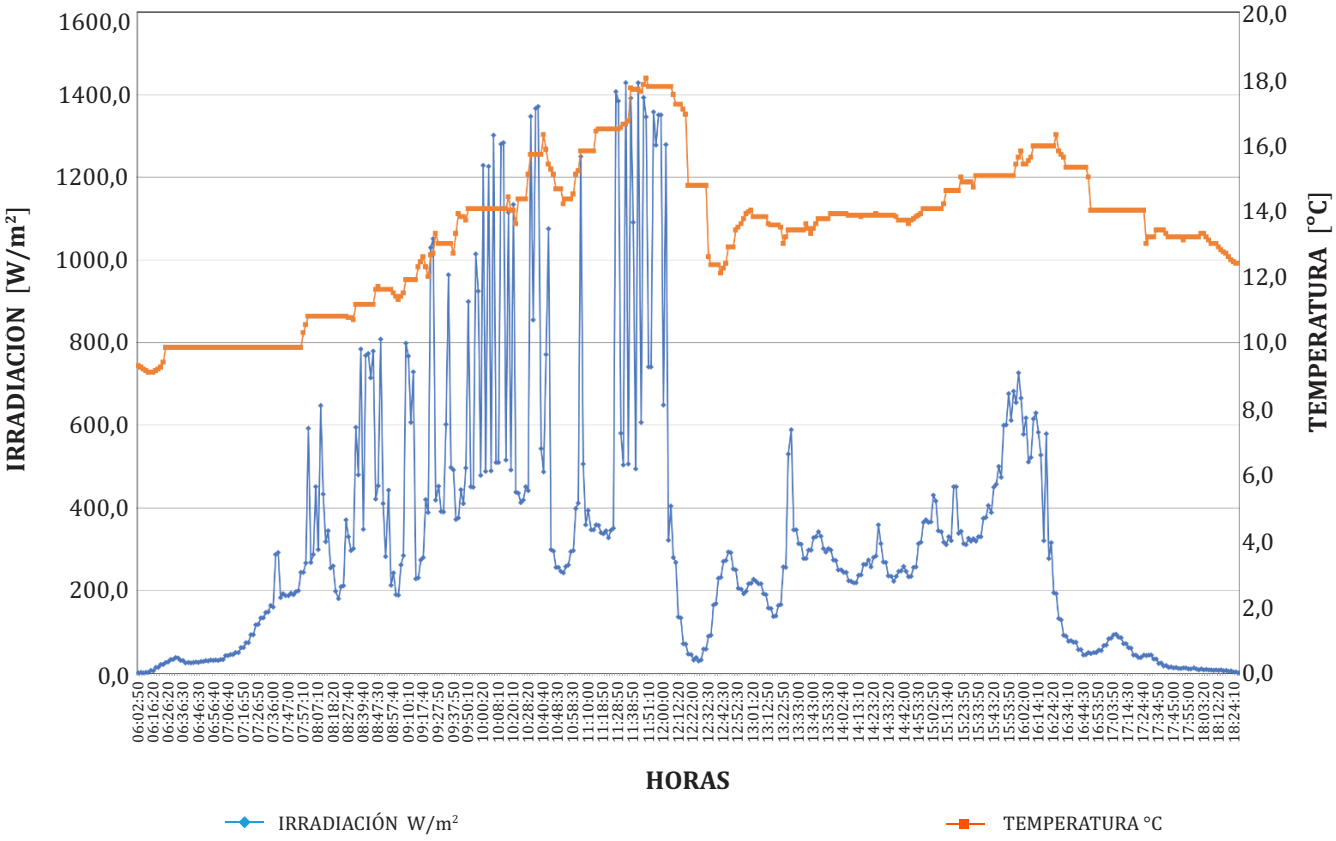
Para el análisis del desempeño de la CSFV y la determinación de la eficiencia de los PFVs, se recopiló información desde el momento de entrada en operación de la Central (marzo de 2018) hasta el mes de mayo del 2019; debido a la gran cantidad de información disponible, en primera instancia se identificaron los períodos de tiempo en los cuales se disponía de la totalidad de información acerca de las variables: irradiación, temperatura y energía eléctrica generada. En la Figura 1 se puede observar la relación existente entre la energía solar y la energía eléctrica producida en la CFV, durante una semana del mes de octubre de la gestión 2018. La Figura 2 presenta la información recopilada que consta de más de 400 datos, correspondientes al día 12 de octubre.

Figura 1. Energía Solar recibida y Energía Eléctrica producida en la CFV evaluadas en la semana del 8 al 12 de octubre de la gestión 2018



Fuente: Elaboración propia con información del Sistema de adquisición de datos de la Central Fotovoltaica (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Figura 2. Irradiancia y temperatura ambiente (12/10/18)



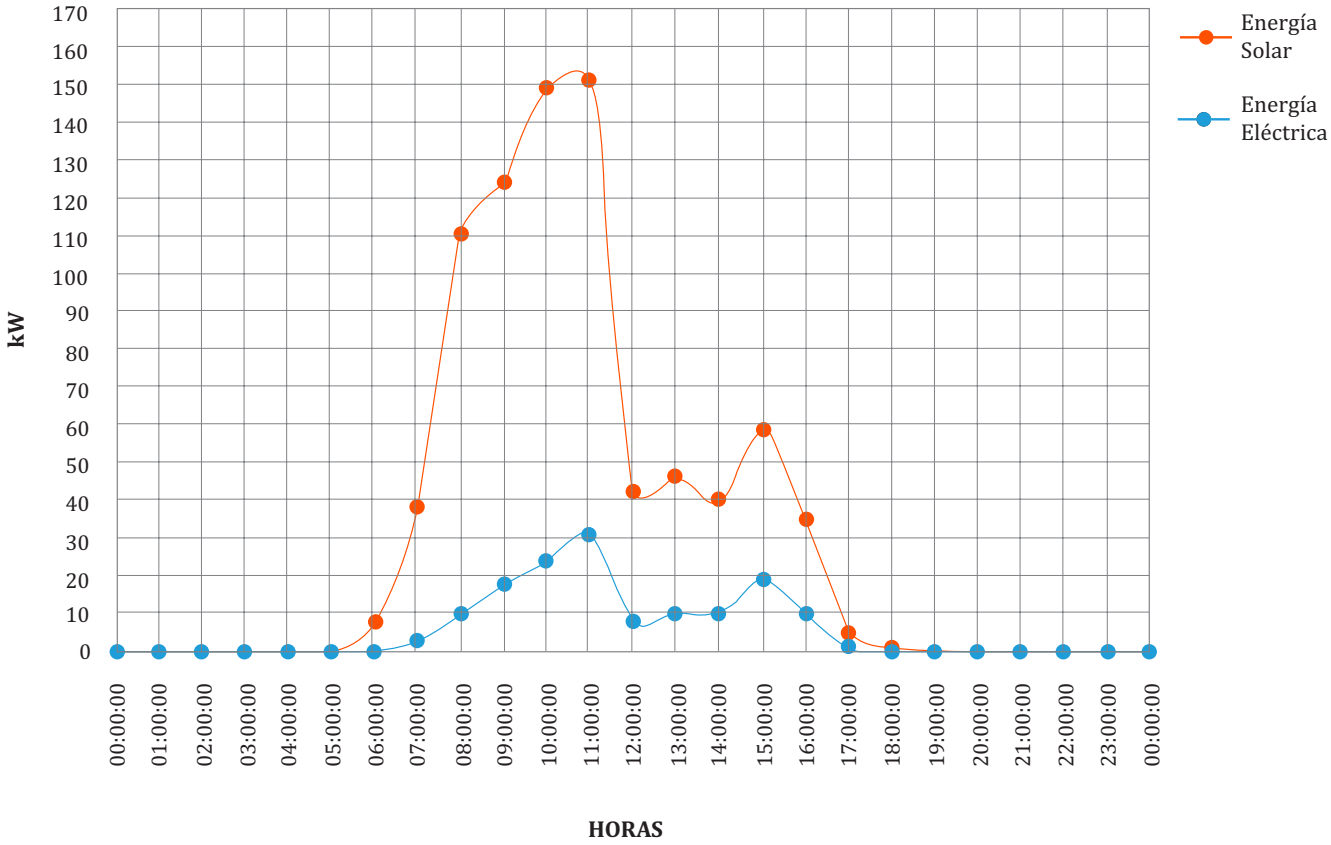
Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y la temperatura ambiente (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Como se puede observar, la irradiación presente en la CSFV y aprovechable para su conversión a energía eléctrica, es variable dependiendo de la hora del día, influenciado también por aspectos climatológicos, como la presencia de nubes y precipitaciones pluviales, lo que repercute en la cantidad de potencia firme que puede ser entregado por el sistema. En la Figura 3, se muestra la energía solar recibida por la Central Solar Fotovoltaica y la generación de energía eléctrica, para el mismo periodo de tiempo estudiado.

La irradiación presente en la CSFV y aprovechable para su conversión a energía eléctrica, es variable dependiendo de la hora del día, influenciado también por aspectos climatológicos.

Es importante mencionar que los valores máximos de irradiación presentes en el lugar de emplazamiento de la CSFV, son superiores a las 1,400 [W/m^2], lo que incide directamente en la cantidad de energía disponible y aprovechable.

Figura 3. Energía solar recibida y energía eléctrica generada de la CSFV (12/10/18)

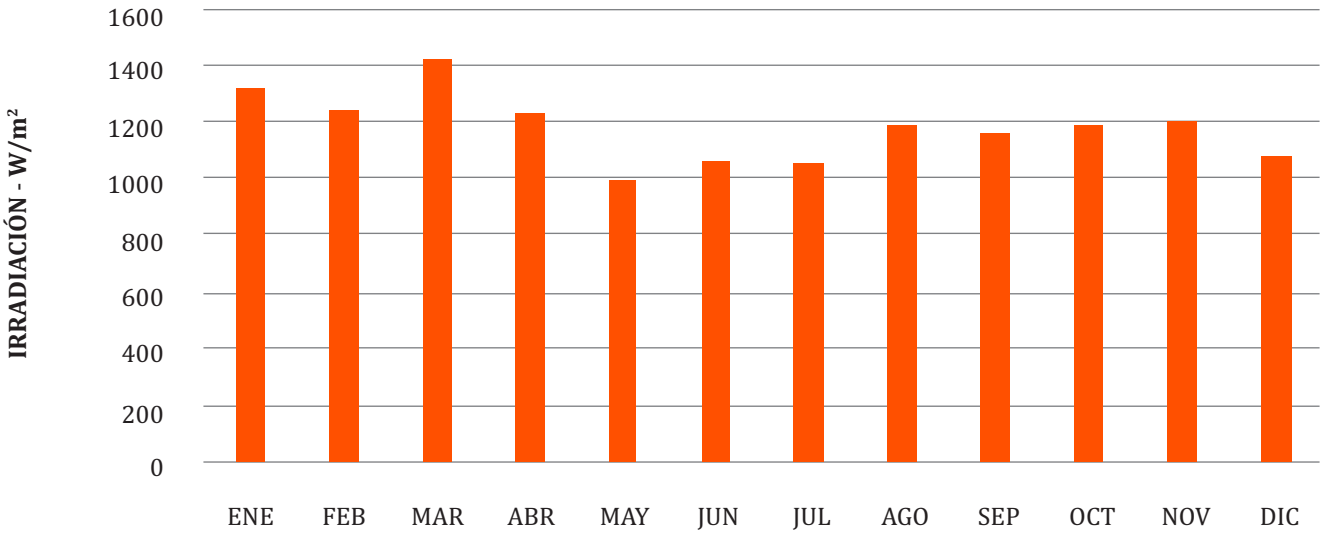


Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de energía solar recibida y energía eléctrica generada (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Luego de realizado el análisis de la información disponible en el período de tiempo especificado, con relación a la energía solar recibida (empleando datos de irradiación captados por el sistema de la CSFV, además del área total de los PFVs) y a la energía eléctrica generada (información recolectada por el sistema de la CSFV, a la salida de los PFVs), se determinó que la eficiencia promedio de los módulos de la CSFV está próxima al 17% (en promedio del período en estudio), lo cual representa un valor aceptable comparada con la información dada por el fabricante de los paneles fotovoltaicos y a las experiencias en otros países disponible en la bibliografía, para el desempeño de CSFV conectadas a la red. Al respecto, según (Varo y Menéndez, 2017), el sistema fotovoltaico conectado a la red, instalado en el techo del edificio de la Escuela Profesional de Física de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa – Perú, ubicado en latitud 16.2°S, longitud 71.3°O, y elevación 2,374 m.s.n.m., presenta una eficiencia media de los paneles fotovoltaicos de 13.63%.

La cantidad de irradiación solar media mensual, con datos medidos en la CSFV del Campus Universitario de Cota Cota, se muestra en la Figura 4; en el mismo se puede observar que los valores máximos de irradiación, del orden de 1,400 [W/m^2], se producen en el verano y disminuyen a valores del orden de 1,000 [W/m^2] en los meses de invierno.

Figura 4. Irradiación solar en el Campus de Cota Cota. 16 ° 32´ 17´´S, 68 ° 03´ 44´´ O 3,492 m.s.n.m.

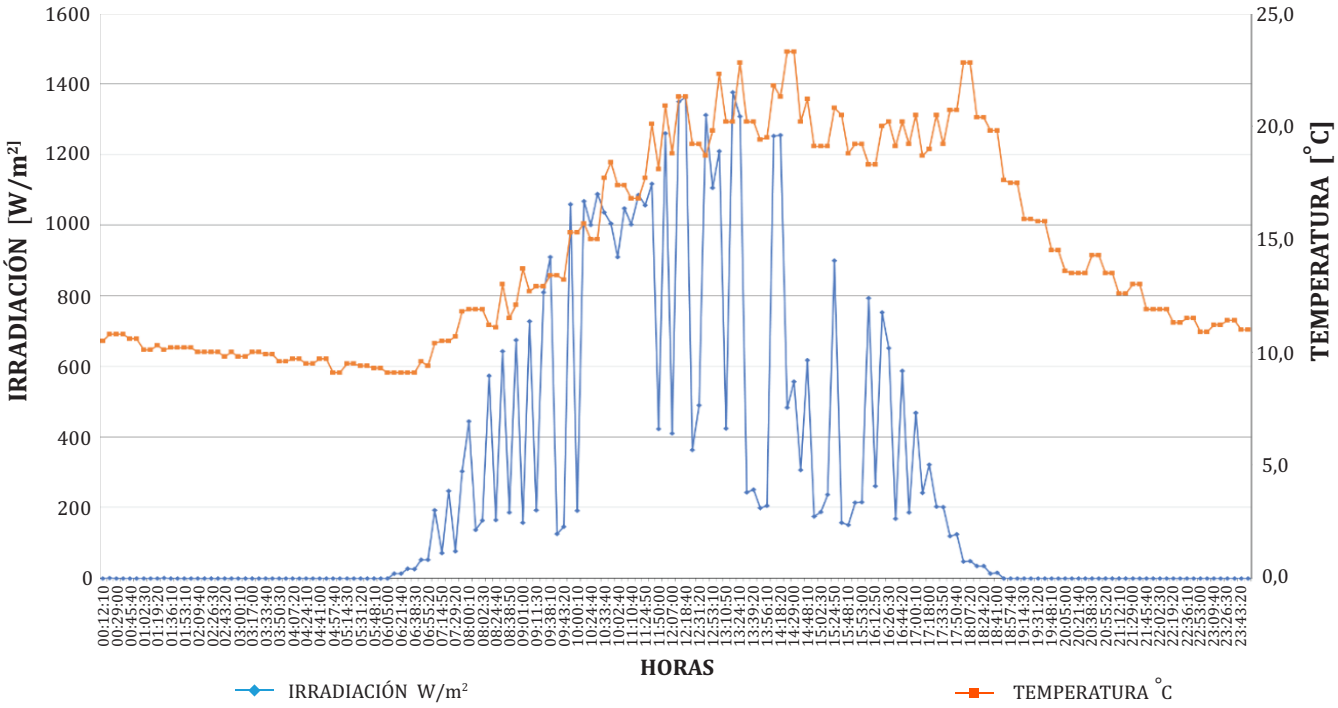


Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

Los valores de irradiación y temperatura ambiente, alcanzados en un día de verano y otro en invierno son mostrados en las Figuras 5 y 6; en las mismas se puede observar que si bien la irradiancia y la temperatura son mayores en verano, la diferencia de estos valores en la época de invierno no es muy grande, como ocurre en otras regiones y países que se encuentran a una latitud sur mayor a la ubicación de la ciudad de La Paz.

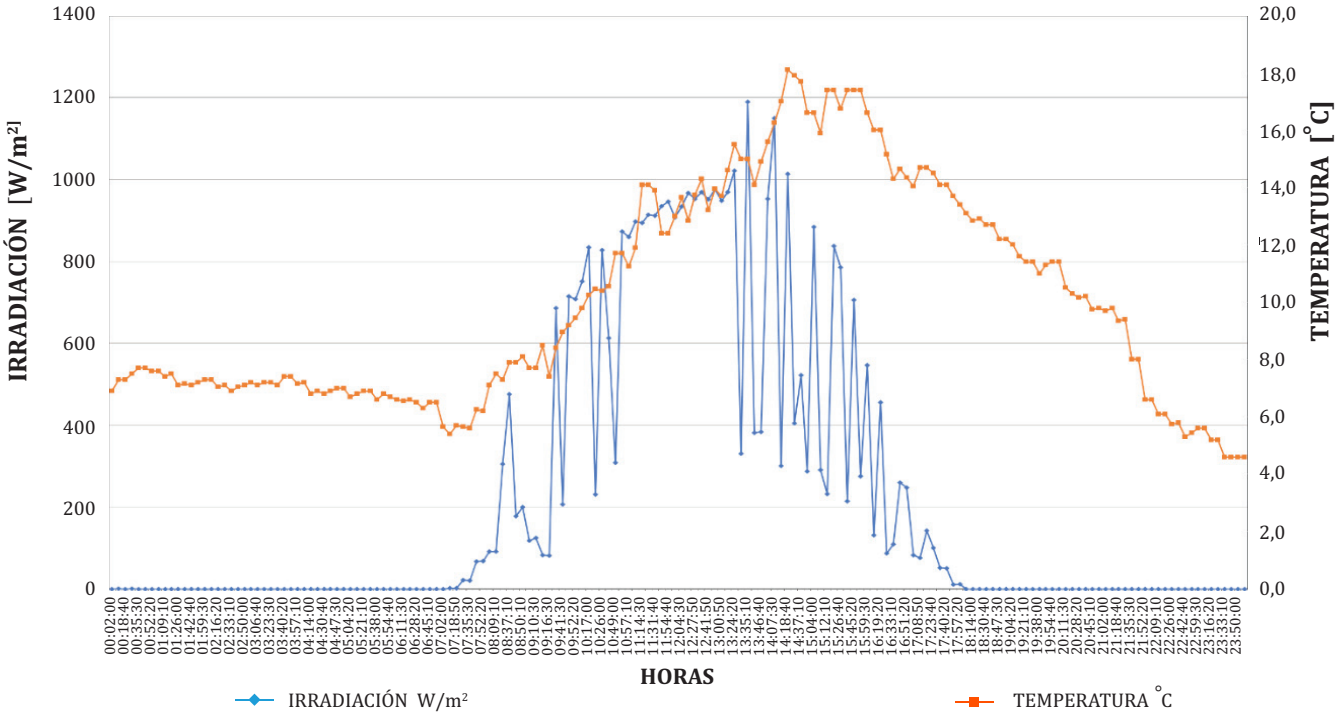
Foto de Max Lederer de Unsplash.

Figura 5. Irradiación y Temperatura en la CFV, Verano



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y temperatura en verano (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

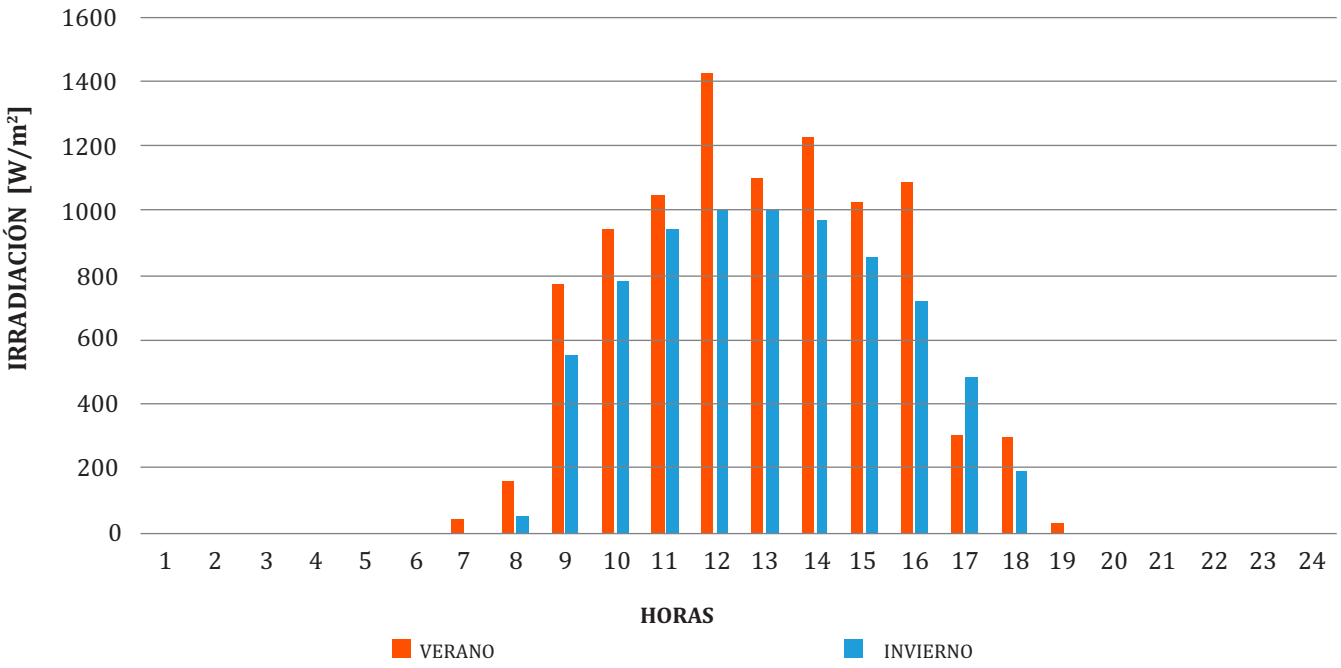
Figura 6. Irradiación y Temperatura en la CFV, Invierno



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación y temperatura en invierno (Campus Universitario de Cota Cota, 2018).

La irradiación solar horaria en el campus de Cota Cota, correspondiente a los solsticios de verano e invierno, se muestra en la Figura 7; en la misma, la diferencia entre la cantidad de energía para las distintas épocas del año se aprecia claramente.

Figura 7. Irradiación solar en la CFV del campus de Cota Cota, solsticio de verano y solsticio de invierno



Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de irradiación en Verano e invierno (Campus Universitario de Cota Cota, 2018)

DISCUSIÓN

Los resultados encontrados luego de la recopilación de datos y análisis realizados, muestran que el desempeño de la Central Solar Fotovoltaica es aceptable, llegando a obtener una eficiencia de los PFVs cercana al 17% para el periodo analizado. Se debe tomar en cuenta que la CSFV opera en condiciones muy diferentes a las estipuladas en las denominadas condiciones estándar y que, para poder determinar criterios de evaluación más certeros, de deben analizar la mayor cantidad de datos posible, en mayores períodos de tiempo (semestrales, anuales).

También se deben tomar en cuenta que existen otros factores externos que influencian en el desempeño de la CSFV, como el estado de limpieza de los paneles y el efecto sombra que puede ser producido por los árboles presentes en la zona.

CONCLUSIONES

El valor de la eficiencia encontrado en relación a la energía solar recibida por los paneles fotovoltaicos y la energía eléctrica generada por

los mismos, para el período de tiempo analizado, es cercano al 17%, lo cual muestra un desempeño aceptable de la Central Solar Fotovoltaica, en relación a los datos proporcionados por el fabricante y a estudios realizados en Centrales de similares características conectadas a la red. Sin embargo, es necesario realizar un estudio más profundo analizando toda la información disponible desde la puesta en operación de la CSFV, tomando en cuenta periodos de tiempo más amplios que posibiliten la determinación de modelos matemáticos que puedan ser usados para el pronóstico de la generación de energía eléctrica en situaciones típicas, así como la comprensión de la dinámica del comportamiento de la Central.

El continuo almacenamiento de datos de la CSFV (irradiación, temperatura, parámetros eléctricos) desde la puesta en funcionamiento de la misma (marzo 2018), constituye una información valiosa que posibilitará el desarrollo de diversos trabajos de investigación, con el fin, entre otros, de poder brindar datos más precisos que puedan ser empleados para el diseño de sistemas fotovoltaicos en localidades de topografía y condiciones similares a las del Campus Universitario de Cota Cota, además de posibilitar que se realice un ajuste al mapa de radiación solar boliviano existente.

•••

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA) por el financiamiento de la construcción de la CSFV y al Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Mayor de San Andrés, por facilitar el uso de equipos y recolección de información para la realización de la presente investigación.

REFERENCIAS

García, L., Vilariño, J., Arenas, C., Núñez, G. y Menéndez, H. (2014). *Rendimiento Global de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica*. Madrid. Universidad Alfonso X El Sabio.

Romero, F., Urquidi, O., Ormachea, O., Abrahamse, A., Pearce, J., Andrews, R. y Vuono, M. (2011). Desarrollo de un sistema de monitoreo de radiación solar basado en un espectrómetro de amplio espectro. *Investigación & Desarrollo, 1*(11), 73 – 84.

Salcedo, T., Montoya, A., Palo, E. y Morante, F. (2015). *Evaluación del Desempeño de un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red de 3.3 kW en la Ciudad de Arequipa. Arequipa*. XXII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.

Varo, D. y Menéndez, H. (2017). *Análisis del Rendimiento de un Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red de 10 MW, Excluyendo el Efecto de la Temperatura*. Madrid. Universidad Alfonso X El Sabio.

CONVOCATORIA

PARA POSTULACIÓN DE ARTÍCULOS

MÁS INFORMACIÓN

enerlac@olade.org

CALL FOR

SUBMISSION OF ARTICLES

MORE INFORMATION

enerlac@olade.org

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA TRANSMISIÓN SOLAR DE DOS TIPOS DE PROTECCIONES SOLARES PARA DISTINTAS POSICIONES EN MONTEVIDEO, URUGUAY

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE SOLAR TRANSMISSION OF TWO TYPES OF SOLAR PROTECTIONS FOR DIFFERENT POSITIONS IN MONTEVIDEO, URUGUAY

Lucía Pereira Ruchansky [1], Lucía Gutiérrez Bazterrica [2], Daniel Sosa Ibarra [3], María Noel López Salgado [4], Magdalena Camacho Roberts [5]

Recibido: 14/02/2020 y Aceptado: 31/07/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (40 - 56)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Roy Wen de Unsplash.

1 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Uruguay.
lpereira@fadu.edu.uy
http://orcid.org/0000-0002-4697-3348

2 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Uruguay.
lugutib@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-9620-2296

3 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Uruguay.
dsosa@fadu.edu.uy
http://orcid.org/0000-0001-8218-2490

4 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Uruguay.
marianoelopezsalgado@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-3926-1625

5 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo. Uruguay.
magdalenacr@gmail.com
http://orcid.org/0000-0003-0694-7599

RESUMEN

La tendencia de la arquitectura de las últimas décadas promueve la utilización del vidrio como lenguaje expresivo. En un clima templado como el de Montevideo, este hecho puede tener efectos negativos sobre el ambiente interior y en consecuencia, sobre el confort y consumo de energía. Esto implica la necesidad de determinar criterios de diseño que logren mantener niveles adecuados de confort térmico y lumínico con un uso eficiente de la energía.

La investigación evalúa el comportamiento de algunas protecciones solares frente a la radiación solar térmica abarcando condiciones de uso en fachadas en Montevideo. El artículo tiene por objetivo presentar resultados experimentales para dos protecciones solares (tela *screen* y chapa perforada trapezoidal) ensayadas en condiciones de cielo real, en posición vertical para tres orientaciones (este, norte y noroeste) y en posición perpendicular a la radiación solar directa incidente.

Los resultados de transmisión solar obtenidos de forma experimental, permiten identificar que el comportamiento de las protecciones solares está estrechamente vinculado a su posición relativa al sol -ángulo de radiación incidente- y a la geometría de la protección solar; poniendo en discusión el factor solar como parámetro representativo del comportamiento de las protecciones solares en condiciones de uso y su utilidad como herramienta de diseño.

Palabras clave: Transmisión Solar, Factor Solar, Protección Solar, Radiación Solar, Eficiencia Energética, Cerramientos transparentes, Uruguay.

ABSTRACT

In last decades, architecture promotes the use of glass as an expressive language. In a temperate climate like Montevideo, this fact can have negative effects on the interior environment and, consequently, on thermal comfort and energy consumption. This implies the need to determine design criteria to maintain thermal and light comfort with efficient use of energy.

The research evaluates the behavior of some solar protections against thermal solar radiation, covering conditions of use on facades for local conditions in Montevideo. This article aims to present experimental results for two sunscreens (screen fabric and trapezoidal perforated sheet metal) tested in real sky conditions, in a vertical

position for three orientations (east, north and northwest) and in a position perpendicular to the incident direct solar radiation .

The results of solar transmission obtained experimentally, allow us to identify that the behavior of the solar protections is closely linked to their position relative to the sun - angle of incident radiation - and to the geometry of the solar protection; putting into question the solar factor as a representative parameter of the behavior of solar protections under conditions of use and its usefulness as a design tool.

Keywords: *Solar Transmission, Solar Factor, Solar Protection, Solar Radiation, Energy Efficiency, Fenestration System, Uruguay.*

INTRODUCCIÓN

La tendencia de la arquitectura en las últimas décadas promueve la utilización del vidrio y la transparencia como lenguaje expresivo frente a una fascinación por la luz y la ligereza en el diseño. En muchos casos, estas expresiones estéticas se anteponen a la posibilidad de brindar condiciones de confort térmico y visual a los ocupantes de forma natural, condicionando al uso de ventilación mecánica y luz artificial.

Para que un edificio pueda ser eficiente y proporcionar confort a sus usuarios debe existir una correcta relación entre su forma, orientación, materialidad y los factores ambientales externos, logrando que las estrategias de diseño sean apropiadas al clima donde se apliquen.

En este sentido, la envolvente debe estar cuidadosamente diseñada de modo de controlar los intercambios de energía, mereciendo especial atención los cerramientos transparentes (conjunto conformado por: marco, vidrio y protección solar), los cuales pueden representar la principal fuente de pérdida de calor en invierno, por su alta transmitancia térmica, y la principal fuente de ganancia de calor en verano por su comportamiento frente a la radiación solar (transparente a la radiación solar de onda corta y opaca a la radiación solar de onda larga (Serra y Coch, 1995; Maraveas, 2019).

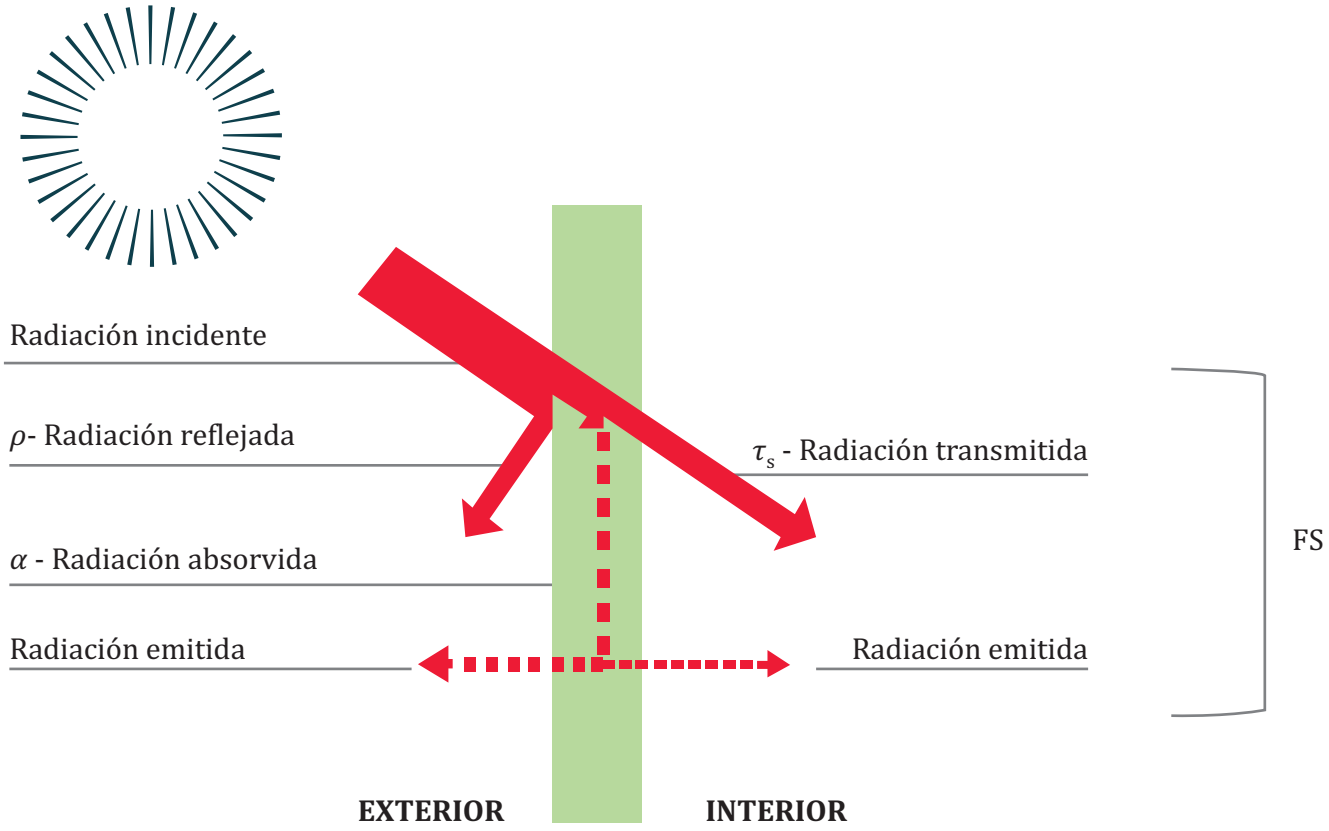
En particular, para optimizar el desempeño térmico y prevenir el sobrecalentamiento en el interior de los locales durante el periodo caluroso es fundamental la correcta utilización de estrategias de diseño que incorporen el control de ganancias de energía por radiación solar, así como considerar desde el proyecto las propiedades térmicas y lumínicas de los componentes de estos cerramientos.

Existen dos indicadores que se relacionan con el manejo de la energía térmica y se utilizan para evaluar el desempeño de los cerramientos transparentes: transmitancia térmica U ($W/m^2.K$) y factor solar (FS). El FS, o coeficiente de ganancia solar (por sus siglas en inglés SHGC), es la fracción de irradiancia incidente que ingresa por una ventana, e incluye la energía transmitida directamente y la reemitida, ver Figura 1. Es un valor entre 0 y 1, donde 0 indica que no se transmite radiación y 1 significa que se transmite la totalidad de la radiación incidente; puede especificarse para cada componente del cerramiento por separado (vidrio y dispositivo de protección solar) o para todo el conjunto del cerramiento transparente.

Investigaciones recientes demuestran que estos indicadores, tradicionalmente utilizados, no son suficientes para evaluar el desempeño energético de los cerramientos transparentes. Stazi et al. (2014) identifican la incidencia de algunos factores claves en el comportamiento físico-térmico de las protecciones solares como la geometría (inclinación, ancho y separación entre lamas), materialidad (calor específico y conductividad), y su colocación (interior y exterior). Dentro de esta misma línea, Mainini et al. (2014) estudian la efectividad de estos dispositivos en función

de sus condiciones geométricas y textura (grado de apertura), identificando al ángulo de incidencia de la radiación solar como factor clave del desempeño energético. Por su parte, Bustamante et al. (2014) y Appelfeld et al. (2012) estudian el comportamiento de los sistemas complejos de ventanas (CFS, por sus siglas en inglés), en los cuales consideran el desempeño conjunto de ventana y sistema de protección solar frente a diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar; estos autores identifican que los niveles de transmisión solar a incidencia normal no son un indicador preciso para sistemas con dependencia angular como los CFS, dentro de los que se incluyen por ejemplo las venecianas o chapa perforada.

Figura 1. Esquema radiación incidente y transmitida a través de un cerramiento transparente



Fuente: Elaboración propia

Este artículo evalúa en primer instancia el comportamiento de dos protecciones solares frente a la radiación solar de onda corta a través de mediciones experimentales, para diferentes posiciones y orientaciones en Montevideo, presentando un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en las diferentes situaciones evaluadas, y la relación de los mismos con los valores de transmisión solar normalmente utilizados para el cálculo del factor solar. En una segunda etapa se plantean estudios preliminares tendientes a la caracterización geométrica de la trasmisión solar, realizadas a partir del estudio de la variación de la transmisión solar en función de ángulo de incidencia de la radiación directa, referido al plano de la protección.

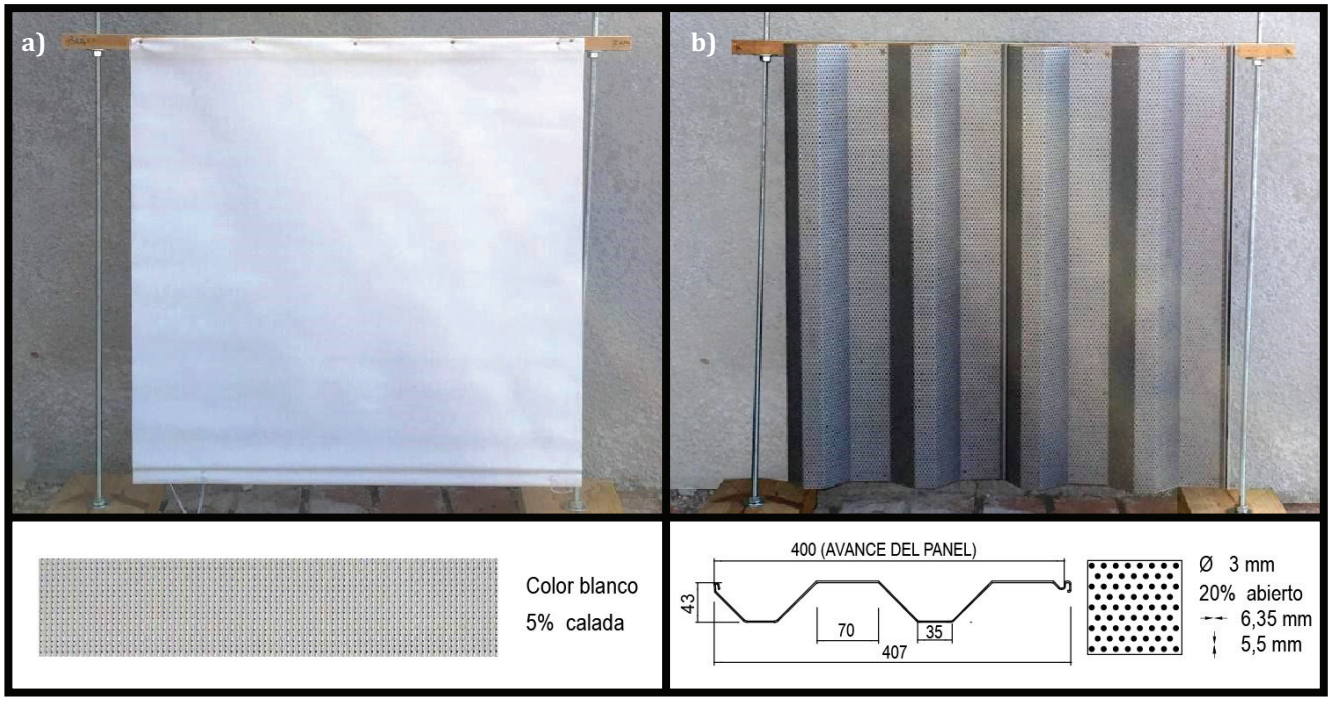
METODOLOGÍA

La evaluación del comportamiento de las protecciones solares frente a la radiación solar se realizó de forma experimental y analítica. Se midieron muestras de protecciones solares en condiciones de cielo real en el período caluroso, en la ciudad de Montevideo - Uruguay (34°54'35''S, 56°9'49''O), cuya clasificación climática de Köppen es Cfa y tiene un promedio anual de irradiación global en plano horizontal de 4.58 kWh/m^{2}día (Alonso-Suárez et al., 2014).

Las protecciones solares ensayadas se definieron en base a un relevamiento de ventas del mercado nacional, compras estatales y un estudio de antecedentes de investigaciones similares, obteniendo las siguientes tipologías de protecciones como casos de estudio: venecianas (exteriores e interiores), paneles (chapa perforada curva y chapa perforada trapezoidal) y *rollers* (tela *screen*).

En este artículo se presentan los resultados para la tela screen -visillo fijo, color blanca, calada al 5% (identificada como PS1)- y la chapa perforada trapezoidal -material aluzinc, color aluminio, terminación de pintura polyester al horno, perforación 20% (identificada como PS2)- ver Figuras 2a y 2b.

Figura 2. Características geométricas y textura de protecciones solares ensayadas: (a) PS1; (b) PS2



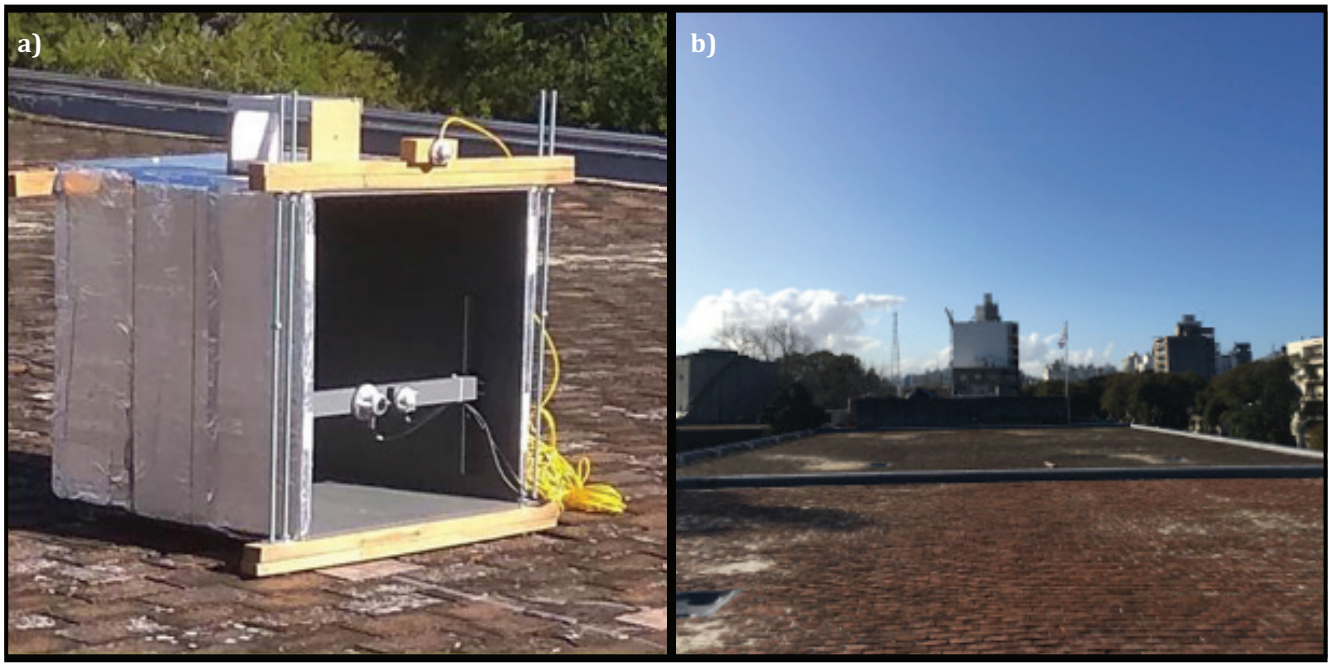
Fuente: Elaboración propia con datos de proveedores

Se confeccionó como dispositivo de ensayo una caja cúbica de 0.70 m de lado para ubicar los instrumentos de medición, con una cara libre para posicionar las protecciones solares. Su envolvente se diseñó para evitar el sobrecalentamiento y su consecuente emisión de radiación de onda larga que pudiese interferir en los registros, para ello se aisló con poliestireno expandido de 2cm de espesor con terminación exterior con membrana asfáltica con revestimiento de aluminio. Las mediciones se efectuaron entre enero y mayo de 2019, en días con condición de cielo despejado, descartando en el procesamiento de datos periodos puntuales en que se constató nubosidad.

La adquisición de datos de radiación de onda corta al interior del prototipo y de radiación incidente se realizó con piranómetros SPLite 2 Kipp&Zonen, los cuales presentan un desempeño adecuado para este tipo de mediciones (Bustamante et al., 2014). El piranómetro interior se ubicó paralelo al plano de la protección solar al interior de la caja, abarcando dentro de su ángulo visual únicamente la superficie de la protección solar, el piranómetro exterior -para medir la radiación incidente- se ubicó en la misma posición relativa que el piranómetro interior, ver Figura 3(a). Los instrumentos se sincronizaron para registrar datos cada 30 segundos.

Las mediciones se realizaron en la azotea de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República en Montevideo, Uruguay, ver Figura 3(b). La ubicación del dispositivo se determinó considerando las distancias para minimizar la incidencia de obstrucciones cercanas que pudieran interferir en la correcta toma de datos.

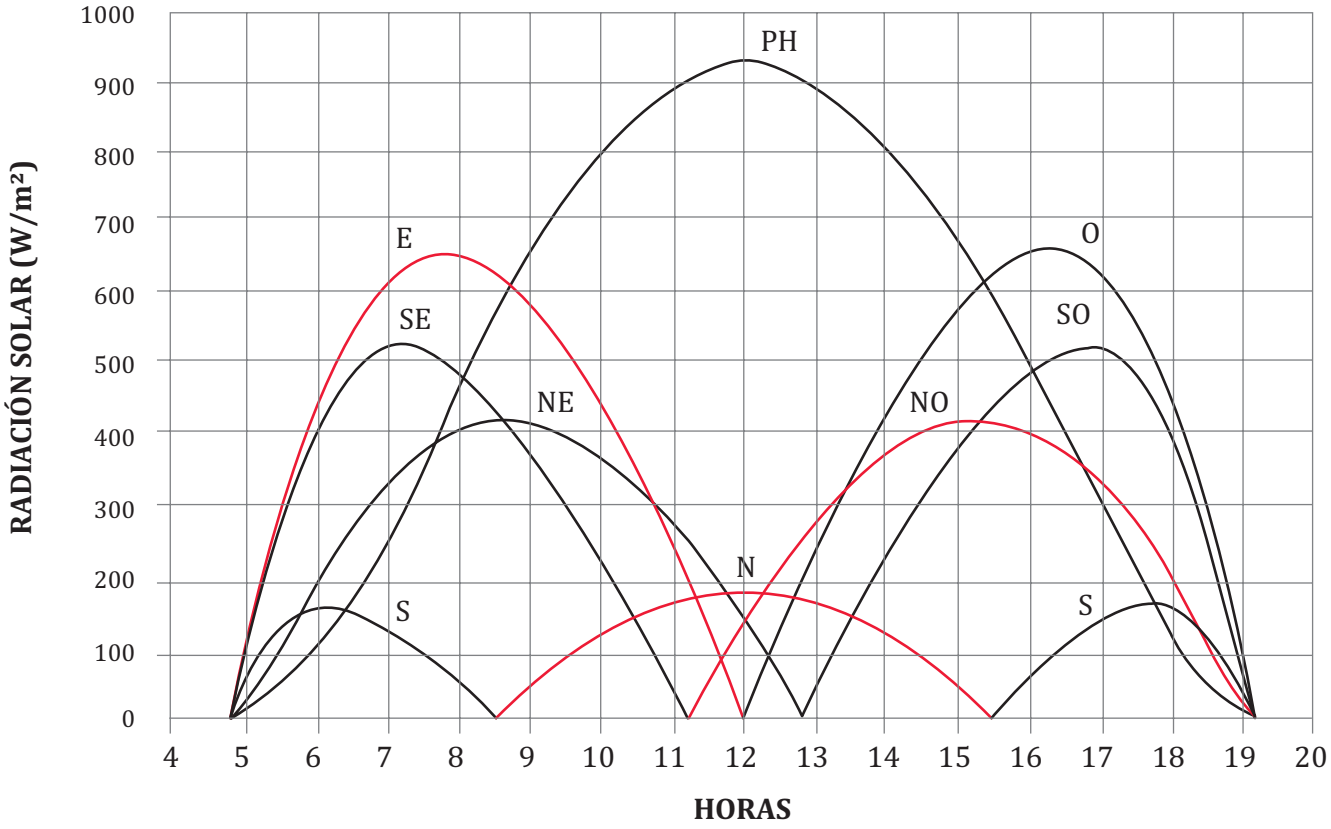
Figura 3. Dispositivo de ensayo de protecciones solares: (a) instrumentos colocados al interior; (b) emplazamiento



Fuente: Elaboración propia

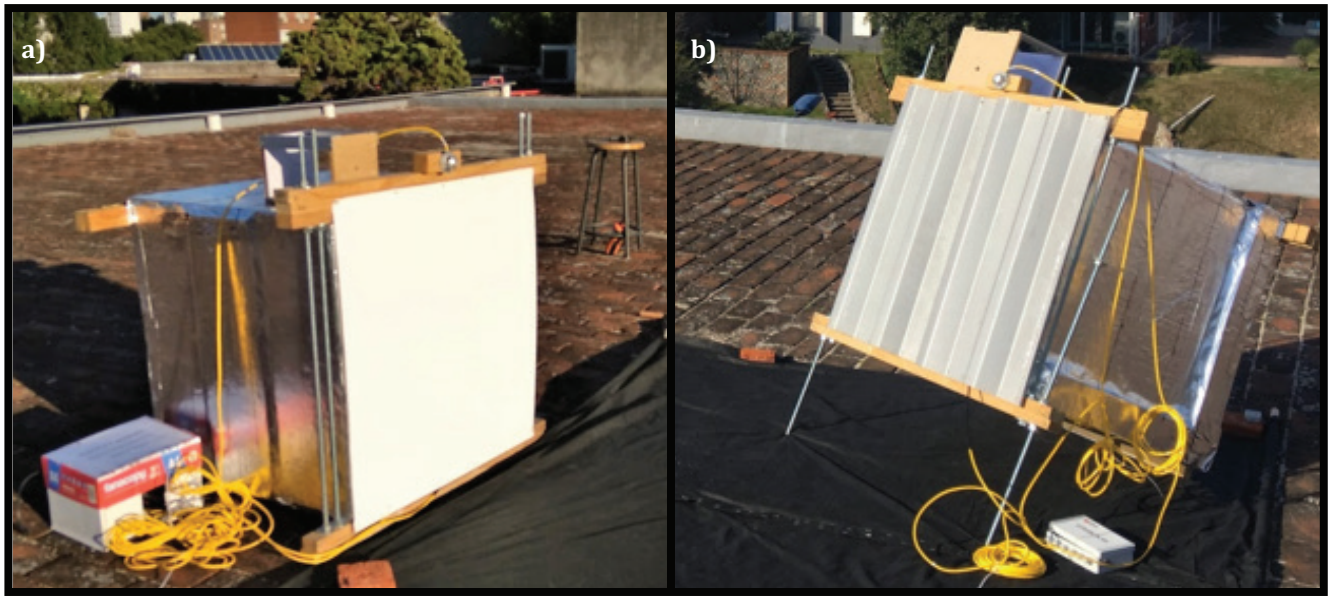
Las protecciones se ensayaron para los planos verticales de orientación este, norte y noroeste abarcando las horas en que el plano de estudio recibe los mayores niveles de radiación solar directa, de acuerdo a la distribución teórica de la radiación por plano para el solsticio de verano en Montevideo, ver Figura 4. Considerando que las fachadas este y oeste son simétricas a la radiación, las mediciones realizadas abarcan un amplio rango de posiciones características de las fachadas de los edificios. Adicionalmente, se realizaron mediciones durante el mediodía solar con el dispositivo de ensayo inclinado, orientando la protección solar normal a la radiación solar directa incidente y considerando una desviación de hasta 5 grados, según ANSI/NFRC 200-2014 [5]. En la Figura 5 se pueden observar las posiciones del dispositivo de ensayo durante las mediciones.

Figura 4. Niveles de radiación solar incidente por plano (W/m²) para solsticio de verano en Montevideo



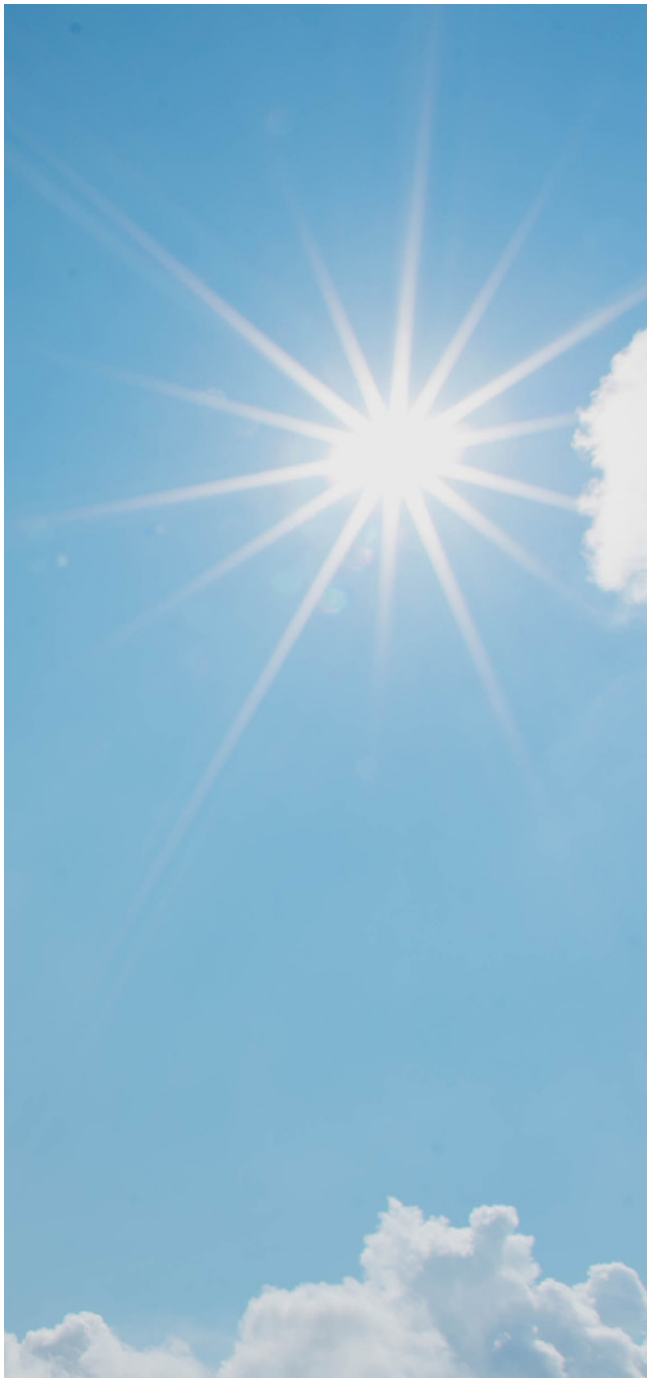
Fuente: Cátedra Acondicionamiento térmico FADU-UdelaR, 2000

Figura 5. Dispositivo de ensayo de protecciones solares: (a) medición con PS1 en posición vertical; (b) medición con PS2 en posición inclinada, normal a la radiación incidente



Fuente: Elaboración propia

Las protecciones solares se ensayaron sin la utilización de vidrio, considerando que los valores de factor solar, reflexión lumínica y transmitancia térmica son conocidos y ensayados en laboratorio según norma ISO 15099:2003 para los distintos tipos de vidrios. La supresión del vidrio simplificó las mediciones. De modo que se evitaron por un lado, las interacciones existentes entre el vidrio y la protección solar que no permitirían identificar el comportamiento aislado de la misma, además del efecto invernadero al interior de la caja que generaría la presencia de vidrio, afectando las mediciones y los resultados.



RESULTADOS Y ANÁLISIS

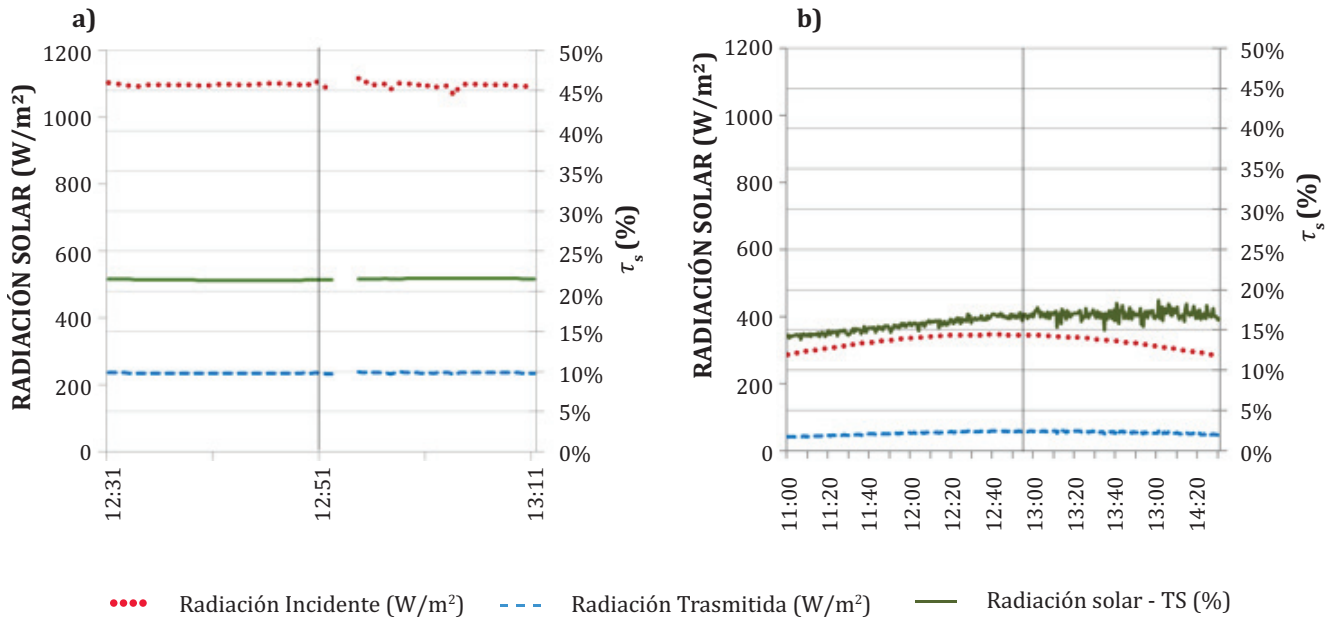
A continuación se presentan los resultados obtenidos, mediante mediciones, de los niveles de radiación exterior -incidente-, los niveles de radiación registrados al atravesar la protección solar -transmitida- y la relación entre ellos -transmisión solar- expresada en porcentaje, para cada tipo de protección y orientación ensayada.

Protección solar "tela *Screen*", PS1

En la Figura 6(a), se muestran las mediciones de radiación solar global, orientando la protección solar normal a la radiación solar directa incidente, identificando en la figura con una línea vertical la hora legal correspondiente al mediodía solar. Se observa un comportamiento uniforme con un promedio de transmisión solar de 21.5%. Para la orientación norte -plano vertical-, Figura 6(b), los porcentajes de transmisión solar van aumentando desde un 14.3% al inicio (11:00h) con una altura solar (H) de 59.8° y azimut (Z) 66.3°, hasta alcanzar al mediodía solar el 16.8% (12:56h, H=74.3°, Z=0.2°). Luego se mantiene con oscilaciones mínimas sobre ese valor hasta finalizar la medición (14:30h, H=64.1°, Z=301.3°).

La medición presentada en la Figura 6(a) respecto a la 6(b) se realizó para un mismo azimut y diferente altura, obteniendo una diferencia porcentual en la transmisión solar registrada entre ambas mediciones. Dicha diferencia es variable, con un nivel cercano al 4.7% considerando el inicio de las mediciones (diferencia entre 21.5% y 16.8%), y próxima al 7.2% considerando el valor promedio máximo alcanzado en ambas mediciones del mediodía solar en adelante (diferencia entre 21.5% y 14.3%).

Figura 6. Radiación solar incidente (W/m²), transmitida (W/m²) y transmisión solar (%) en PS1 para diferentes posiciones: (a) normal a la radiación solar directa incidente; (b) plano vertical -orientación norte-



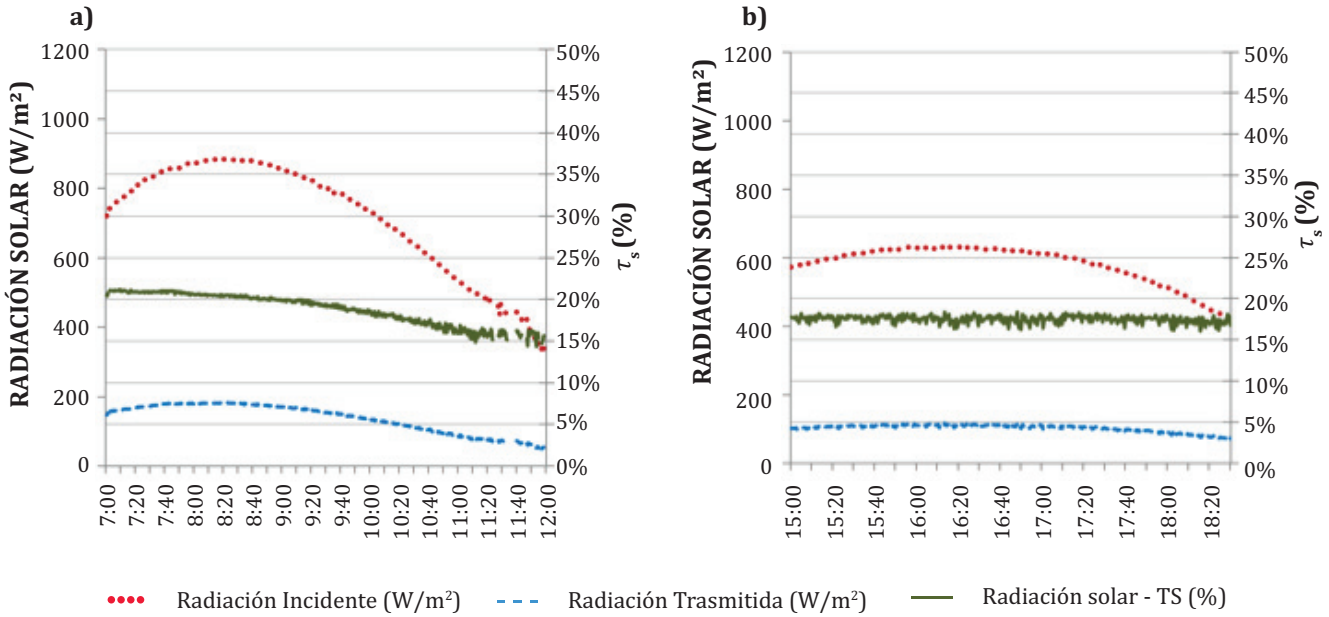
Fuente: Elaboración propia

Debido a la trayectoria del sol, que presenta un comportamiento simétrico con eje en la hora del mediodía solar, se esperaba registrar un comportamiento simétrico en la radiación incidente y en la radiación medida al interior, en la posición vertical orientada al norte. Los datos obtenidos del piranómetro exterior muestran esta simetría en su curva, sin embargo, se encuentra desplazada del eje correspondiente al mediodía solar, lo que podría estar indicando que la ubicación del dispositivo de medición tiene una desviación con respecto al norte solar o que la posición de los instrumentos presenta una pequeña inclinación respecto a la protección solar; provocando que los datos obtenidos no reflejen esa simetría.

Para la PS1 en la orientación este, Figura 7(a), la transmisión solar es variable. Esta relación tiende a disminuir a medida que avanza la medición, variando entre 20.5% al inicio (7:00h, H=12.0°, Z=105.9°), y un 14.3% al finalizar (12:00h, H=70.3°, Z=42.8°). En la orientación noroeste, Figura 7(b), con mediciones realizadas entre las 15:00h (H=58.6°, Z=296.3°) y las 18:30h (H=16.2°, Z=257.6°), se puede observar un comportamiento más estable, con variaciones durante toda la medición entre el 16.0% y el 18.3%.

Si bien la tela *screen* no presenta a priori una fuerte condicionante geométrica, se constató que a medida que varía su posición relativa con respecto al sol, varía el porcentaje de radiación transmitida. El valor medido en condición normal a la radiación directa incidente (21.5%) se aproxima únicamente al registrado a las 7:00h en la orientación este, cuando el azimut relativo es menor a 20°, y representa el mayor valor de transmisión solar registrado para esta protección. Para el resto de las mediciones se registraron valores que presentan una diferencia respecto a la medición en posición normal de hasta un 7.2% menos (diferencia entre el valor representativo en posición normal de 21.5% y el valor mínimo en orientación este de 14.3%).

Figura 7. Radiación solar incidente (W/m²), transmitida (W/m²) y transmisión solar (%) en PS1 para plano vertical en diferentes orientaciones: (a) este; (b) noroeste

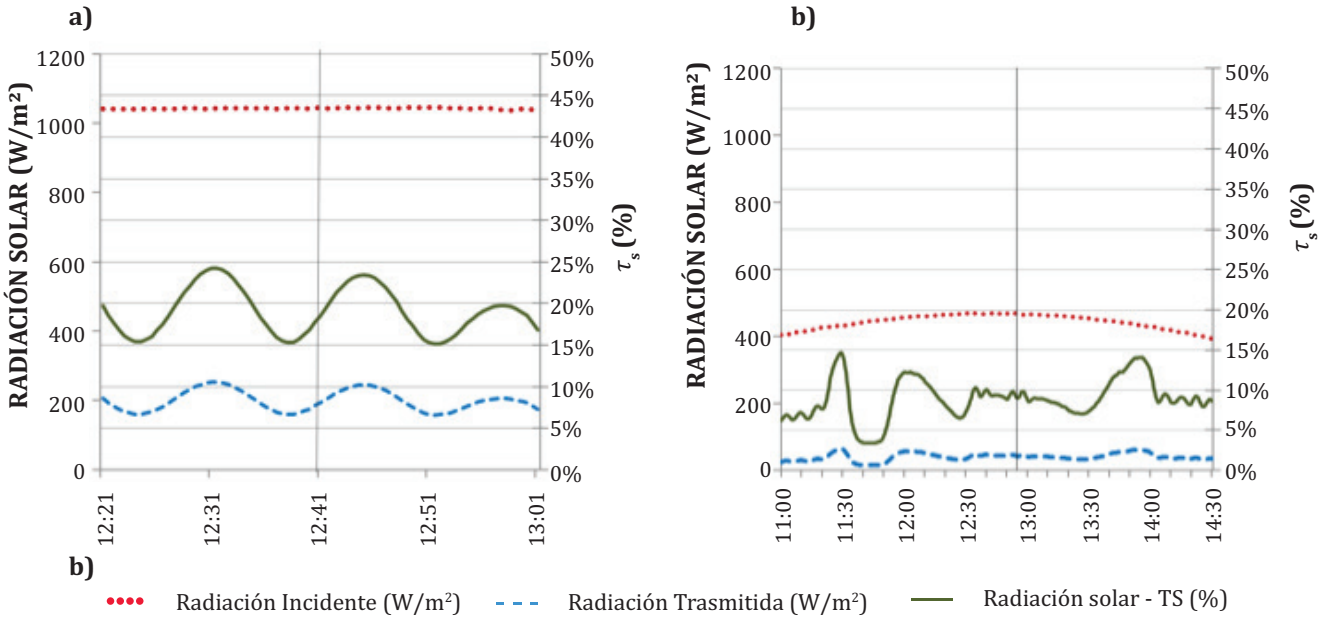


Fuente: Elaboración propia

Protección solar "chapa perforada trapezoidal" PS2

En la Figura 8(a), correspondiente a la PS2 en condición normal a la radiación incidente se identifica un comportamiento fluctuante de la radiación transmitida, con picos y valles, que se refleja en valores de transmisión solar que oscilan entre el 15.1% y el 24.2%. La transmisión solar puede variar en un 8.9% al considerar un pico (24.2%, 12:31 h) y un valle (15.3%, 12:38 h), aún con un movimiento relativo del sol muy acotado. Para la orientación norte, Figura 8(b), el porcentaje de radiación que pasa a través de la protección mantiene un comportamiento fluctuante, con valores máximos del 14.7% (11:29h, H=60.4°, Z=48.8°) y mínimos del 3.4%, 16 minutos después (11:45h, H=62.7°, Z=42.3°). La mediciones de las Figura 8(a) y 8(b) presentan el mismo azimut, variando la altura y la extensión del periodo de medición, sin embargo, se puede observar que los valores obtenidos para la posición vertical son inferiores a los obtenidos en posición normal. Al igual que en las figuras anteriores, la línea vertical corresponde al mediodía solar. La ausencia de un comportamiento simétrico en los resultados, respecto a esta hora, es posible atribuirla a la ubicación relativa del piranómetro interior en relación a la geometría de la protección; el cual quedó desplazado del eje de simetría del trapecio que conforma la chapa plegada. No obstante, se considera que los resultados obtenidos presentan una coherencia global en relación a lo esperado desde el punto de vista teórico.

Figura 8. Radiación solar incidente (W/m²), transmitida (W/m²) y transmisión solar (%) de PS2 para diferentes posiciones: (a) normal a la radiación solar directa incidente; (b) plano vertical -orientación norte-

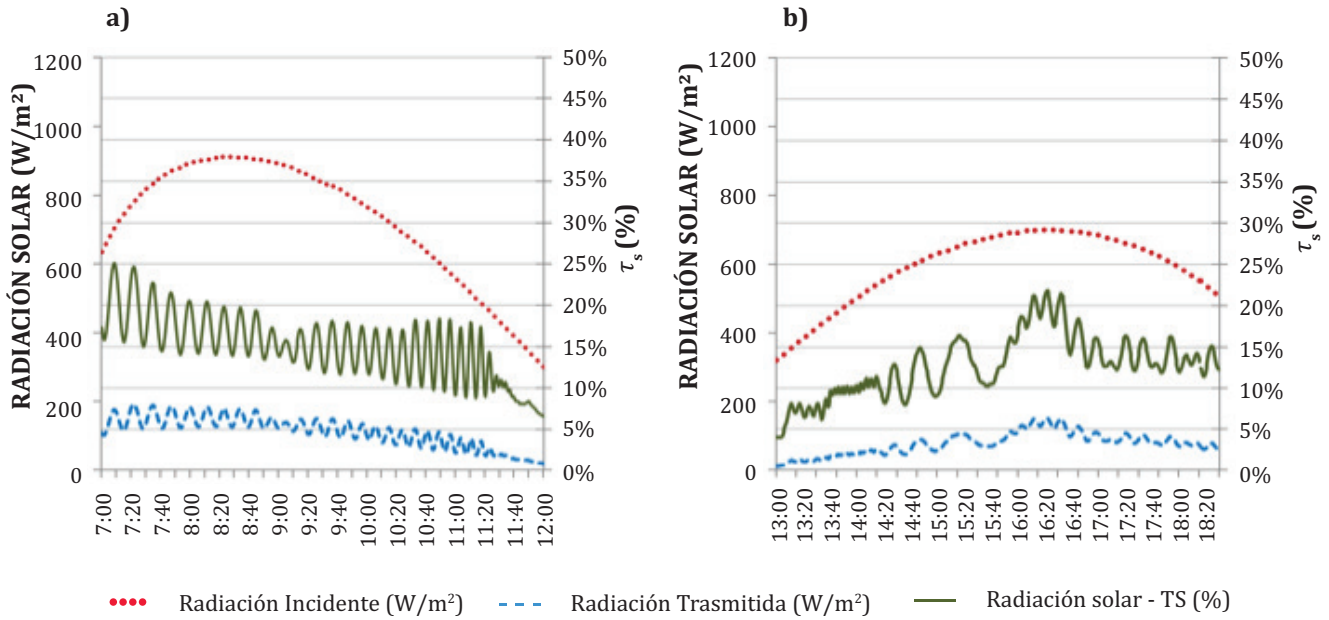


Fuente: Elaboración propia

La transmisión solar de la PS2 en orientación este se muestra en la Figura 9(a), más adelante. El mayor nivel, 25.0%, se registra al comienzo de la medición (7:05 h, H=8.1°, Z=98.7°), y el menor, 6,6%, a las 12:00 h, H=63.2°, Z=33.3°. A partir de las 11:20 h las fluctuaciones disminuyen, tendiendo a un comportamiento regular sin variaciones abruptas. La tendencia general de la curva de transmisión solar muestra una disminución en los porcentajes a medida que avanza la medición. Para la orientación noroeste, Figura 9(b), al igual en las anteriores mediciones se observa la característica de fluctuación en la radiación que ingresa a través de la protección. En esta orientación se identifica que a pesar de la fluctuación hay una coincidencia entre los niveles máximos y mínimos de radiación incidente y transmitida; registrándose la mayor transmisión solar de 21.8% (16:20 h, H=41.4°, Z=279.4°), y la menor de 4.0% (13:07 h, H=71.2°, Z=353.7°).

Las protecciones ensayadas presentan una diferencia en su desempeño según la posición en que se orienten, lo cual revela la dificultad de utilizar un indicador único por dispositivo de protección solar.

Figura 9. Radiación solar incidente (W/m²), transmitida (W/m²) y transmisión solar (%) de PS2 para plano vertical en diferentes orientaciones: (a) este; (b) noroeste

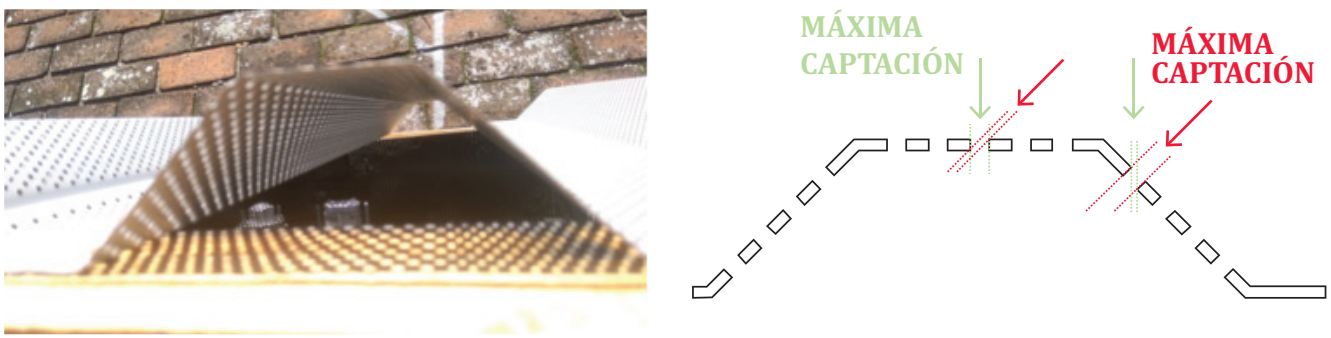


Fuente: Elaboración propia

Los resultados para la PS2, en todos los casos presentan un comportamiento fluctuante en magnitud y amplitud, lo cual permite constatar que las variaciones en la transmisión solar están condicionadas por su geometría.

El plegado trapezoidal de la chapa por su parte, genera un auto-sombreado, mientras que las perforaciones presentes en la misma permiten mayor o menor captación de radiación directa dependiendo del ángulo de incidencia, ver Figura 10(a) y (b).

Figura 10. Detalle de incidencia de radiación solar directa sobre protección "Chapa perforada trapezoidal" y presentación esquemática



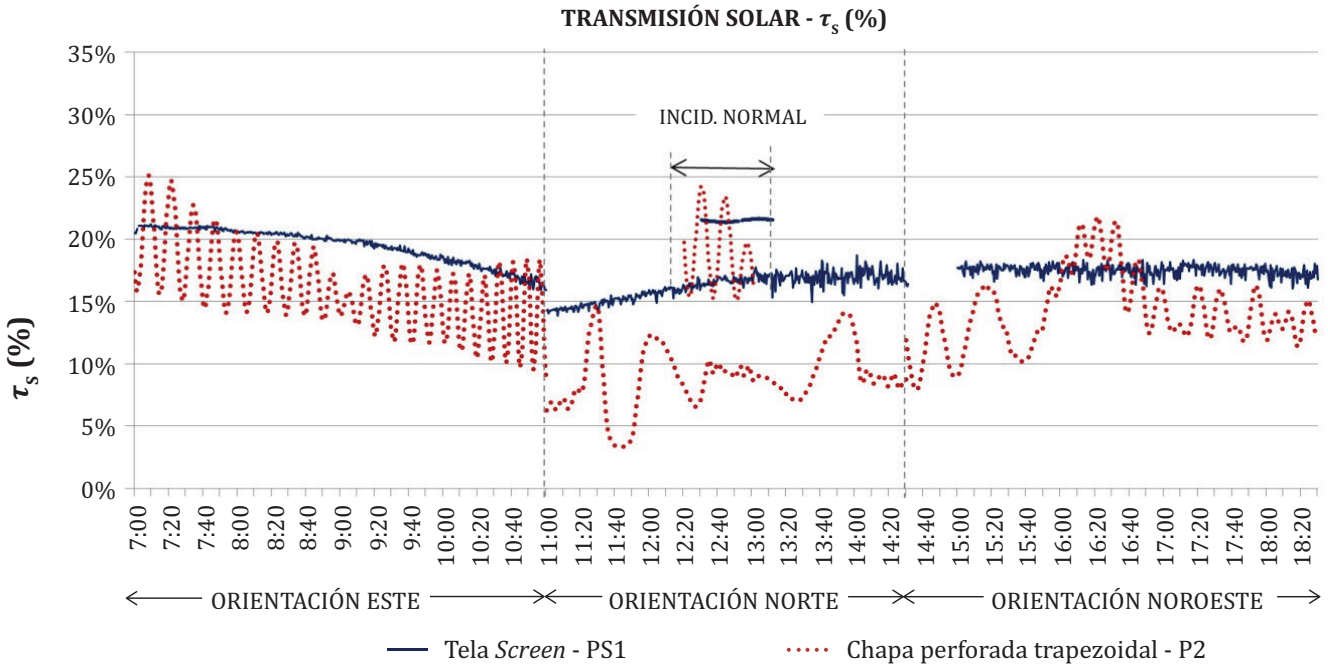
Fuente: Elaboración propia

Análisis comparativo

En el resumen de resultados de transmisión solar presentado en la figura 11, es posible observar el comportamiento de ambas protecciones solares para las tres orientaciones analizadas y la condición normal a la radiación incidente. Al analizar el comportamiento de ambas protecciones solares se observa que para la PS1, el porcentaje de radiación solar que atraviesa la protección describe un comportamiento aproximadamente lineal en todas las posiciones; en cambio la protección PS2, describe un comportamiento fluctuante en todos los casos, identificándose un patrón de picos y valles con una amplitud variable.

Para ambas protecciones en posición vertical y según los períodos de medición considerados, los valores más altos de transmisión se constatan para una incidencia cuasi normal, en este caso se corresponde con la orientación este en las primeras horas de la mañana.

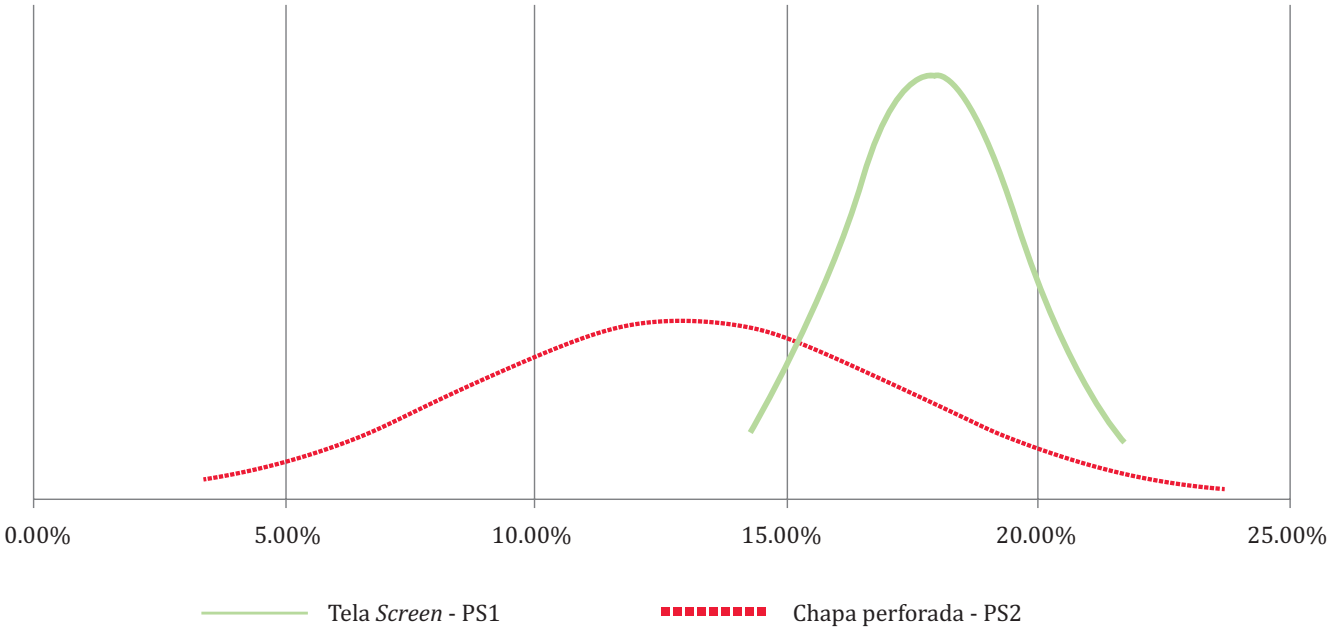
Figura 11. Transmisión solar (%) de PS1 y PS2 para todas las posiciones y orientaciones



Fuente: Elaboración propia

Estos datos permiten afirmar que, aun protecciones de geometría homogénea -PS1- presentan desempeños variables según el ángulo de incidencia de la radiación solar. Mientras que, para el caso de la PS2, se constata la incidencia de la geometría compleja en su desempeño como protección solar, registrándose resultados aún más variables. En la Figura 12, se puede observar la caracterización de los valores de transmisión solar para cada protección solar si consideramos los resultados de las mediciones para todas las orientaciones. La PS1 presenta un rango de transmisión solar más acotado (14.0% a 21.0%), mientras que la PS2 presenta un rango más extenso (3.4% a 25.0%), ver Figura 12. De esto se desprende que, para todas las orientaciones y posiciones, el valor medio de transmitancia solar es más representativo para la PS1 que para la PS2, debido a que en la primera los resultados presentan una menor desviación respecto a la media.

Figura 12. Distribución normal de coeficientes de transmisión solar para las protecciones PS1 y PS2

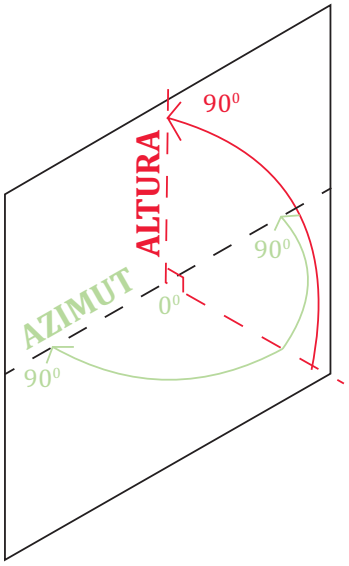


Fuente: Elaboración propia

Caracterización del desempeño de las protecciones

En una siguiente etapa, se independizaron los resultados obtenidos de la orientación en que se midieron. Cada ángulo de incidencia de radiación se expresó en relación a un mismo plano genérico, considerando la variación en altura entre 0° -perpendicular al plano- y 90° -rasante al plano- y la variación en azimut como la desviación respecto a la normal entre 0° y 90° hacia ambos lados, ver Figura 13. Como resultado se obtuvo para cada protección, la variación de la transmisión solar en función de ángulo de incidencia de la radiación. Los análisis realizados a continuación se plantean cómo estudios preliminares tendientes a la caracterización geométrica de la trasmisión solar.

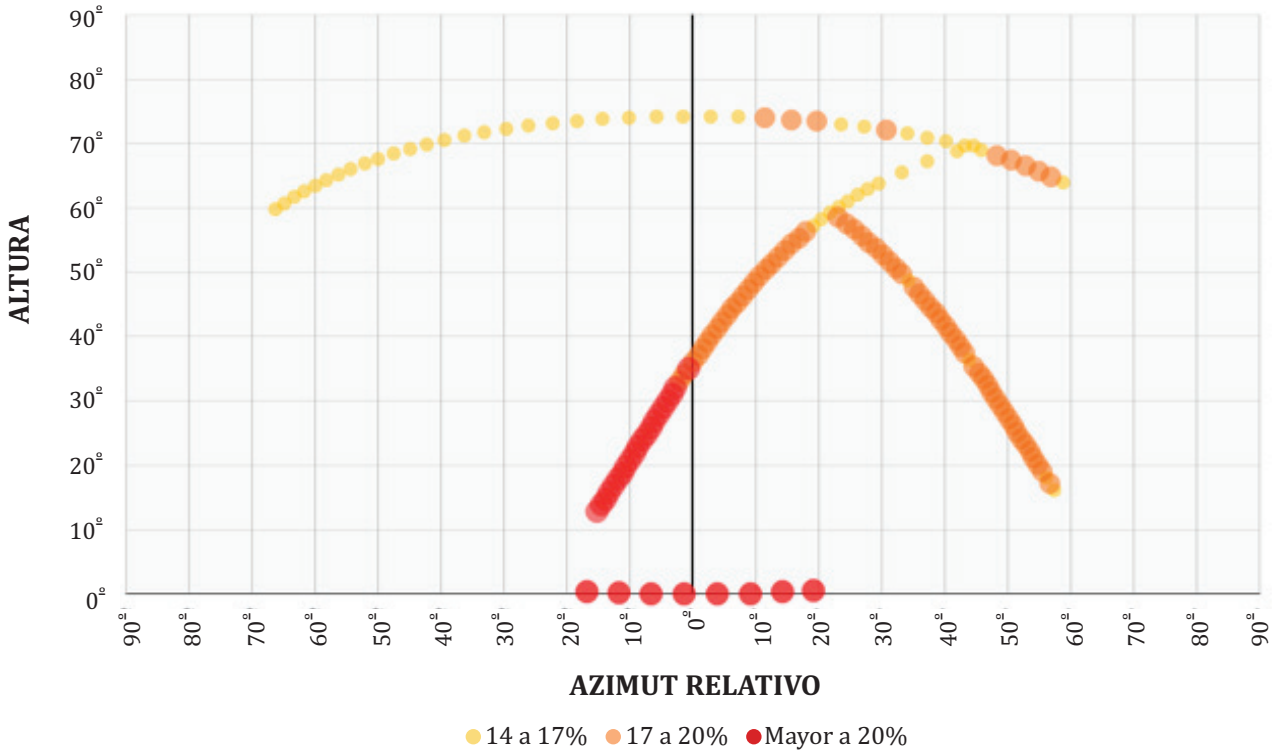
Figura 13. Lectura de ángulos de incidencia para el plano de medición



Fuente: Elaboración propia

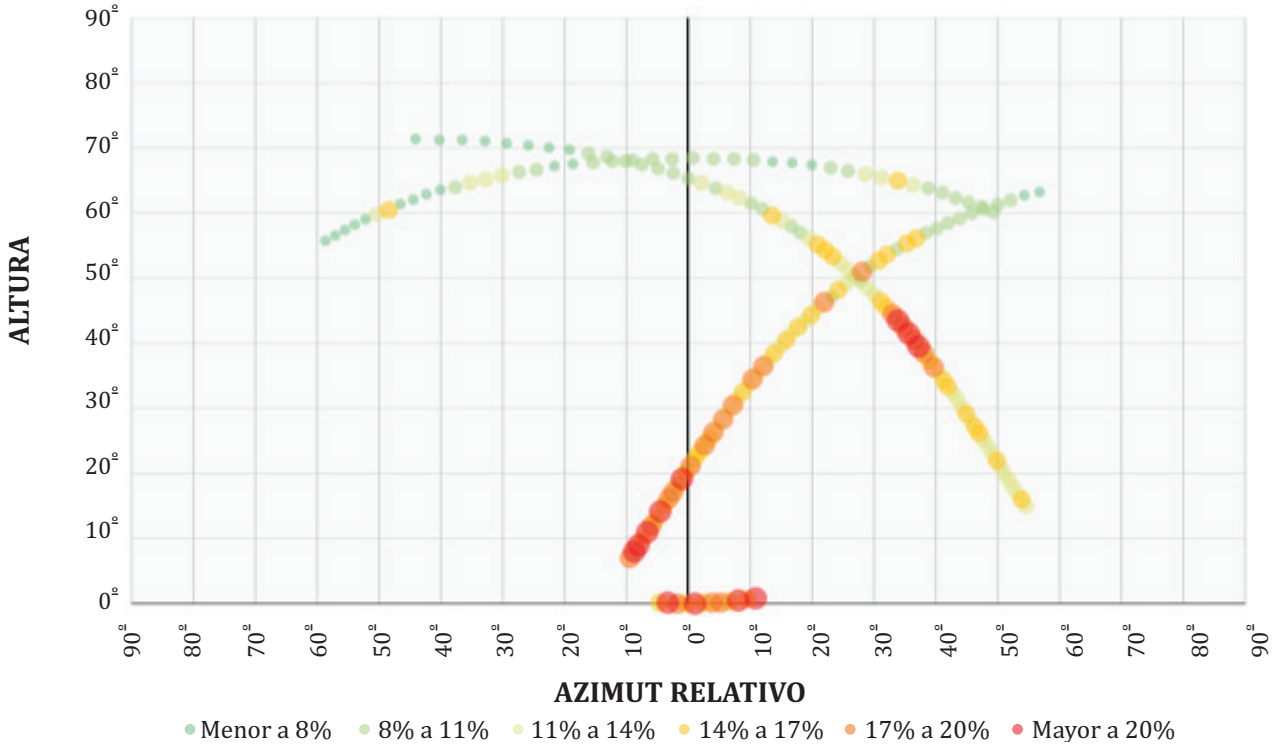
La Figura 14 presenta los resultados obtenidos para la PS1 donde se observa que en ángulos cercanos a la perpendicular, tanto en azimut como en altura, se presentan los mayores niveles de transmitancia (20% o más); así mismo los menores valores (entre 14% y 17%) se presentan únicamente a partir de los 55° de altura.

Figura 14. Transmisión solar (%) de PS1 en función de posición relativa del sol



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Transmisión solar (%) de PS2 en función de posición relativa del sol



Fuente: Elaboración propia

Para la PS2, Figura 15, es posible identificar sobre los 50.0° de altura un cambio en los rangos de transmitancia independiente del azimut. Mientras que, para alturas menores a 50.0° el rango oscila entre 14.0% y 20.0%, para alturas mayores la transmisión varía entre 3.4% y 17.0%.

A su vez, dentro de cada zona se identifica que los niveles más altos se presentan en diferentes ángulos de incidencia – altura y azimut relativo al plano de la protección -, lo cual tiene relación con el comportamiento presentado en la Figura 10.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los estudios realizados sobre dos tipos de protecciones solares, cortina de tela screen y chapa perforada trapezoidal, para evaluar la transmisión de radiación solar de onda corta a través de ellas, en diferentes posiciones y orientaciones. En las mediciones realizadas se pudo constatar que el desempeño de las protecciones solares es variable según el ángulo de la radiación incidente, o sea, a su posición relativa al sol, y la geometría propia de la protección.

Los resultados obtenidos de forma experimental para la ciudad de Montevideo, demuestran que las protecciones ensayadas presentan una diferencia en su desempeño según la posición en que se orienten, lo cual revela la dificultad de utilizar un indicador único por dispositivo de protección solar. Considerando siempre su evaluación para el período de verano, ambas protecciones presentan un mejor desempeño, es decir menores niveles de transmisión solar, cuando se orientan hacia el norte.

Por otro lado, la evaluación comparativa de los resultados para ambas protecciones permitió identificar que el valor de transmisión solar en condición normal a la radiación incidente -que corresponde al porcentaje de radiación de onda corta en el cálculo del factor solar- se encuentra por encima de los niveles registrados en condiciones reales de uso en fachada. Esta diferencia podría, por ejemplo, llevar a un sobre dimensionamiento de los cálculos de demanda de refrigeración o condicionar los niveles de iluminación interior, poniendo en discusión la utilidad del factor solar como herramienta de diseño.

El estudio realizado permitió caracterizar el desempeño de las protecciones estudiadas para posibles orientaciones de fachadas de edificios en Montevideo, Uruguay. Adicionalmente, se presentó un análisis preliminar que permite caracterizar el desempeño de las protecciones solares para cualquier ubicación y orientación, a través del análisis realizado que expresa la transmisión solar en función del ángulo de radiación incidente. Para profundizar el estudio de las protecciones solares, es necesario un mayor número de mediciones frente a otros ángulos de incidencia de radiación para obtener una caracterización global por protección solar, así como para independizar esta variable de la incidencia de la geometría que la caracteriza. El desarrollo de esta metodología podría aportar un indicador más adecuado para la toma de decisiones en el diseño y evaluación de cerramientos transparentes.

Los datos de este artículo forman parte del proyecto Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), I+D “Efectos de las características de las ventanas, los vidrios y los dispositivos de protección solar sobre los requerimientos energéticos del edificio y las condiciones de confort térmico y visual”.

•••

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a CSIC y a FADU - UdelaR por el apoyo brindado y a todos los compañeros que participaron en el proyecto.

REFERENCIAS

Alonso-Suárez, R., Abal, G., Siri, R., Muse, P. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. *Energy Procedia 57*:1237-1246, 10.1016/j.egypro.2014.10.072.

Appelfeld, D., McNeil, A. y Svendsen, S. (2012). An hourly-based performance comparison of an integrated micro-structural perforated shading screen with standard shading systems. *Energy and Buildings, 50*, 166-176. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.038.

Bustamante, W., Vera, S., Prieto, A. y Vásquez, C. (2014). Solar and lighting transmission through complex fenestration systems of office buildings in a warm and dry climate of Chile. *Sustainability, 6*, 2786-2801. doi:10.3390/su6052786.

Cátedra de acondicionamiento térmico (2000) AT 01 (Material de curso). Universidad de la República, Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay.

Mainini, A., Poli, T., Zinzi, M., Speroni, A. (2013). *Spectral light transmission measure of metal screens for glass façades and assessment of their shading potential*. International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Friburgo, Alemania.

Maraveas, C. (2019). Environmental Sustainability of Greenhouse Covering Materials. *Sustainability, 11*(21), 6129. doi.org/10.3390/su11216129.

National Fenestration Rating Council (2013). NFRC 200A-2014 *Procedure for Determining Fenestration Attachment Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence*.

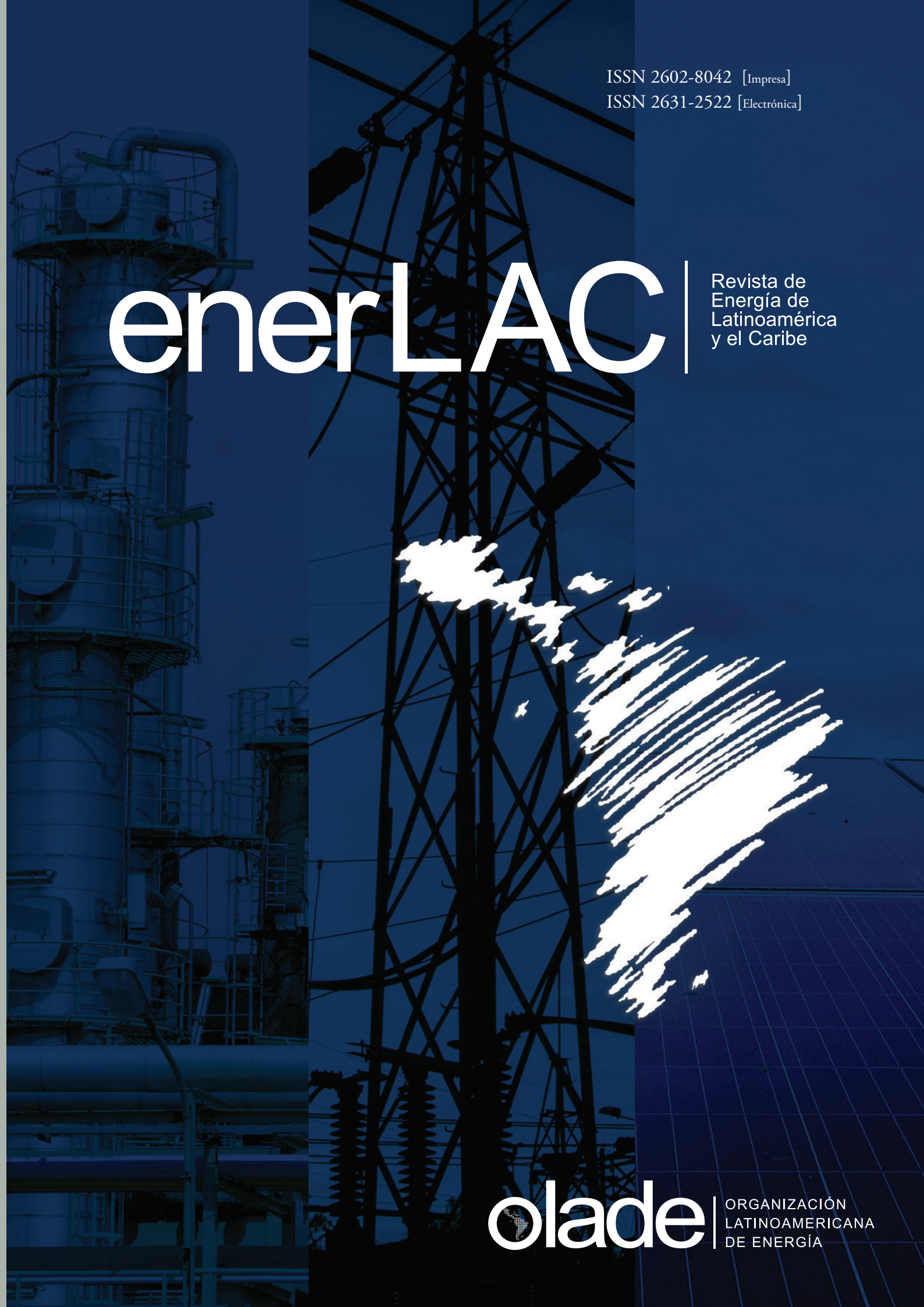
Serra, R. y Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural.* Barcelona. ISBN 84-7653-505-8.

Stazi, F., Marinelli, S., Di Perna, C., Munafaro, P. (2014). Comparison on solar shadings: Monitoring of thermo-physical behaviour, assessment of the energy saving, thermal comfort, natural lighting and environmental impact. *Solar Energy, 105*, 512–528. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.005

ISSN 2602-8042 [Impresa]
ISSN 2631-2522 [Electrónica]

enerLAC

Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe



olade
ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA

EVALUACIÓN TÉRMICA Y EFECTOS DE LA DEMANDA EN UNA INSTALACIÓN SOLAR DE UN PROCESO PRODUCTIVO

THERMAL ASSESSMENT AND EFFECTS OF DEMAND ON A SOLAR INSTALLATION OF A PRODUCTIVE PROCESS

† Enrique Donato Albizzati [1]

Recibido: 23/04/2020 y Aceptado: 29/10/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (58 - 75)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Science in HD de Unsplash.

1 Universidad Nacional del Litoral. Facultad de Ingeniería Química. Argentina
albizati@fiq.unl.edu.ar

RESUMEN

Se estudia el comportamiento de un sistema solar térmico que abastece un proceso productivo. La instalación para calentar agua cuenta con 20 colectores planos selectivos, una superficie de 40 m^2 y un tanque de almacenamiento de 3 m^3. Los resultados de la simulación con el *software System Advisor Model* indican que anualmente la fracción de energía solar térmica que cubre la demanda es 0.835 y el suministro de energía termosolar es 236.4 kWh/m^2 de colector. Luego se comprueba que si se opera con un mayor caudal de agua se reduce dicha fracción pero crece la energía solar térmica suministrada. Efectos similares se producen cuando, aunque no cambia el caudal, el sistema requiere energía para mantenimiento térmico. Si no hay mantenimiento la energía termosolar anual máxima entregada es 611.5 kWh/m^2 de colector y la fracción solar mínima 0.540, pero cuando se requiere mantenimiento dichos valores son 506.8 kWh/m^2 de colector y 0.259 respectivamente. Los valores calculados de la performance indican que instalaciones de aprovechamiento de la energía solar térmica pueden tenerse en cuenta para mejorar la productividad y competitividad de pequeñas y medianas industrias ubicadas en la región central de Argentina.

Palabras clave: Energía Solar, Sistema Solar Térmico, Calentamiento de Agua, Argentina.

ABSTRACT

The performance of a solar thermal system to supply a productive process is studied. The water heating system has 20 selective flat collectors, an area of 40 m^2 and a storage tank of 3 m^3. The simulation results with the System Advisor Model software indicate that annually the fraction of thermal solar energy that covers the demand is 0.835 and the thermosolar energy supply is 236.4 kWh/m^2 of collector. Then it is verified that if it is operated with a greater flow of water, this fraction is reduced but the supplied solar thermal energy grows. Similar effects occur when, although the flow does not change, the system requires energy for thermal maintenance. If there is no maintenance, the maximum annual solar thermal energy delivered is 611.5 kWh/m^2 of collector and the minimum solar fraction 0.540, but when maintenance is required, these values are 506.8 kWh/m^2 of collector and 0.259 respectively. The calculated values of performance indicate that installations for the utilization of solar thermal energy can be taken into account to improve the productivity and competitiveness of small and medium industries located in the central region of Argentina.

Keywords: *Solar Energy, Solar Thermal System, Water Heating, Argentina*

La energía solar es un recurso natural abundante y no contaminante, para el cual se cuenta con un equipamiento confiable para su aprovechamiento como energía térmica en todos los niveles de temperatura.

INTRODUCCIÓN

Las incertidumbres planteadas sobre la disponibilidad de las fuentes energéticas como el petróleo y el gas natural, el impacto de la contaminación ambiental producida en el planeta y la marcada reducción en los costos de los nuevos desarrollos tecnológicos han favorecido la incorporación de las energías renovables y no convencionales en la matriz energética (IRENA, 2019; REN 21, 2019).

La energía solar es un recurso natural abundante y no contaminante, para el cual se cuenta con un equipamiento confiable para su aprovechamiento como energía térmica en todos los niveles de temperatura. Los colectores solares de placa plana pueden generar energía entre 30 y 80°C, mientras que los de tubos evacuados posibilitan alcanzar 120°C aproximadamente. Asimismo, si se requieren mayores temperaturas se dispone de concentradores cilindro parabólicos, lineales tipo Fresnel, paraboloides de revolución y dispositivos de torre central (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2014).

El campo es amplio para las aplicaciones del calor solar en diversas escalas, abarcando ámbitos públicos y privados, e instalaciones de servicios y de producción, tal como las industrias de proceso, sistemas sanitarios de hospitales y complejos habitacionales. En el año 2000 la generación mundial de energía termosolar fue de 51 TWh, habiendo crecido hasta 396 TWh en 2018, lo que evitó consumir ese año 42.6 millones de toneladas de petróleo y emitir 137.5 millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera (Weiss y Spörk- Dür, 2019)

En Europa, Estados Unidos y otras regiones menos desarrolladas se ha comprobado que una importante fracción de la demanda de calor industrial se puede cubrir con energía solar. Este sector consume en el mundo alrededor del 35% del total, siendo el 30% energía térmica por debajo de los 150°C, el 22% corresponde

al rango entre 150-400°C, y el 48% supera los 400°C de temperatura (Kumar et al., 2019; Solar Payback, 2017). En principio se han priorizado las aplicaciones de la energía solar en la producción de agua caliente para lavar y limpiar, calentamiento de agua para generación de vapor, calor para procesos en baños y recipientes, y secado por convección con aire caliente (IEA-ETSAP e IRENA, 2015; Lauterbach et al., 2014).

Particularmente en la provincia de Santa Fe, Argentina se encuentran radicadas numerosas empresas pequeñas y medianas relacionadas con el sector agropecuario y agroindustrial. En las mismas se fabrican equipamientos y producen alimentos, a la vez que se ejecutan programas para fortalecer la gestión de la energía y promover la incorporación de fuentes renovables, siendo por ello un campo donde puede aprovecharse la energía solar térmica.

Por otra parte se dispone de técnicas de modelado y simulación en programas como TRNSYS, T-SOL, WATSUN y Polysun, para predecir el comportamiento de sistemas solares térmicos en diferentes condiciones climáticas, mejorar el rendimiento de los elementos componentes y analizar su sensibilidad frente a cambios en los parámetros de operación. En este marco muchas publicaciones han presentado estudios sobre el uso de la energía termosolar en áreas productivas empleando variadas herramientas de cálculo y tienen el respaldo de software con confiabilidad comprobada (Abdel-Dayem et al., 2001; Frein et al., 2014; Kalogirou, 2003; Quijera et al., 2011; Suresh y Rao, 2017). En otros artículos se ha incluido la determinación de los efectos de la variación en el tiempo de la demanda térmica sobre la performance de instalaciones solares industriales (Mousa y Taylor, 2016; Fenercom, 2014; Lauterbach et al., 2014).

Debe tenerse en cuenta que es factible construir plantas solares modulares estándar para ofrecerlas en el mercado, por lo cual es conveniente como primer paso analizar su *performance* para satisfacer diferentes demandas térmicas en aplicaciones relacionadas con el sector productivo de la región latinoamericana. Dado que el fin es mejorar la productividad y competitividad industrial, en posteriores etapas será necesario evaluar ambiental y económicamente la instalación solar propuesta.

En este trabajo se simula una instalación solar de mediana escala para calentamiento de agua que abastece un proceso productivo cuya demanda térmica es variable durante el día y a lo largo del año. El agua caliente suministrada se emplea como fluido de intercambio térmico en el equipo donde se lleva a cabo el proceso. Con el software System Advisor Model (SAM versión 2020.2.29) se determinan la radiación solar incidente y aprovechada, la temperatura del agua suministrada, la energía termosolar aportada y los consumos energéticos complementarios. Luego se analiza el efecto de la demanda térmica sobre la *performance* de la instalación considerando casos donde solo aumenta el caudal de agua caliente, y otros donde además se necesita energía adicional para mantenimiento térmico cuando no se lleva a cabo el proceso. Este suministro de calor para mantenimiento evita que la carga contenida en el equipo se enfríe, ya que permanece a una temperatura prefijada.

MATERIALES Y MÉTODO

Integración de la energía solar térmica

En la Tabla 1 se muestran procesos y servicios industriales donde se aplica la energía solar térmica, observándose que los mismos abarcan varios sectores. Las industrias de alimentos y bebidas, fabricación de materiales o piezas metálicas, procesos químicos y plantas para lavado y limpieza son las que poseen mayor potencial (Farjana, 2018; Kumar et al., 2019; Sharma et al., 2017).

Tabla 1. Aplicaciones de la energía solar térmica en la industria

INDUSTRIA	PROCESO O SERVICIO	TEMPERATURA (°C)
Alimentos	Secado	30 - 90
	Lavado	60 - 90
	Pasteurización	60 - 80
	Ebullición	95 - 105
	Esterilización	110 - 120
	Calentamiento	40 - 60
Bebidas	Lavado	60 - 80
	Esterilización	60 - 90
	Pasteurización	60 – 70
Papeles	Cocción y secado	60 - 80
	Ebullición de agua	60 - 90
	Blanqueamiento	130 - 150
Superficies metálicas	Tratamiento, galvanoplastia, otros	30 - 80
Ladrillos y bloques	Curado	60 - 140

Fuente: Elaboración propia

La aplicación del calor solar está en constante crecimiento y se han implementado plantas que van desde la pequeña escala hasta grandes sistemas que producen 100 MW térmicos. Según datos publicados, al menos 741 plantas con 662,648 m² de colectores fueron operadas en todo el mundo en 2018, habiéndose incorporado 567 MW térmicos. En ese mismo año 108 plantas fueron proyectadas, y a los países que figuran en la Tabla 2 se deben agregar Argentina, Chipre, Grecia, Israel, Italia, Corea del Sur, Sudáfrica, Turquía, la Unión Europea y Estados Unidos (Weiss y Spörk- Dür, 2019).

Tabla 2. Sistemas termosolares industriales proyectados en 2018

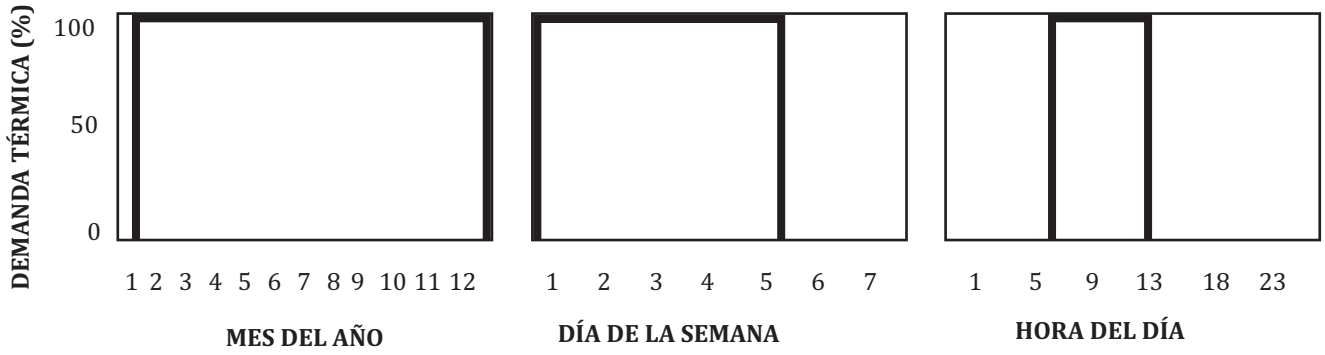
LOCALIZACIÓN	NÚMERO DE SISTEMAS	ÁREA TOTAL DE COLECTORES (m²)	ÁREA PROMEDIO DE LOS SISTEMAS (m²)
China	15	28,813	1,921
México	51	6,898	135
Francia	2	5,543	2,772
India	10	3,964	396
Alemania	9	1,589	177
España	3	1,218	406
Austria	3	435	145
Otros países	15	5,194	346

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificado el proceso o servicio industrial, se requiere integrar la energía solar aplicando una metodología para dimensionar y configurar las instalaciones en función de las necesidades propias de la producción y el uso de las otras fuentes de energía complementarias. Por ello se están adecuando continuamente procedimientos, según la localización geográfica y el tipo de aplicación que se planifica. Se pueden contemplar las industrias que presentan el mayor consumo de energía, así como casos en que se dispone de fluidos que retornan de un proceso o servicio a una temperatura relativamente alta. También se debe tener en cuenta que las tecnologías más confiables son las desarrolladas para bajas temperaturas y utilizan colectores solares de placa plana y de tubos evacuados, habiéndose ya reconocido que los primeros tienen mayor durabilidad y los últimos generan energía térmica más eficientemente. Los procesos y servicios industriales en los que ya se usa la radiación solar específicamente para calentar agua son el precalentamiento de la alimentación a calderas, higiene de equipos e instalaciones y calor, para operaciones en tinas, baños y recipientes (Farjana, 2018; Sharma et al., 2017).

Dado que el calentamiento solar de agua puede abastecer procesos térmicos donde se opera durante un tiempo predeterminado, se pueden aprovechar corrientes de retorno y el nivel de temperatura no es muy elevado, en el caso elegido como base para este estudio el proceso se lleva a cabo durante seis horas al día y cinco días de la semana, excepto en la primer quincena de enero (Figura 1).

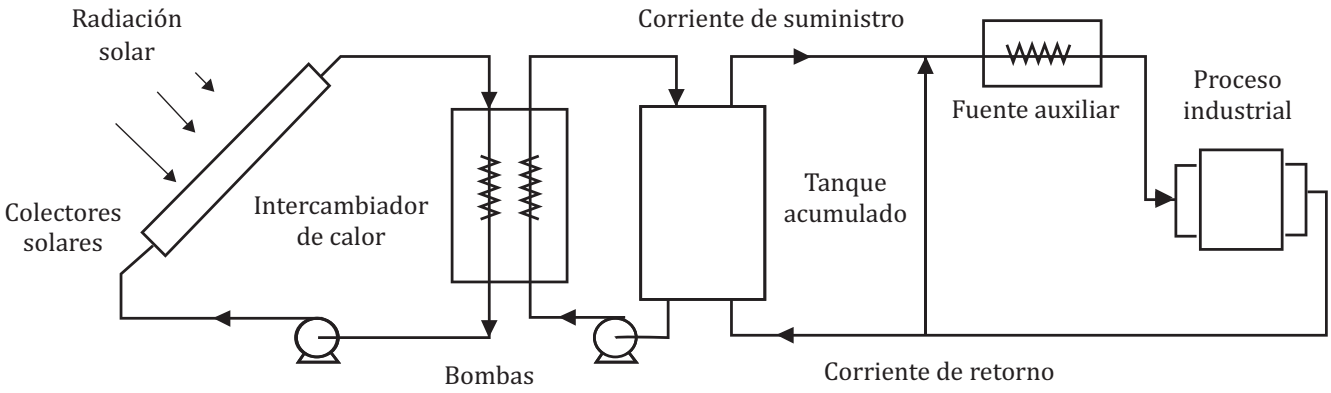
Figura 1. Perfil de la demanda térmica del proceso productivo



Fuente: Elaboración propia

La instalación solar estará localizada cerca de la ciudad de Santa Fe, Argentina. En la misma el agua circula por convección forzada entre los colectores solares y el intercambiador, y entre éste y el tanque acumulador. El circuito hidráulico que posee bombas, y un controlador que gobierna la captación de la radiación solar (Figura 2).

Figura 2. Instalación de calentamiento con energía solar



Fuente: Elaboración propia

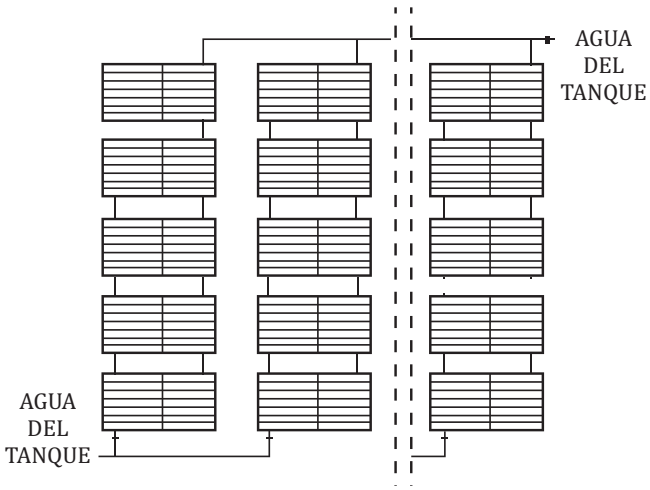
El controlador posibilita que el agua circule por el circuito de captación de la radiación solar, solo si la temperatura de salida del agua de los colectores es varios grados mayor que la temperatura del agua en el fondo del tanque acumulador. El sistema posee dos fuentes de energía complementarias: suministro de energía auxiliar con gas natural que completa los requerimientos térmicos, y electricidad para bombeo en el circuito hidráulico.

La temperatura del proceso es 45°C, la temperatura fijada para suministro del agua caliente es 75°C, la temperatura de la corriente de retorno 50°C, y el caudal circulante por el equipo de proceso 260 kg/h. El agua caliente circula por un intercambiador de calor que alimenta térmicamente al equipo donde transcurre el proceso, siendo la temperatura de la corriente de salida 5°C más alta que la necesaria en el mismo. Si el sistema solar suministra agua a menos de 75°C, esta temperatura se alcanza mediante la fuente térmica auxiliar. Cuando la temperatura de la corriente que sale del tanque es mayor a 75°C la corriente se mezcla con una parte de la corriente de retorno para lograr el nivel térmico fijado. Si eventualmente la temperatura del tanque supera los 100 °C, se descarga calor para evitar los problemas originados por el sobrecalentamiento.

Los colectores solares adoptados son de placa plana. En los mismos una parte de la radiación solar se transmite por una cubierta de vidrio semitransparente, se absorbe en una placa de aluminio recubierta con un material selectivo, y al convertirse en energía térmica se transfiere al agua que circula por tubos de cobre. Entre la placa y la cubierta hay una cámara de aire, se utiliza un aislante térmico para evitar las pérdidas de calor, y una caja de chapa metálica contiene todos los componentes (Albizzati, 2012; Kalogirou, 2014).

El sistema modular está configurado con cuatro baterías de cinco colectores cada una, todas en paralelo (Figura 3).

Figura 3. Configuración de los colectores solares



Fuente: Elaboración propia

Como se ve en las Tablas 3 y 4, la instalación solar se caracteriza por el área de colección, la inclinación de los colectores que miran al norte respecto a la horizontal y el volumen de agua acumulado en el tanque. El área total de colección es el producto entre el área de cada colector solar (A_c) y el número de colectores (N_c).

Tabla 3. Características técnicas de los colectores solares

ÁREA TOTAL DE COLECTORES (m^2)	INCLINACIÓN DE COLECTORES (°)	PARÁMETROS DE LOS COLECTORES			
		$F_R E_O$	$F_R U_C$ (W/m^2 °C)	FLUJO (kg/s m^2)	MODIFICADOR DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA
40	35	0.70	4.50	0.020	0.17

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Datos técnicos de componentes de la instalación solar

VOLÚMEN DEL TANQUE (m^3)	COEFICIENTE DE PÉRDIDAS DEL TANQUE (W/m2 °C)	LONGITUD TOTAL DE LAS CAÑERÍAS (m)	RESISTENCIA DE LAS CAÑERÍAS AISLADAS (m^2 °C/W)	EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (%)
3	1	120	0.75	80

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de los colectores $F_R E_O$ y $F_R U_C$ están asociados a E_O, la eficiencia óptica, F_R el factor de remoción del calor y U_C el coeficiente de pérdidas de calor. Cuando se opera con un caudal másico de agua por unidad de área de captación diferente al tabulado, dichos parámetros se corrigen (ANSI/ASHRAE 93, 2010; Duffie y Beckman, 2013).

La energía solar captada por unidad de tiempo (q_c) se computa con los parámetros característicos, siendo la diferencia entre la energía absorbida y la perdida en los colectores. Intervienen también en el cálculo la radiación total incidente (I_T), el área neta total (A_c), la temperatura de la corriente que ingresa (T_e) y la temperatura ambiente (T_a) (Duffie y Beckman, 2013)

$$q_c = (F_R E_O) I_T A_c N_c - (F_R U_c) A_c N_c (T_e - T_a) \quad \textbf{(1)}$$

El tanque acumulador se dimensiona con una capacidad de 0.075 m^3/m^2 de área de colección; el caudal total de agua circulante en la instalación es de 0.40 kg/s y para bombeo se fija un consumo máximo de 190 W.

Evaluación de la instalación solar

Para calcular la radiación solar incidente sobre los colectores y luego evaluar la *performance* del sistema solar se emplea el *software* SAM. Este simulador fue desarrollado por el *National Renewable Energy Laboratory* (USA) para la planificación y evaluación de proyectos de energías renovables, así como para la investigación académica y ha sido verificado mediante la aplicación de otros modelos más complejos como TRNSYS (DiOrio et al., 2014).

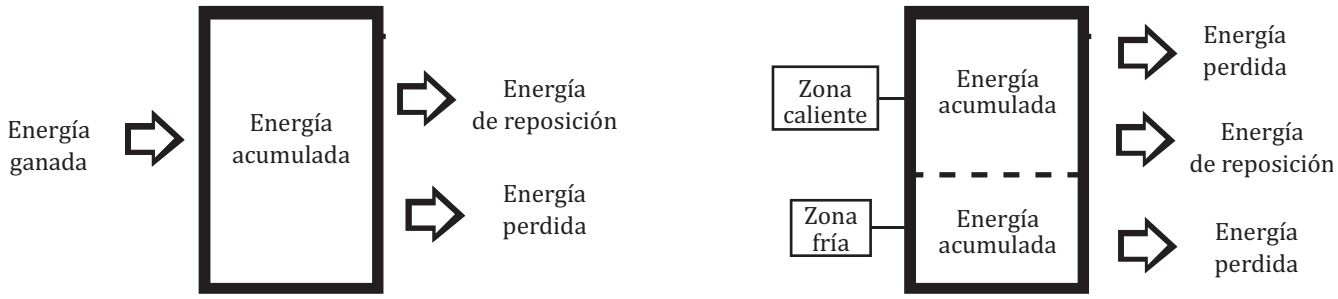
El programa para calentamiento de agua permite modificar la localización geográfica, los perfiles de la demanda, las características del colector, y muchas otras variables. Para su utilización se deben cargar valores horarios de la radiación solar en el plano horizontal, y datos climáticos correspondientes al *Typical Meteorological Year* del lugar donde se encuentra la instalación. El *software* es dinámico y genera 8,760 valores horarios, relacionados fundamentalmente con el aporte de energía térmica de origen solar y la temperatura del agua. Se puede obtener también otra información horaria, mensual y para todo el año, seleccionando en forma apropiada las entradas y salidas.

SAM tiene varias opciones para hallar la radiación recibida por los colectores solares, partiendo de la radiación solar global (I), la radiación directa (I_D) y la radiación difusa (I_d) en el plano horizontal. En este caso se calcula con el modelo anisotrópico HDRK que contempla el índice de anisotropía (A_i), el cociente entre la radiación directa en planos inclinados y el horizontal (R_D), el ángulo de inclinación de los colectores (β) y la reflectividad de los alrededores (r) (Duffie y Beckman, 2013):

$$I_T = (I_D + I_d\ A_i)\ R_D + I_d\ (1 - A_i)\ [(1+ \cos \beta)/2]\ [1 +(I_D/I)^{0,5}\ .\ \text{sen}^3\ (\beta/2)] + I\ r\ [(1- \cos \beta)/2] \quad \textbf{(2)}$$

El modelo físico-matemático aplicado supone que hay dos situaciones claves en el funcionamiento del sistema solar. En una de ellas se produce la captación de la radiación y ganancia de energía en el tanque perfectamente mezclado, ya que ingresa la corriente que proviene del intercambiador y egresa otra corriente más fría hacia ese equipo (Figura 4). La energía ganada es menor que la energía colectada debido a las pérdidas en las cañerías y a que la eficiencia del intercambiado de calor es menor al 100 %.

Figura 4. Modelos del tanque acumulador: con mezclado perfecto (a) y estratificado en dos zonas (b)



Fuente: Elaboración propia

La energía acumulada por unidad de tiempo es función de variación de la temperatura del tanque (T_t) en el tiempo (t), el calor específico (C_p) y la masa de agua (M_t), dependiendo de las energías ganada (q_g), de reposición (q_r), perdida hacia el ambiente (q_p) y descargada para evitar sobrecalentamiento (q_o):

$$M_t\ C_p\ (\ dT_t / dt\ ) = q_g - q_r - q_p - q_o \quad \textbf{(3)}$$

La energía de reposición involucra el caudal que se suministra (w), y la diferencia entre las temperaturas del tanque y del retorno (T_r). Cuando no hay suministro de agua desde el acumulador y retorno proveniente del proceso, la reposición es nula.

$$q_r = w\ C_p\ (T_t - T_r\ ) \quad \textbf{(4)}$$

Las pérdidas de energía térmica se calculan con el coeficiente total de transferencia de calor (U_t) y el área (A_t) del tanque:

$$q_p = U_t\ A_t\ (T_t - T_a) \quad \textbf{(5)}$$

En los momentos en que no se colecta energía termosolar, se considera que el tanque está estratificado y dividido en dos zonas sin conexión térmica. Para cada zona se formulan dos ecuaciones diferentes, creciendo el volumen frío al suministrarse agua desde el tanque y recibir el retorno. Un tercer comportamiento que es menos frecuente, estima que antes de alcanzarse el mezclado perfecto, existe una baja estratificación y aumenta el volumen de la zona caliente (Christensen et al., 2014; DiOrio et al., 2014).

Entonces en SAM se plantea un sistema de ecuaciones diferenciales que, una vez resueltas hora a hora, permiten hallar todos los indicadores de la *performance* de la instalación en forma horaria, diaria, mensual y para todo el año.

Con respecto a la demanda periódica de energía térmica del proceso (Q_d), se estima con la masa de agua total a suministrar (M), la temperatura del agua caliente suministrada (T_c) y la temperatura del agua que retorna del proceso:

$$Q_d = M\ C_p\ (T_c - T_r) \quad \textbf{(6)}$$

En la instalación los colectores solares convierten una parte de la radiación recibida pero se suministra una cantidad menor de energía de origen solar (Q_e). A su vez se usa energía auxiliar (Q_a) con el fin de completar la demanda térmica, por lo que:

$$Q_d = Q_e + Q_a \quad \textbf{(7)}$$

Entonces, la fracción de energía solar térmica que cubre la demanda resulta:

$$F_s = Q_e / Q_d \quad \textbf{(8)}$$

Se debe tener en cuenta que también se consume energía eléctrica en las bombas (P_b), y entonces la fracción solar efectiva es:

$$F_a = (Q_e - P_b)/Q_d \quad \textbf{(9)}$$

Al evaluar la instalación se emplea además la eficiencia térmica (E_s), que es el cociente entre la energía solar aportada y la radiación total solar incidente en todo el año. Esta radiación es el producto entre la radiación total por unidad de superficie (ΣI_T), el área de cada colector solar (A_c) y el número de colectores solares (N_c).

$$E_s = Q_e / (N_c\ A_c\ \Sigma I_T) \quad \textbf{(10)}$$

Cambios en la demanda térmica

Los cambios en la demanda térmica pueden derivarse de las necesidades de la escala industrial. Aquí se computan los efectos que se producen en la *performance* térmica de la instalación modular, al modificarse la masa de agua caliente que se abastece. En todos los casos analizados se mantienen las temperaturas de las corrientes de suministro y de retorno (Tabla 5).

Los cálculos confirman que en invierno es más baja la contribución solar, mientras que es más elevado el consumo de energía térmica auxiliar y es menor la potencia para la circulación del fluido.

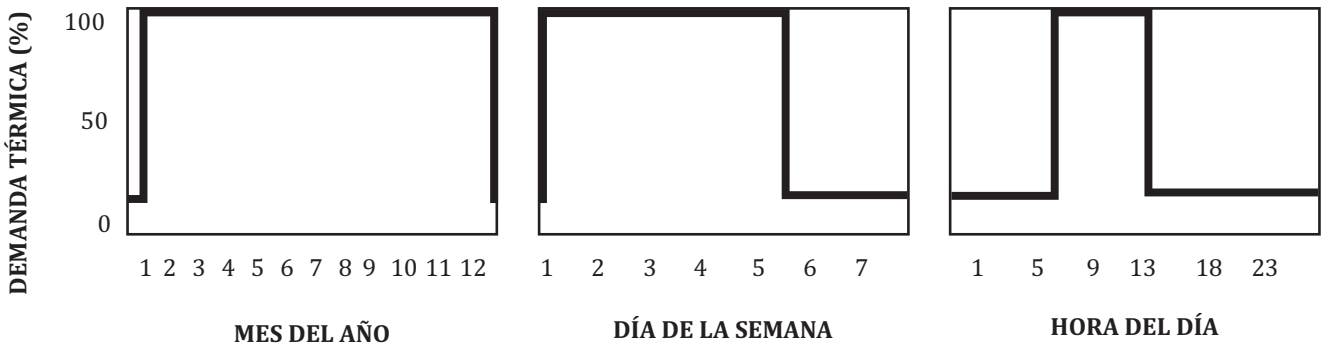
Tabla 5. Características del proceso productivo

CASO	TIPO DE SUMINISTRO	CAUDAL SUMINISTRADO (kg/h)	DEMANDA TÉRMICA ANUAL (kWh)
I	A	260	11,326.3
II	A	520	22,652.5
III	A	780	33,978.8
IV	A	1,040	45,305.0
V	B	260-39	19,549.1
VI	B	520-78	39,098.2
VII	B	780-117	58,647.3
VIII	B	1,040-156	78,196.4

Fuente: Elaboración propia

Los procesos industriales pueden requerir solamente del suministro tipo A o del suministro tipo B, y en algunos casos es posible que se pueda elegir entre las dos alternativas. Debe observarse que en los casos II-IV no se modifica el perfil de la demanda propuesto en el caso I, se requieren diferentes caudales y se opera durante seis horas. En los suministros tipo B (casos V-VIII) se demanda una energía adicional para mantenimiento, que es el 15% de la originalmente fijada para el suministro tipo A. Se cubren de este modo las pérdidas de calor del equipo en momentos en que no se lleva a cabo el proceso (Figura 5). La operación implica que aunque no se modifiquen el caudal y el tiempo del proceso, la energía anual que se debe proveer es mayor.

Figura 5. Perfil de la demanda térmica del proceso con mantenimiento



Fuente: Elaboración propia

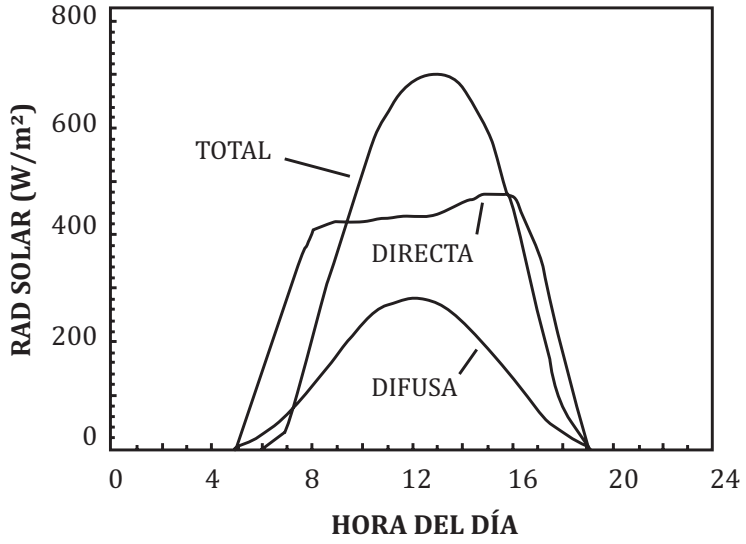
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contribución solar a la demanda térmica

En el programa SAM se cargan los valores horarios de la radiación solar directa y difusa horizontal junto con otros datos del clima, que están disponibles para América del Sur-WMO Región 3-Argentina *Typical Meteorological Year* (EnergyPlus, 2017).

Los valores medios anuales de la radiación solar total, directa y difusa que incide sobre los colectores, calculados con r = 0.20, se presentan en la Figura 6. La radiación total promedio es mayor a 700 W/m^2 al mediodía, y aunque es mayor en primavera y verano en otras épocas del año se alcanzan valores muy significativos. Debido a la inclinación y orientación de los colectores solares, dicha radiación es 810 W/m^2 en septiembre, y supera en un 40% y 7% a los correspondientes valores de junio y diciembre.

Figura 6. Radiación solar promedio anual sobre los colectores



Fuente: Elaboración propia

Siendo la radiación total incidente anual 1,899.9 kWh/m^2 y la demanda térmica anual igual a 11,326.3 kWh, al aplicar el *software* se obtiene que la fracción solar es 0.835 y la eficiencia térmica de la instalación es 0.124. Se encuentra también que como son necesarios 1,870.5 kWh de energía para completar el suministro de calor y 517.4 kWh son consumidos para bombear el fluido, la fracción solar efectiva es 0.789.

La Figura 7 muestra en detalle la temperatura del agua en el punto más caliente del tanque. En el acumulador se supone que existe estratificación y el valor medio anual de la temperatura es aproximadamente 79°C, alcanzándose con frecuencia valores que superan los 85°C, salvo durante el invierno. En los meses fríos la radiación solar recibida por los colectores disminuye sensiblemente, y la energía térmica ganada que llega al tanque es mucho menor que en el resto del año.

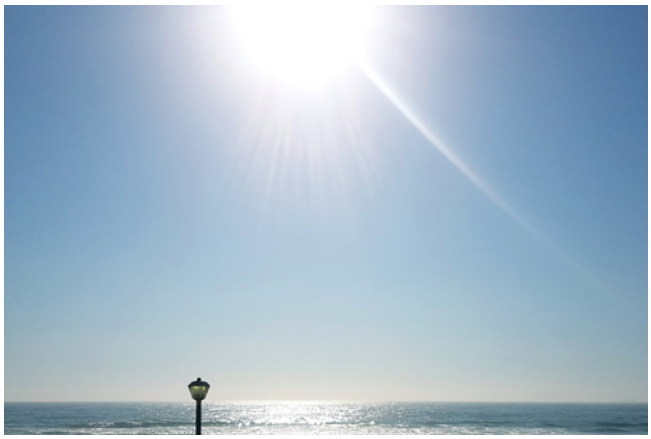
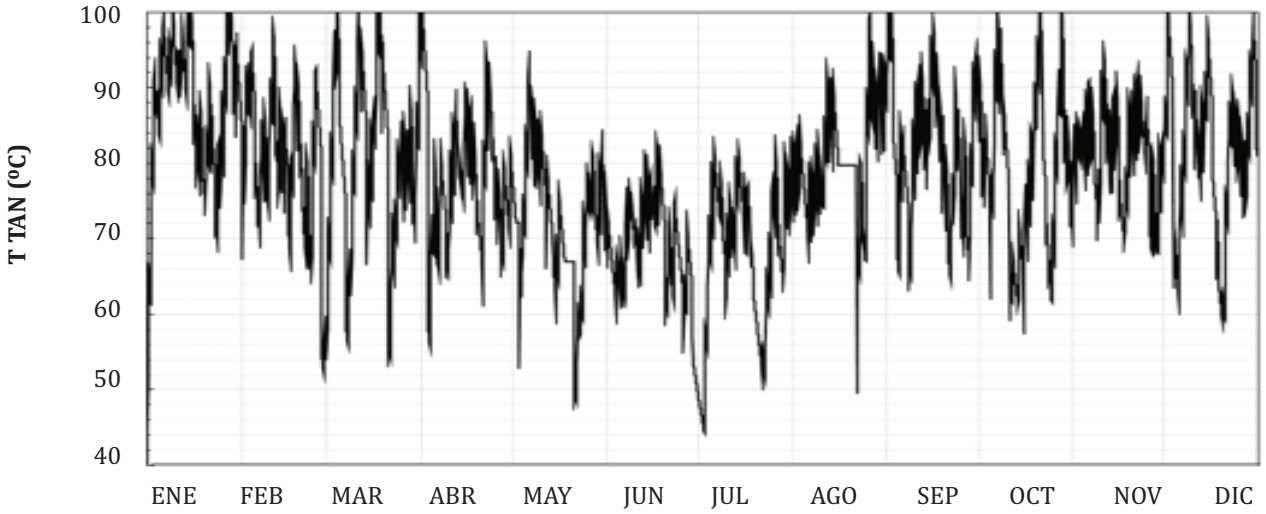


Figura 7. Temperatura del agua horaria en el tanque acumulador

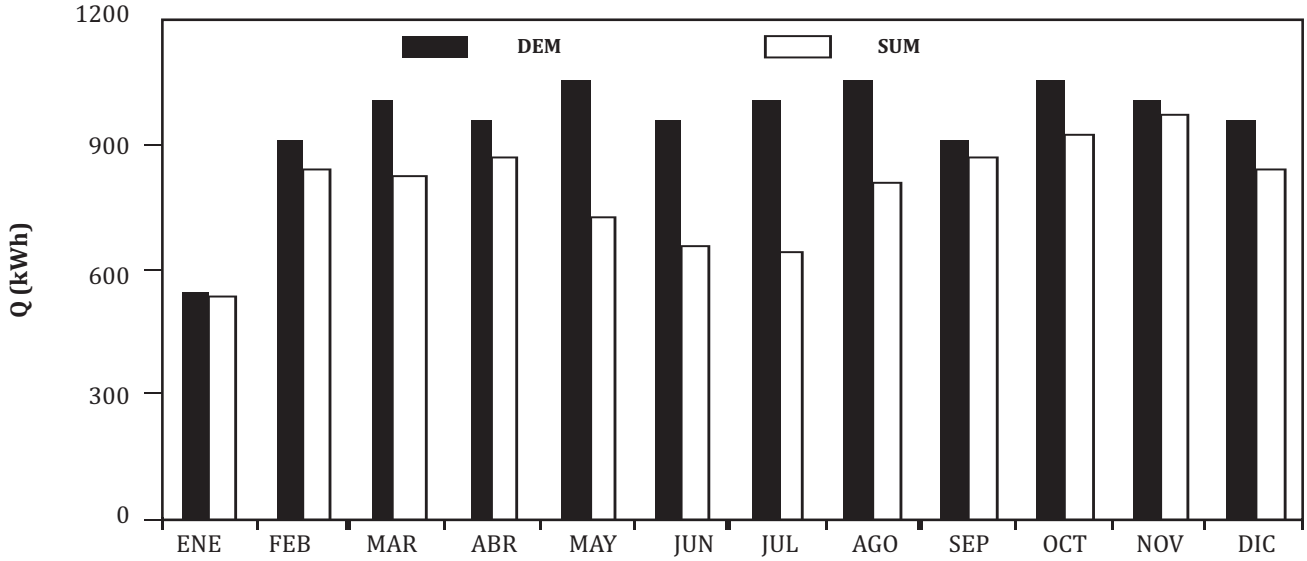


Fuente: Elaboración propia

Aunque en los primeros quince días de enero no se consume agua caliente la instalación solar opera captando y acumulando la radiación convertida, por lo que se dispone a casi a 100°C para ser utilizada en el arranque del proceso. Como el proceso estudiado se desarrolla entre las 7 y las 13 horas, y la real captación de la radiación solar se produce entre las 9 y 17 horas en la mayor parte del año, existe un desfasaje que influye sobre los indicadores de la *performance* térmica del sistema.

En la Figura 8 se presentan la demanda y el suministro mensual de energía solar térmica de la instalación. Descartando el mes de enero, los valores mínimos y máximos suministrados son 640.6 kWh y 963.9 kWh en julio y noviembre respectivamente. Los cálculos confirman que en invierno es más baja la contribución solar, mientras que es más elevado el consumo de energía térmica auxiliar y es menor la potencia para la circulación del fluido.

Figura 8. Energía térmica mensual demandada y solar suministrada



Fuente: Elaboración propia

Efectos de la demanda térmica

Al determinar anualmente el efecto de la demanda sobre la *performance* de la instalación modular, los cálculos indican que con suministro tipo A (casos I-V) al crecer la misma se reduce la fracción de energía solar, pero aumentan la energía termosolar entregada y la eficiencia. Lo mismo sucede al analizar los suministros tipo B (casos V-VIII).

La Tabla 6 muestra que los mayores valores de la fracción solar son 0.835 para suministros A (caso I) y 0.670 para suministros B (caso V). Las eficiencias térmicas máximas son 0.322 y 0.267 para los casos IV y VIII respectivamente.

Tabla 6. Efectos sobre la performance anual de la instalación solar

CASO	ENERGÍA TERMOSOLAR ANUAL SUMINISTRADA (kWh)	FRACCIÓN SOLAR TÉRMICA ANUAL	EFICIENCIA SOLAR TÉRMICA ANUAL	FRACCIÓN SOLAR EFECTIVA ANUAL
I	9,455.8	0.835	0.124	0.789
II	16,667.5	0.736	0.219	0.712
III	19,947.10	0.587	0.262	0.570
IV	24,460.7	0.540	0.322	0.527
V	13,092.4	0.670	0.172	0.640
VI	18,216.5	0.466	0.240	0.450
VII	19,443.3	0.332	0.256	0.321
VIII	20,271.5	0.259	0.267	0.251

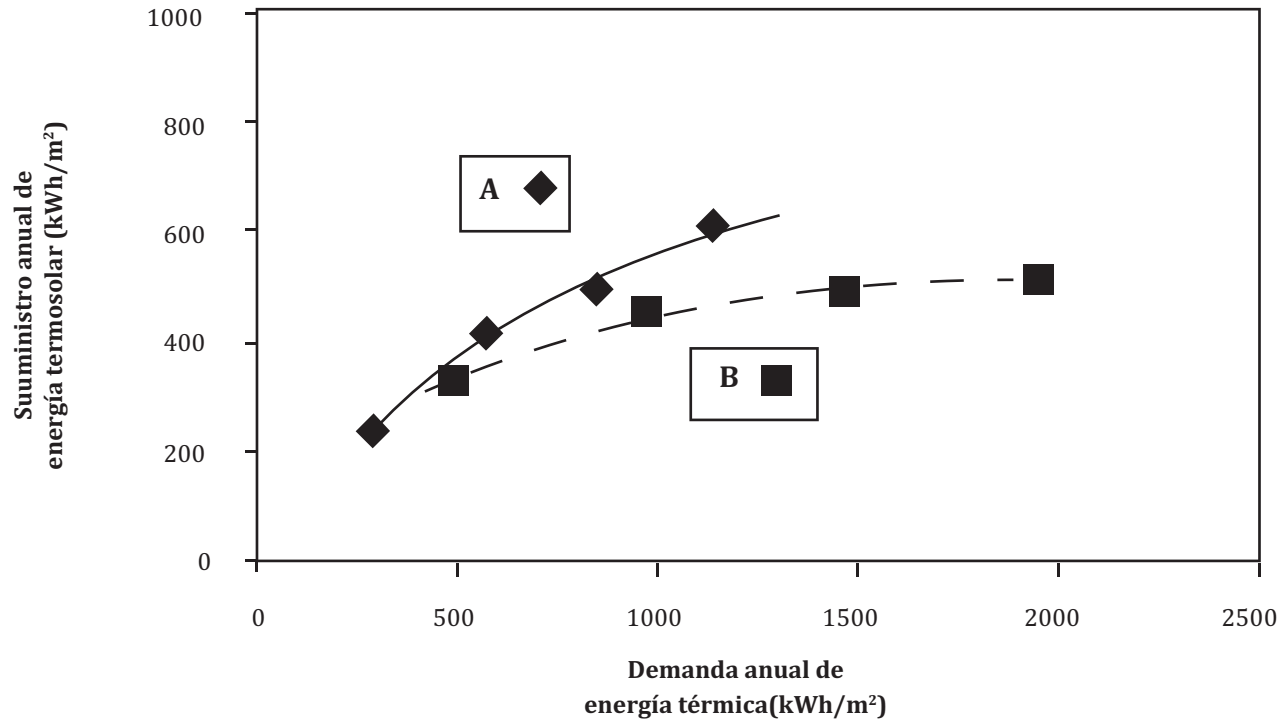
Fuente: Elaboración propia

El desfasaje entre el inicio del proceso y la ganancia real de energía provoca que exista un consumo de energía auxiliar a partir de las 7 de la mañana, que es relativamente más importante cuando crece el caudal que se suministra. Al comparar los casos I y II se comprueba que aunque se duplica la demanda, el aumento de la energía termosolar suministrada es del 76 %, por lo que la energía térmica auxiliar prácticamente se triplica. El suministro crece porque la energía ganada en el sistema es mayor, la temperatura en el tanque es menor, se capta más radiación solar y las pérdidas de calor disminuyen.

Efectos similares se producen cuando se aumenta el caudal del agua en los restantes casos. En V-VIII, se observa que al multiplicarse la demanda baja la fracción solar, creciendo la eficiencia y la energía termosolar que se entrega.

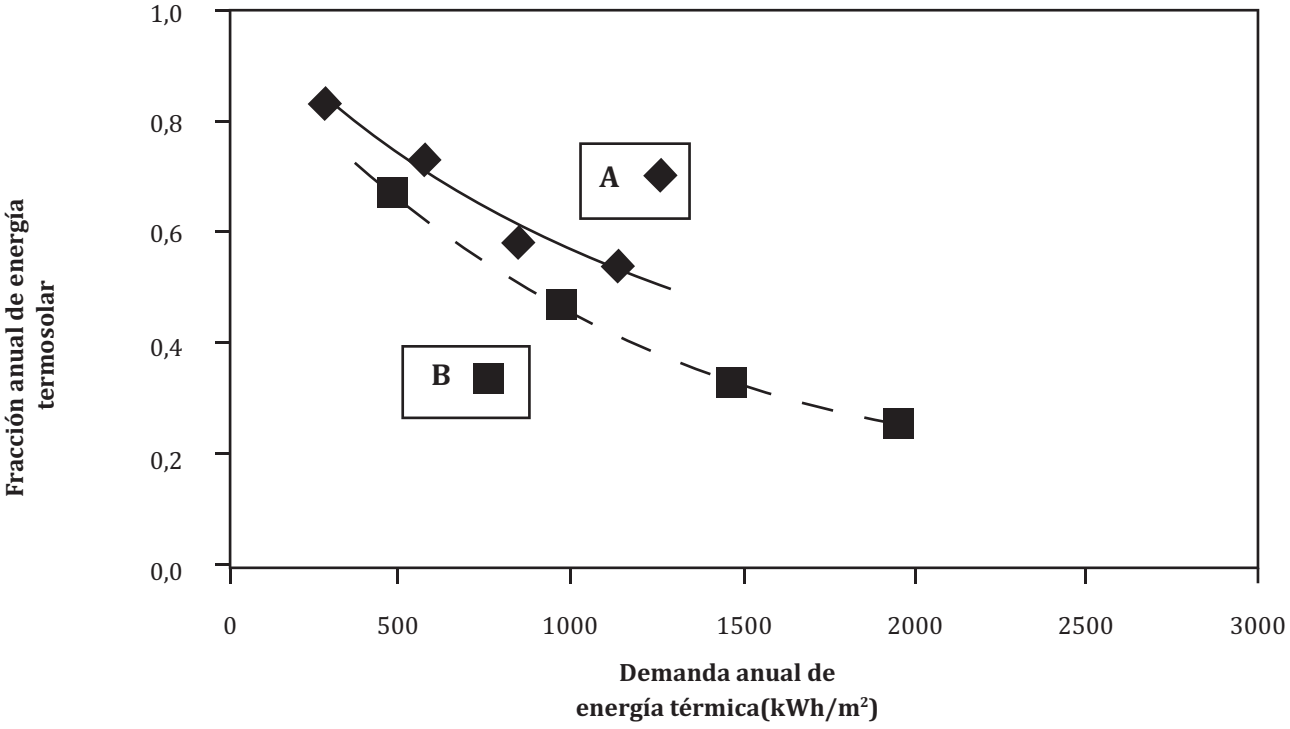
Otros efectos se ven en la referida tabla cuando no cambia el caudal de agua caliente y se consume energía para mantenimiento térmico, aunque siempre hay disminución de la fracción solar. Si por ejemplo se comparan los casos I y V el suministro de energía y la eficiencia anual aumentan, mientras que esos indicadores disminuyen al comparar los casos III y VII. Entonces existe un valor de la demanda a partir del cual se tiene una menor eficiencia al incorporar mantenimiento térmico a la instalación (Figuras 9 y 10).

Figura 9. Energía termosolar suministrada en función de la demanda



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Fracción de energía termosolar en función de la demanda



Fuente: Elaboración propia

Las figuras anteriores muestran que si no hay mantenimiento térmico la energía termosolar anual máxima entregada es 611.5 kWh/m^2 de colector y la fracción solar mínima es 0.540, pero cuando se requiere mantenimiento dichos valores son 506.8 kWh/m^2 de colector y 0.259. La energía suministrada aumenta un 38% entre I y V, mientras que disminuye un 17% entre IV y VIII.

Cuando se requiere mantenimiento térmico si crece el caudal de fluido suministrado, aunque la ganancia de energía termosolar es mayor, el consumo de energía auxiliar al inicio del proceso es más importante. Por esto en los casos VII y VIII donde la demanda es más elevada, la eficiencia térmica es más baja que en III y IV respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran también en los casos con suministro tipo A, que la mayor demanda disminuye el cociente entre la potencia necesaria para bombeo y la energía solar térmica suministrada. Una tendencia similar se verifica en los casos tipo B, aunque en cada instalación el mantenimiento térmico provoca un consumo mayor de energía eléctrica.

Los indicadores calculados en los casos tipo A son inferiores a los obtenidos en Madrid, España para instalaciones industriales cuya demanda energética diaria promedio por unidad de área de colección se encuentra en el mismo rango. En ellas ha verificado que al calentar agua desde 15°C hasta a 60°C en forma continua durante todo el año, se obtiene una alta eficiencia y suministros anuales entre 700 y 1.000 kWh/m^2 de colector, notándose que la menor temperatura del agua en el sistema provoca un crecimiento de esos valores (Fenercom, 2010).

Para los suministros tipo B los indicadores se pueden comparar con los de instalaciones de igual demanda energética diaria promedio por unidad de área de colección localizadas en Madrid, España. En ellas el baño está a 45°C y opera doce horas por día, excepto sábado y domingo (Fenercom, 2010). Los colectores planos están inclinados a 35° mirando al sur, la acumulación es de 0.070 m^3/m^2, la temperatura de la corriente de suministro es 70°C, la del retorno es 50°C y el mantenimiento es el 20% del consumo en el proceso (Tabla 7).

Tabla 7. Instalaciones solares con demanda variable y mantenimiento térmico

CASO	DEMANDA TÉRMICA PROMEDIO DIARIA (kWh/m^2)	ENERGÍA TERMOSOLAR ANUAL SUMINISTRADA (kWh/m^2)	FRACCIÓN SOLAR TÉRMICA ANUAL	EFICIENCIA SOLAR TÉRMICA ANUAL
F1	1.339	435.0	0.830	0.246
F2	2.678	600.0	0.600	0.339
F3	4.017	605.0	0.450	0.342
F4	5.356	615.0	0.350	0.348

Fuente: Elaboración propia

En los casos F1-F4 que están en la citada tabla se alcanzan valores más elevados de todos los indicadores que en los casos estudiados V-VIII, aunque la radiación solar anual sobre Madrid es 1,769.0 kWh/m^2, casi un 7% menor que en Santa Fe. Debe tenerse en cuenta que hay diferencias en el modo de operación, y que en la *performance* influyen la distribución de la radiación durante

el año, los parámetros de los colectores, el perfil diario de consumo del agua caliente, la temperatura y el salto térmico del fluido requerido en el proceso.

La energía térmica solar anual suministrada en las instalaciones españolas alcanza el valor máximo de 615.0 kWh/m^2 de colector que supera en un 20% al máximo calculado para Santa Fe, ambos para la misma demanda por unidad de área de colector. Puede decirse que un efecto muy significativo produce la reducción en 5°C del salto térmico del fluido calefactor, pues porcentualmente su caída es similar al crecimiento del suministro.

Luego, para el sistema que se ha estudiado se han calculado rendimientos térmicos similares a aquellos encontrados en lugares donde se están realizando intensos programas para la incorporación de sistemas solares térmicos en el sector productivo. Sin embargo, para un mejor aprovechamiento local deberá avanzarse principalmente en lo que respecta a la disponibilidad de tecnologías para la captación de la radiación solar y recursos humanos capacitados para el diseño y montaje, además de los aspectos ambientales y económicos involucrados en las instalaciones.

CONCLUSIONES

El *software System Advisor Model* (SAM) posibilita analizar detalladamente el comportamiento de instalaciones solares para calentar agua. Los datos horarios de la radiación solar, variables climáticas locales, cantidad y temperatura del agua requerida, características de los colectores adoptados y del tanque acumulador, se encuentran entre los entre los más importantes para posibilitar el uso del programa.

Al simular el sistema solar para calentar agua que abastece un proceso productivo que tiene 20 colectores planos selectivos con 40 m^2 de superficie de captación y un tanque acumulador de 3.0 m^3, cuando la demanda es de 11,326.3 kWh por año los resultados indican que la fracción de energía solar es 0.835 y la eficiencia térmica es 0.124, siendo la fracción efectiva es 0.789 al considerar el consumo de energía eléctrica para bombeo.

Luego se comprueba que al cambiar la demanda debido solo a aumentos del caudal de agua, tanto en casos con mantenimiento térmico como sin mantenimiento, se reduce la fracción de energía solar, pero crecen la energía termosolar suministrada y la eficiencia.

Asimismo, al adicionar el mantenimiento a la instalación en todos los casos disminuye la fracción solar, pero para baja demanda térmica el suministro y eficiencia anuales aumentan, mientras que para una más alta demanda esos indicadores disminuyen. Finalmente, se estima que los indicadores de la performance posibilitan a las instalaciones abastecer satisfactoriamente diferentes demandas térmicas. Entonces, el aprovechamiento de la energía solar térmica es un recurso a tener en cuenta para contribuir a mejorar la productividad y competitividad de pequeñas y medianas empresas industriales que están radicadas en la región central de Argentina.

•••

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral por el apoyo recibido para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

Abdel-Dayem, A. M., Mohamad, M. (2001). Potential of solar energy utilization in the textile industry-a case study. *Renewable Energy, 23*, 3-4, 685-94.

Albizzati, E. (2012). *Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas.* Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

ANSI/ASHRAE 93. (2010). *Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors*. American National Standards Institute /American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

Christensen, C., Maguire, J., Burch J., DiOrio, N. (2014). *Simplified solar water heater simulation using a multi-mode tank model.* https://sam.nrel.gov/images/web_page_files/christensen-2014-simplified-swh-simulation-multi-mode-tank.pdf.

DiOrio, N., Christensen, C., Burch, J., Dobos, A. (2014). *Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model.* https://sam.nrel.gov/resources.

Duffie, J. A., Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. 4th ed., J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.

EnergyPlus. (2017). *EnergyPlus Weather Data*. https://energyplus.net/weather.

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. A. P., Saidur, R. (2018). Solar process heat in industrial systems-A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, Part 3, February, 2270-2286.

Fenercom. (2010). *Manual Técnico de Energía Solar para Procesos Industriales*. https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2010/11.

Frein, A., Calderoni, M., Mott, M. (2014). Solar thermal plant integration into an industrial process. *Energy Procedia, 8*, 152-1163.

IEA-ETSAP e IRENA. (2015). *Solar heat for industrial processes technology Brief*. https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Solar-Heat-for-Industrial-Processes.

IRENA. (2019). *Transforming the energy system-and holding the line on the rise of global temperatures*. https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Transforming-the-energy-system.

Kalogirou, S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy, 76*, 4, 337-361.

Kalogirou, S. (2014). Solar energy engineering: processes and systems. 2nd ed., Elsevier/Academic Press, Burlington, MA, USA.

Kumar, L., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2019). Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. *Energy Conversion and Management, 195*, 885-908

Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K. (2014). System analysis of a low-temperature solar process heat system. *Solar Energy, 101*, 117–130.

Mousa, O. B., Taylor, R. (2016). *Solar thermal sterilization: a TRNSYS performance analysis.* Asia Pacific Solar Research Conference. http://apvi.org.au/solar-research-conference/wp-content/uploads/2017/02/O-Bany-Mousa-and-R-Taylor-Solar-Thermal-Sterilization-A-TRNSYS-Performance-Analysis.pdf.

Quijera, J. A., González Alriols, M., Labidi, J. (2011). Usage of solar energy in an industrial process. *Chemical Engineering Transactions, 25*, 875–80.

REN21. (2019). *Renewables 2019 Global status report*. REN21. http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report.

Sharma, A.K., Sharma, C., Mullic, S. C., Kandpal, T. C. (2017). Solar industrial process heating: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78*, October, 124-137.

Solar Payback. (2017). *Solar heat for industry.* https://www.international-climate-initiative.com/fileadmin/Dokumente/2017/170530_Brochure_EN_Solar_Payback_digital.pd.pdf.

Suresh, N. S., Rao, B. S. (2017). Solar Energy for Process Heating: a Case Study of Select Indian Industries. *Journal of Cleaner Production, 151*, 439–451.

Weiss, W. and Spörk-Dür, M. (2019). *Solar heat worldwide.* The Solar and Heating Programme, International Energy Agency. https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2019.pdf.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD AL AIRE DE EDIFICIOS EN URUGUAY

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AIR PERMEABILITY OF BUILDINGS IN URUGUAY

Juan Manuel Rodríguez Muñoz [1], Andrea Sevrini [2], Gunnar Gil [3], Italo Carlos Bove Vanzulli [4]

Recibido: 26/01/2020 y Aceptado: 06/07/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (76 - 91)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

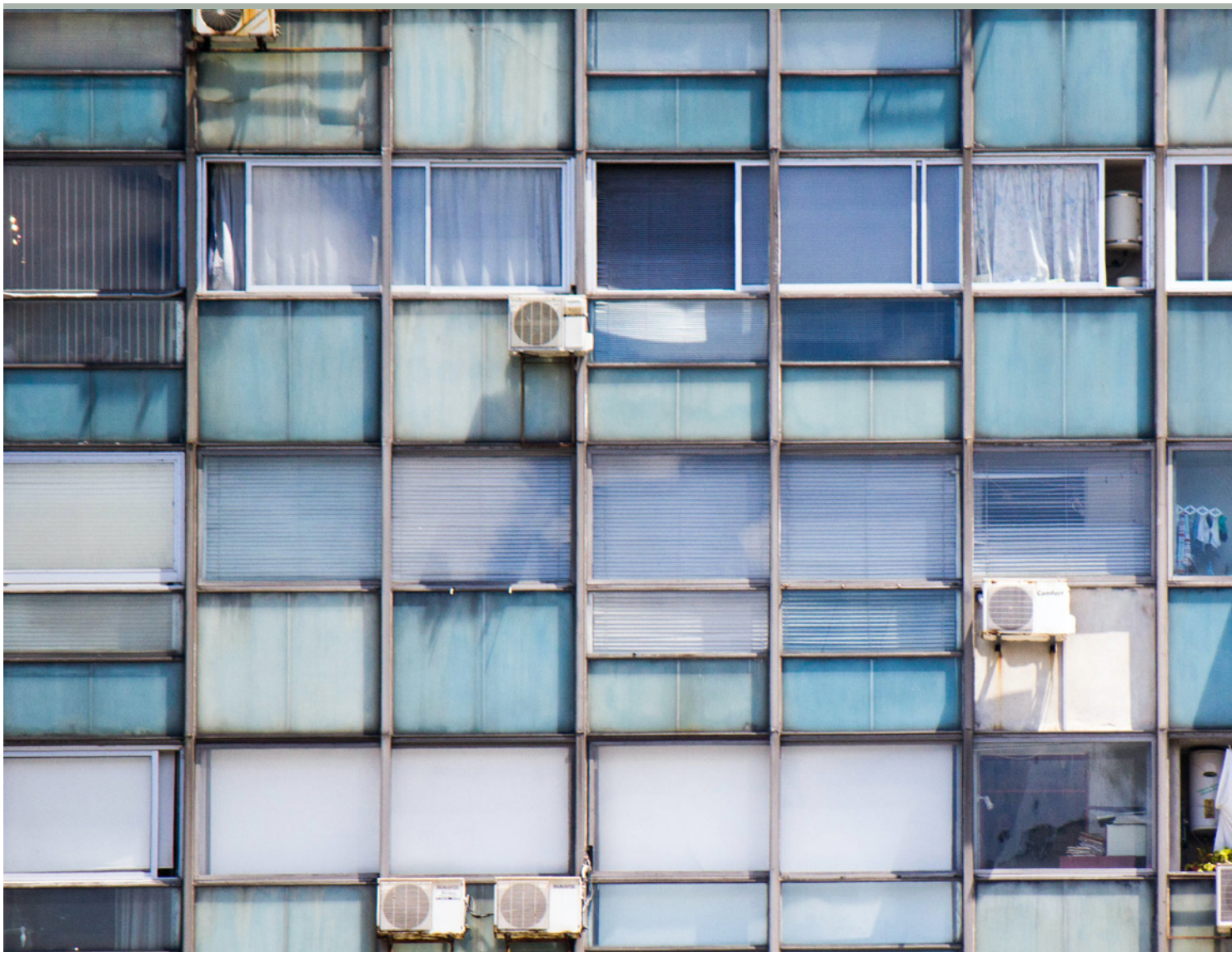


Foto de María Elena Zúñiga de Unsplash.

1 Universidad de la República (UDELAR), Departamento de Física. Uruguay.
jrodriguez@unorte.edu.uy
http://orcid.org/0000-0001-8523-0582

2 Universidad de la República (UDELAR), Centro Universitario Litoral Norte, Departamento Regional Norte de Arquitectura. Uruguay.
a.sevrini@gmail.com
http://orcid.org/0000-0001-5733-7139

3 Universidad de la República (UDELAR), Centro Universitario Litoral Norte, Departamento Regional Norte de Arquitectura. Uruguay.
gunnargm@gmail.com
http://orcid.org/0000-0003-4735-7413

4 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Física. Uruguay.
italo@fing.edu.uy
http://orcid.org/0000-0001-8450-8183

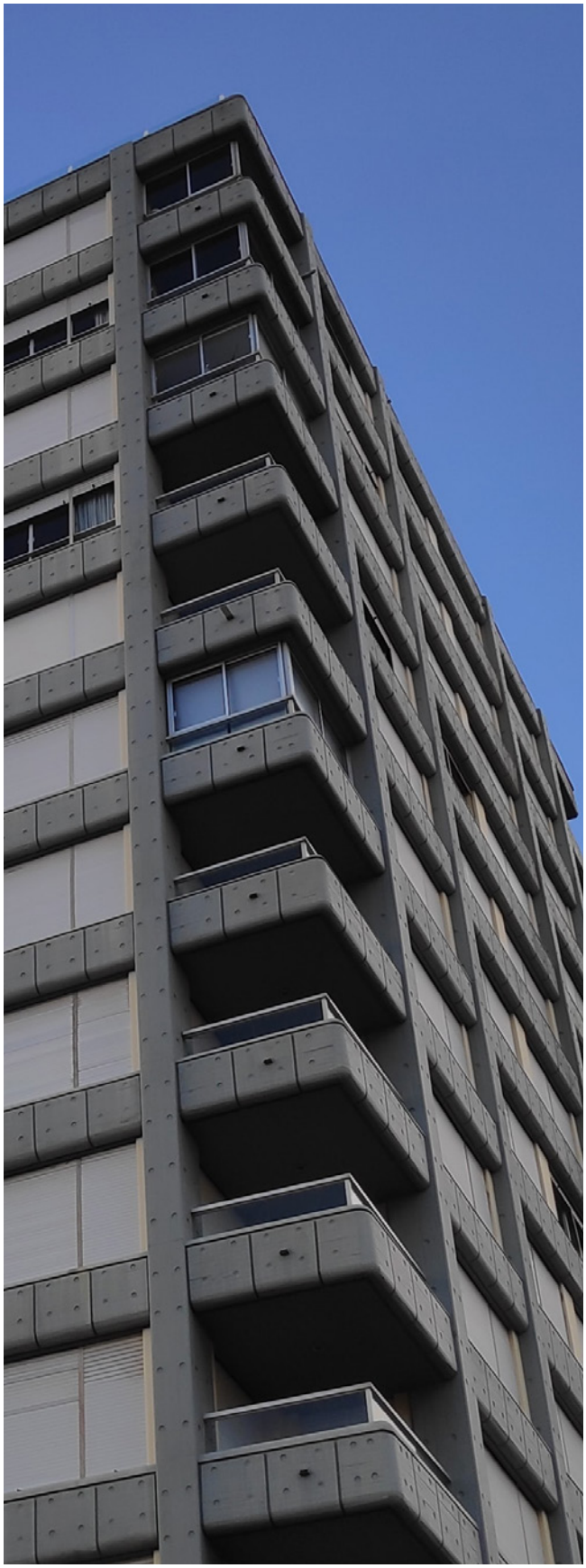


Foto de Anthony Rosa de Unsplash.

RESUMEN

Las infiltraciones de aire tienen un impacto significativo en el consumo de energía final de los edificios. Existen diversos métodos para caracterizar este fenómeno, en la norma ISO 9972:2015 se presenta uno de ellos. Si bien este método es ampliamente usado en Europa y Estados Unidos, existe escasa experiencia (documentada) del mismo en Uruguay y la región. En este trabajo se muestran los resultados de siete ensayos realizados en Uruguay de acuerdo al estándar mencionado. Dichos resultados se comparan con los resultados de otros países y a partir de esta comparación se muestra la importancia de continuar realizando ensayos en nuestro país, para lograr un mejor entendimiento del estado del parque edilicio nacional.

Palabras clave: Medio Ambiente, Eficiencia Energética, Infiltraciones de Aire, Hermeticidad, Envolvente de Edificios, Uruguay.

ABSTRACT

Air infiltrations have a significant impact on the final energy consumption of buildings. There are several methods to characterize this phenomenon, one of them is presented in ISO 9972:2015. Although this method is widely used in Europe and the United States, there is little (documented) experience of it in Uruguay and the region. This work shows the results of seven trials carried out in Uruguay according to the mentioned standard. These results are compared with the results of other countries and from this comparison it is shown the importance of continuing to carry out tests in our country, to achieve a better understanding of the state of the national building park.

Keywords: *Environment, Energy Efficiency, Air Infiltration, Air Tightness, Building Envelope, Uruguay.*

INTRODUCCIÓN

El sector edilicio es responsable del 30% del consumo final de energía mundial (IEA, 2016), y en Uruguay dicho sector representa aproximadamente 25% del consumo final de energía (MIEM, 2018). Gran parte de este consumo se debe a los sistemas de calefacción y refrigeración, lo cual depende de varios factores, entre ellos las infiltraciones de aire exterior.

La infiltración de aire en un edificio se define como el ingreso no deseado de aire exterior y normalmente se expresa en renovaciones por hora (rph) del volumen de aire interior del edificio. Dicha tasa depende de diversas variables: la velocidad y dirección del viento, la diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior, la tipología del edificio, el tipo de aberturas, la rugosidad del terreno, etc. Evidentemente, dada la variabilidad inherente de la velocidad del viento y la temperatura ambiente, la tasa de infiltración no es constante a lo largo del año. No obstante, por simplicidad, en la práctica se suele considerar una tasa constante (promedio anual) a los efectos de realizar balances térmicos sencillos, y o comparar la permeabilidad al aire de distintos edificios. En diversos estudios se ha podido constatar que las infiltraciones de aire son responsables de entre un 10% y un 30% de la demanda de refrigeración y calefacción (Targo, 2007; Feijó-Muñoz et al., 2019). Como se sabe, esas proporciones dependen de diversos factores y, en principio, el porcentaje 10% a 30% podría no ser aplicable a Uruguay. Pero para establecer una proporción adecuada, primero, dichas infiltraciones deben ser determinadas. A partir de lo expuesto anteriormente, se deduce la importancia de contar con métodos que permitan identificar y cuantificar las fuentes de infiltraciones en la envolvente de los edificios. En la norma ISO 9972:2015 (ISO, 2015) se presenta uno de ellos. Es importante aclarar que este método no mide directamente la tasa de infiltraciones de aire de un edificio, no obstante, en la referencia (ASHRAE, 2009) se propone un modelo para derivar dicha tasa partir de los resultados del ensayo.

La gran cantidad de ensayos realizados en países como Estados Unidos, Canadá, España, en países nórdicos de Europa y en Chile (Targo, 2007; Feijó-Muñoz et al., 2019; d'Ambrosio Alfano, Dell'Isola, Ficco, & Tassini, 2012; Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014) por citar algunos, muestra la aceptación que tiene este método en distintas partes del mundo. Sin embargo, a nivel nacional, no existen datos empíricos documentados de infiltraciones de aire en edificios. Por este motivo, cuando se requiere realizar un balance térmico a una edificación, se debe acudir a valores empíricos de otros países. Este hecho plantea la interrogante de si estos datos son representativos del parque edilicio nacional y, en definitiva, si son adecuados para tal propósito.

Por otra parte, es importante destacar que en Uruguay en los últimos años se ha comenzado a medir la permeabilidad al aire de ventanas en banco de ensayo fijo (Casañas, Pereira, Liston y Cataldo, 2016). Sin embargo, las aberturas constituyen sólo uno de los elementos de la envolvente de los edificios por donde puede infiltrarse el aire exterior. La incidencia de las aberturas en el total de infiltraciones se estudió en Chile (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014), y se estimó que está aproximadamente entre 22% y 43% para construcción pesada y, entre 8% y 18% para construcción liviana, en el sector residencial. El método que presenta la ISO 9972:2015 es una metodología complementaria que posee la ventaja de que la medida de infiltraciones de aire incluye todos los componentes en la envolvente de los edificios, y no sólo las aberturas. Por contrapartida, implica hacer mediciones en las edificaciones a estudiar y no en un laboratorio, con las dificultades que ello conlleva.

Es por todo ello que a través de este trabajo se busca obtener, como objetivo primario, datos empíricos de infiltraciones de aire en edificios en Uruguay: dichos datos son medidos de acuerdo al método que se describe en la norma ISO 9972:2015. En segundo lugar, se busca a través de la comparación con los datos presentados en publicaciones de otros países, responder a la interrogante antes planteada de si es adecuado usar datos empíricos de otros países, o por el contrario, es necesario invertir en continuar realizando medidas para lograr una mejor caracterización y comprensión del parque edilicio nacional. A la vez, a través de la comparación con estándares internacionales, se trata de inferir si es aceptable el nivel de permeabilidad al aire de los casos considerados. Por último, dada la falta de datos en esta materia a nivel regional, se busca difundir el método de ensayo. Por esta razón, a continuación, se pone un énfasis especial en la descripción del método y se explicita el alcance de éste, luego se presentan los casos de estudio, se analizan sus resultados y, por último, se comparan los mismos con los obtenidos en otros trabajos a nivel internacional.

MÉTODO DE ENSAYO

Fundamentos

En la norma ISO 9972:2015 la permeabilidad al aire del edificio se describe mediante la Ecuación:

$$q_{env} = C_{env}\,\Delta p^{n} \qquad \textbf{(1)}$$

en donde q_{env} (m^3/h) es el caudal de aire a través de la envolvente del edificio y Δp (Pa) es la diferencia de presiones entre el aire exterior e interior, C_{env} ($m^3/h.Pa^n$) se denomina coeficiente de caudal y n coeficiente de presión. El coeficiente de presión está asociado al tipo de flujo y normalmente se encuentra entre los valores n = 1/2 (turbulento) y n = 1 (laminar). La determinación de la permeabilidad al aire de un edificio se reduce a determinar los coeficientes de caudal y presión.

Dada la no linealidad de la Ecuación (1) resulta conveniente realizar el siguiente cambio de variable:

$$Y = \ln q_{env} \qquad \textbf{(2)}$$

$$X = \ln \Delta p \qquad \textbf{(3)}$$

Entonces la Ecuación (1) se puede rescribir:

$$Y = \ln C_{env} + nX \qquad \textbf{(4)}$$

Para determinar los coeficientes C_{env} y n se deben tomar diferentes medidas de q_{env} y Δp para luego realizar un ajuste lineal de la Ecuación (4). El cálculo de C_{env} y n y sus respectivas incertidumbres se realiza de acuerdo a anexo C de la norma ISO 9972:2015.

El coeficiente de caudal depende de la temperatura del aire durante el ensayo. Para independizarnos de esto se define el coeficiente de fuga de aire C_L, el cual se calcula corrigiendo el coeficiente de caudal C_{env} como se indica en las fórmulas (5) y (6), para despresurización y presurización respectivamente.

$$C_L \cong C_{env}\,(T_0 / T_e)^{1-n} \qquad \textbf{(5)}$$

$$C_L \cong C_{env}\,(T_0 / T_{int})^{1-n} \qquad \textbf{(6)}$$

en donde T_e y T_{int} son las temperatura exterior e interior durante el ensayo (expresadas en Kelvin) y T_0 la temperatura del aire en condiciones estándar (20 °C).

En Uruguay en los últimos años se ha comenzado a medir la permeabilidad al aire de ventanas en banco de ensayo fijo.

Definición de parámetros derivados a usar

Si bien la permeabilidad al aire de un edificio queda dada a través de los coeficientes de fuga y presión (C_L y n), estos no resultan prácticos a la hora establecer comparaciones entre distintos edificios. Por este motivo, se introducen las renovaciones hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pascales valor denominado n_{50}. Esta cantidad se utiliza como característica de la permeabilidad al aire de un edificio y es apta para establecer comparaciones. Las exigencias dispuestas en varios países son establecidas en función de este parámetro. Además, esta magnitud es independiente de la implantación del edificio, lo que permite comparar edificios situados en distintos lugares.

A partir del coeficiente de fuga C_L y del coeficiente de presión n, se calcula un caudal normalizado q_{50} (m^3/h):

$$q_{50} = C_L 50^n \quad \textbf{(7)}$$

el cual corresponde al caudal a través de la envolvente a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa. Al dividir dicho caudal por el volumen interior del edificio V(m^3) se obtiene el parámetro n_{50}:

$$n_{50} = q_{50} / V \quad \textbf{(8)}$$

Dicho parámetro representa las renovaciones por hora a una diferencia de presión exterior-interior de 50 Pa.

Por otra parte, es de interés conocer el caudal de infiltraciones de aire real *q* de un edificio debido a la diferencia de temperatura y la acción del viento en un momento dado. A partir de dicho valor se puede calcular la tasa de infiltraciones n_0 como *q/V.* El consumo de energía de los sistemas de calefacción y refrigeración debido a las infiltraciones de aire es proporcional a dicha tasa. En particular, es práctico conocer el promedio anual de n_0, el cual llamaremos $\overline{n_0}$. La norma ISO 9972:2015 no proporciona un método para su cálculo, pero existen varios modelos en la literatura, uno muy sencillo consiste en dividir n_{50} por veinte (d'Ambrosio Alfano et al., 2012; Feijó-Muñoz et al., 2019); es decir:

$$\overline{n_0} = n_{50} / 20 \quad \textbf{(9)}$$

Desafortunadamente, en los artículos fuente de la información no se señala el autor.

La ASRHAE (2019) provee de otro método, el cual está basado en el modelo físico de Sherman y Grimsrud (1980). Este modelo fue validado experimentalmente en la referencia (Sherman y Modera, 1986) y da una expresión para el caudal de infiltraciones q (m^3/h) que ingresa a un edificio por causa de la diferencia de temperatura ΔT (°C) entre el aire exterior y el interior, y la velocidad del viento v (m/s) a diez metros de altura:

$$q = \frac{A_L}{1000}\sqrt{C_S \mid \Delta T \mid + C_W v^2} \quad \textbf{(10)}$$

en donde A_L (cm^2) es el área efectiva de huecos a 4 Pa, C_S y C_W son coeficientes que dependen de la implantación y la altura del edificio. El área efectiva de huecos se calcula de la siguiente forma a partir de los resultados del ensayo:

$$A_L = \frac{10000}{3600} C_L \left(\frac{\rho_0}{2}\right)^{1/2} 4^{n-0,5} \quad \textbf{(11)}$$

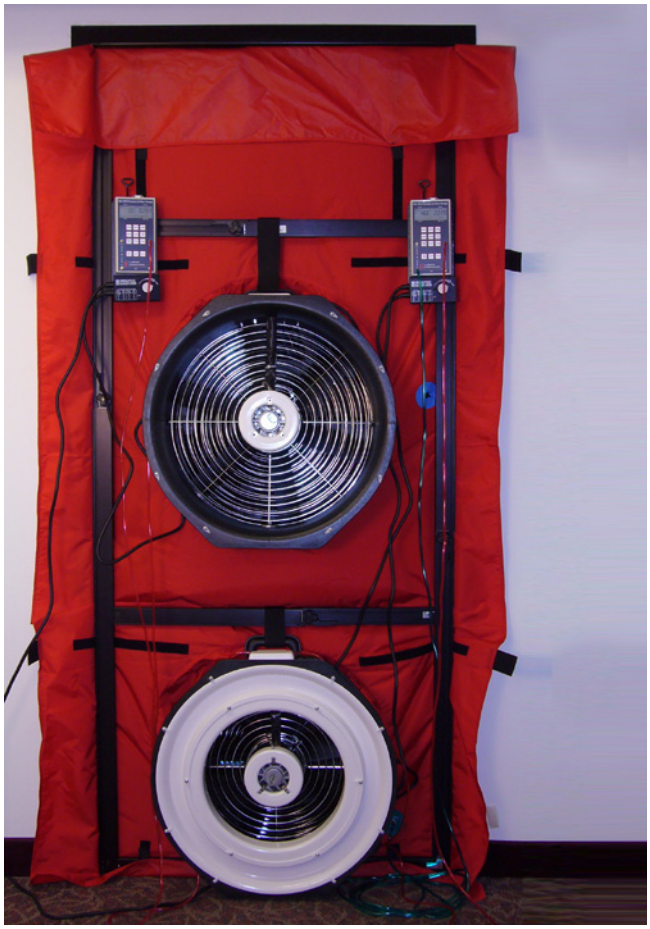
en donde ρ_0 (kg/m^3) es la densidad del aire en condiciones estándar. Con la Ecuación (10), y haciendo uso del año meteorológico típico del lugar en el que está implantado el edificio, se puede calcular el caudal de infiltración para cada momento del año. Luego, dicho caudal se puede dividir por el volumen interior del edificio para calcular n_0 y promediándolo a nivel anual se puede estimar la tasa $\overline{n_0}$. Este último método parece mucho más adecuado dado que tiene en cuenta las características del sitio en el cual está implantado el edificio.

Equipo Blower Door

Los ensayos que se describen en este trabajo se realizaron con un equipo *Blower Door* modelo *Minneapolis Blower Door System*: 2 *Fan System* de la empresa estadounidense *The Energy Conservatory*. El equipo fue adquirido nuevo en 2017 y los instrumentos de medidas fueron provistos con certificados de calibración. Los ensayos que se presentan en este trabajo fueron realizados entre fines de 2017 y 2019 por lo que dichas curvas de calibración fueron consideradas válidas.

La diferencia de presiones entre el exterior-interior del edificio se induce de forma mecánica con dos ventiladores en paralelo. Según como se instalen los ventiladores se puede inducir una sobrepresión o depresión en el edificio. El flujo a través de los ventiladores se puede regular de dos formas, con variadores de velocidad y/o reducciones en la entrada de los ventiladores las cuales generan una pérdida de presión adicional. El equipo cuenta con dos sensores de presión diferencial, uno por cada ventilador. Cada sensor de presión diferencial cuenta con dos canales (canal A y B), en uno de los canales se registra la diferencia de presión exterior-interior del edificio (canal A) y en el otro la diferencia de presión entre la succión e impulsión del ventilador (canal B). Con esta última medida (una por cada ventilador) y las curvas características de los ventiladores se infiere el caudal de aire que circula a través de la envolvente del edificio q_{env}. Dichas curvas son proporcionadas por el fabricante y dependen de la reducción que se utilice en cada caso. La incertidumbre de las medidas de presión es de un 1% según lo declarado por el fabricante. Todo el equipo antes mencionado se instala sobre un marco de aluminio y una manta de nylon en una puerta exterior como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Equipo Blower Door



Fuente: The Energy Conservatory

PROCEDIMIENTO

En la Figura 2 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento. La norma propone tres métodos de ensayo, la elección de qué método usar depende del propósito del ensayo: (1) ensayo del edificio en uso, (2) ensayo de la envolvente del edificio, y (3) ensayo del edificio para un propósito específico. En la Tabla 1 se brinda mayor detalle sobre cómo deben acondicionarse las aberturas del edificio durante el ensayo según el método escogido. En este trabajo todos los ensayos se realizaron de acuerdo el método 1.

Tabla 1. Condiciones de las aberturas durante el ensayo

Clasificación de las aberturas del edificio	Método 1	Método 2
Aberturas para ventilación natural	Cerradas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso continuo)	Selladas	Selladas
Aberturas para ventilación mecánica o aire acondicionado (uso intermitente)	Cerradas	Selladas
Ventanas y puertas exteriores	Cerradas	Cerradas
Aberturas no destinadas a la ventilación	Cerradas	Selladas

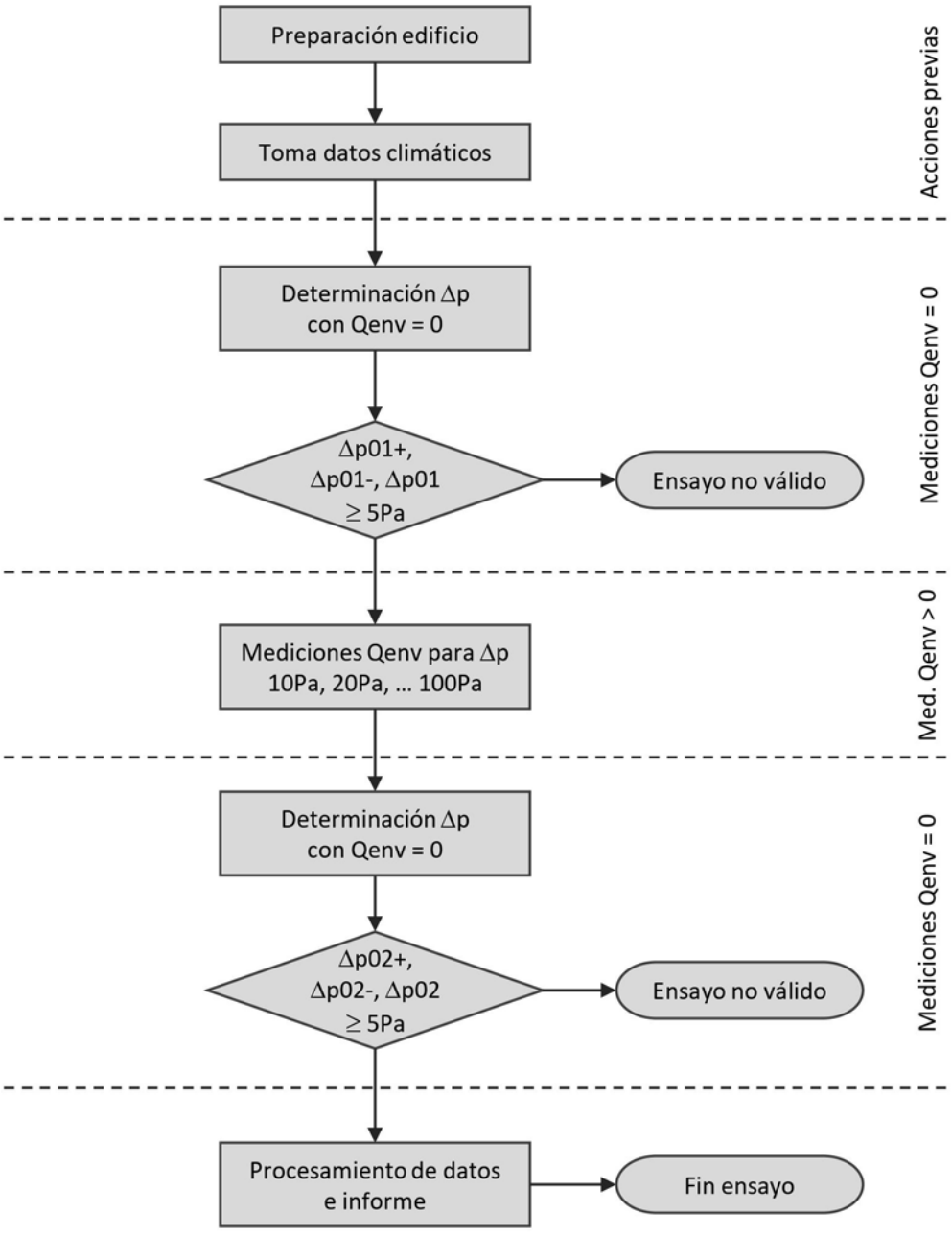
En primer lugar, se debe preparar el edificio según el método de ensayos escogido. Posteriormente, se hace un relevamiento de las condiciones climáticas: temperatura y velocidad del viento. Luego, se procede a determinar la diferencia de presión a caudal cero. Para este paso se deben apagar y tapar los ventiladores. Luego se debe registrar la diferencia de presión exterior-interior durante un periodo de al menos 30 segundos. El promedio de los valores positivos Δp_{01+}, el de los valores negativos Δp_{01-} y el de todos los valores Δp_{01} sobre este periodo no deben superar los 5 Pa, en caso contrario el ensayo se declara no válido. Para alcanzar una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (menor a 5 Pa) se recomienda que la velocidad del viento durante el ensayo no alcance 3 en la escala Beaufort y que la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio sea menor a 250 m.K.

Una vez determinada la diferencia de presión exterior-interior a flujo cero, se destapan y se encienden los ventiladores y se procede a medir diferentes caudales de aire a distintas diferencias de presión exterior-interior. Las medidas de diferencia de presión exterior-interior deben estar espaciadas 10 Pa máximo, el valor mínimo inicial debe ser de 10 Pa y el valor máximo debe ser de al menos 50 Pa, pero se recomienda extender el rango hasta 100\Pa. La norma recomienda realizar dos series de mediciones, una para presurización y otra para despresurización, sin embargo, se admite que se realice solo una serie de medidas.

Al final de estas series de medidas se debe determinar nuevamente la diferencia de presión a caudal cero. Y nuevamente, el promedio de los valores positivos Δp_{02+}, el de los valores negativos Δp_{02-} y el de todos los valores Δp_{02} sobre este periodo no deben superar los 5 Pa, en caso contrario el ensayo se declara no válido. Las medidas de presión en la Ecuación (1) son corregidas con la diferencia de presión a flujo cero, es decir, a todas las medidas de Δp se les resta el promedio entre Δp_{01} y Δp_{02}.

Finalmente, los datos son procesados de acuerdo a la sección 2 y son determinados: el coeficiente de fuga C_L, el coeficiente de presión *n*, las renovaciones horas a una diferencia de 50 Pa n_{50} y el promedio anual de la tasa de infiltraciones del edificio $\overline{n_0}$.

Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento



Fuente: Elaboración propia

CASOS DE ESTUDIO

Se ensayó un total de siete edificios con diversas características. En las Tablas 2 y 3 se presentan los casos de estudio ordenados en forma creciente por el año de construcción, y en ellas se resumen las principales características de los edificios, las cuales se describen en los párrafos siguientes.

Tabla 2. Características de los casos de estudio

Caso	Sector	Año de construcción	Volúmen (m^3)	Área de envolvente (m^2)	Área de piso (m^2)	Cantidad de plantas
1	Servicios	1964	318.2	271.4	103.4	1
2	Servicios	1968	436.0	292.2	184.4	2
3	Servicios	1972	335.4	301.5	112.2	1
4	Servicios	1975	265.6	313.0	99.3	1
5	Servicios	2015	238.6	227.5	88.4	1
6	Residencial	2018	83.0	59.4	34.6	1
7	Residencial	2019	120.6	138.2	51.0	1

Tabla 3. Características de los casos de estudio (continuación)

Caso	Altura planta sobre terreno (m)	Tipo de implantación	Ventanas exteriores		
			Área (m^2)	Apertura[1]	Material[2]
1	0.2	Rural	28.8	C, B	A, M
2	-2.6	Urbana	53.3	C, B	A, H, M, P
3	0.2	Rural	24.1	O, B	H, M
4	4.6	Rural	44.3	C, P	A
5	0.2	Rural	27.1	C, B	A, H
6	2.5	Urbana	9.3	C	A
7	18.2	Urbana	8.7	C	A

1 - C – Corrediza, B – Batiente, O – Oscilante, P – Proyectante
2 - A – Aluminio, H – Hierro, M – Madera, P – PVC

De acuerdo a sus funciones, los casos de estudio se dividen en dos grupos: servicios y residencial (colectivo). Los edificios 1 al 5 pertenecen al sector público, estando relacionados a funciones educativas los casos 1, 2 y 3. El edificio del caso 4 tiene como función principal los servicios, pero el módulo ensayado pertenece al grupo residencial, dado que es un edificio de uso mixto. El caso 5 es un edificio público destinado a la investigación científica. Dentro del grupo residencial, los casos 6 y 7 son unidades de edificios de apartamentos en altura.

Todos los edificios ensayados tienen en común el sistema constructivo tradicional pesado en mampostería de cerámica cocida, donde los casos 6 y 7 presentan además estructura independiente en hormigón armado. Las cubiertas son de hormigón armado en los casos 2, 4, 5, 6 y 7. Los casos 1 y 3 cuentan con cubierta de cerámica armada abovedada con directriz catenaria. Las aberturas del grupo de edificios más antiguos son de diversa materialidad, encontrándose de hierro, madera, aluminio y PVC. La forma de apertura más frecuente es corrediza para

ventanas y batiente para puertas, aunque en el caso 3 las ventanas principales cuentan con un sector oscilante y el resto de la abertura con vidrio fijo. En el caso 4 hay banderolas proyectantes en los servicios sanitarios. En la Tabla 3 se indica el material y la forma de apertura de las aberturas de cada caso. El caso 2 cuenta con una chimenea como parte del equipamiento de calefacción la cual no fue sellada durante el ensayo. El caso 5 tiene cañerías de salida de conductores eléctricos por su cubierta, necesarias para el equipamiento de medición ubicado sobre la misma. Estos elementos influyen en la hermeticidad de los edificios considerados. Los casos 1 y 3 tienen una particularidad importante: originalmente eran construcciones similares, pero posteriormente el caso 1 fue modificado reemplazando las ventanas por otras de diferente material y mejor calidad. Esto permitió comparar dos edificios esencialmente iguales, casos 1 y 3, con aberturas de distinta calidad.

Para el caso 4 se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización. Para el resto de los casos, las series de medidas fueron siempre de despresurización.

En todos los casos la velocidad del viento durante el ensayo fue menor a 3 en la escala Beaufort. Además, en todos ellos la diferencia de temperatura exterior-interior multiplicada por la altura del edificio fue menor a 250 K.m, a excepción del caso 6 donde no se midió temperatura. Sin embargo, en todos los casos se logró una diferencia de presión exterior-interior a caudal cero aceptable (< 5 Pa).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para comparar los resultados entre sí y a su vez también con los resultados de otras publicaciones, se determinó el valor de n_{50} para cada caso. Los resultados se exponen en la Tabla 4 y se presentan de forma gráfica en la Figura 3 solo los de despresurización.

Tabla 4. Resultados

Caso	Método[1]	r^2	C_L ($m^3/(h.Pa^n)$)	n	n_{50} (h^{-1})	$\overline{n_0}$ (h^{-1})	$n_{50} / \overline{n_0}$
1	D	0.996	67.8 ± 5	0.774 ± 0.013	4.3	0.18	24.1
2	D	0.999	1562 ± 56	0.577 ± 0.007	31.9	1.57	20.3
3	D	0.995	109 ± 11	0.830 ± 0.018	8.5	0.30	28.3
4	D	0.992	594 ± 75	0.564 ± 0.023	18.6	1.08	17.2
4	P	0.998	450 ± 31	0.649 ± 0.013	19.7	1.27	15.5
5	D	0.999	101.8 ± 2.8	0.613 ± 0.005	4.7	0.25	18.8
6	D	0.999	52.0 ± 3.9	0.541 ± 0.013	5.2	0.33	15.8
7	D	0.985	20.3 ± 2.7	0.775 ± 0.026	3.5	0.12	29.2

1 - D – Despresurización, P – Presurización

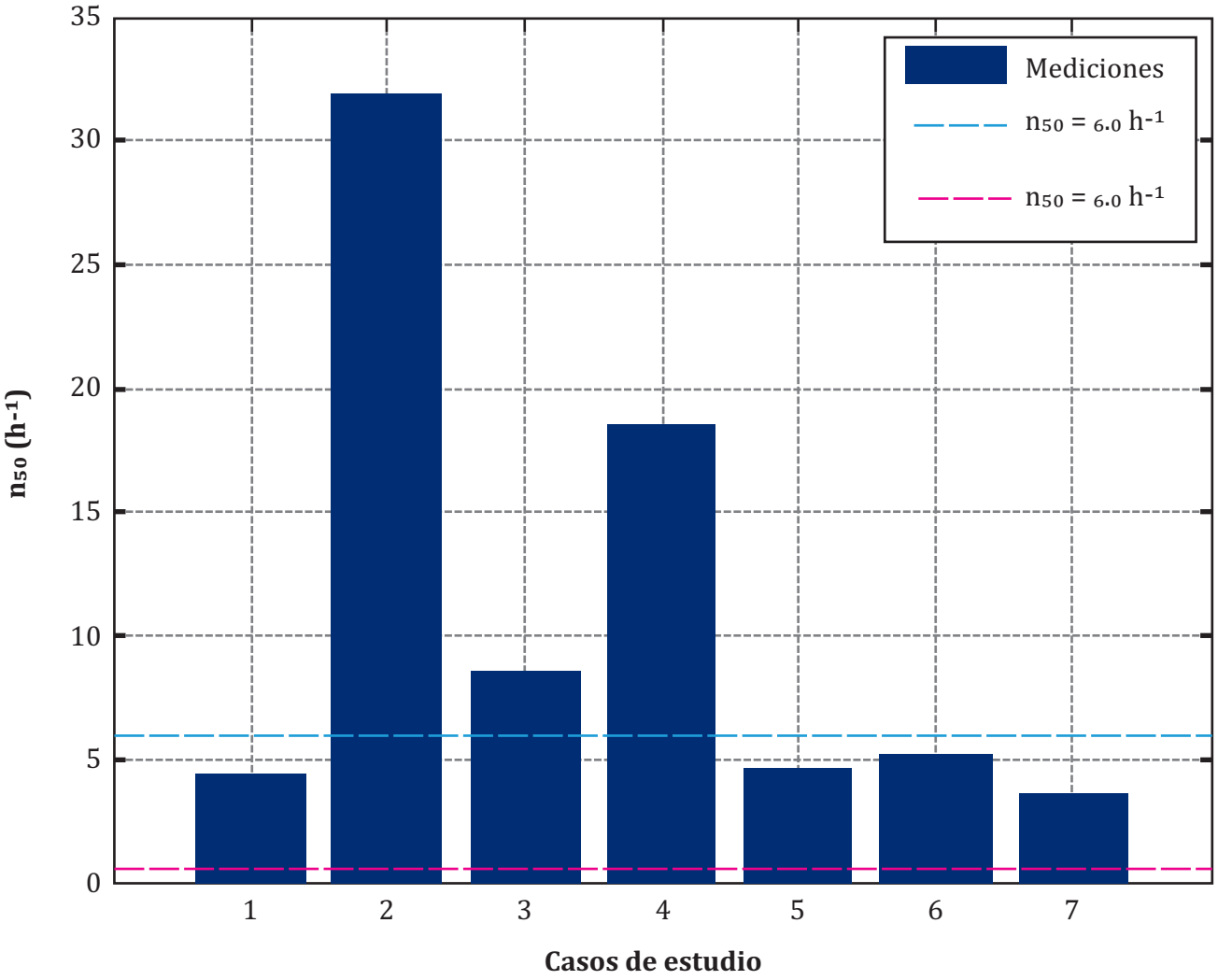
En la Tabla 4 se muestra además el coeficiente de fuga de aire C_L, el coeficiente de presión *n* y el coeficiente de correlación r^2. El coeficiente de correlación fue mayor a 0.99 en todos los casos excepto en el 7. El coeficiente de presión *n* varía entre 0.541 y 0.830 y el de fuga de aire entre 20.3 y 1,562 $m^3/(h.Pa^n)$. El error relativo promedio del coeficiente de presión es del 2% y del de fuga de aire 8%. El promedio general de n_{50} (tomando en cuenta para el caso 4 solo el

valor de despresurización) fue de 11.0 h^{-1} con una gran variabilidad, que se traduce en una alta desviación estándar, la cual es de 10.6 h^{-1}.

En el caso 4, como fue mencionado anteriormente, se realizó una serie de medidas de despresurización y otra de presurización. Como se puede ver en la Tabla 4 los resultados de ambos ensayos son muy parecidos, difiriendo menos de un 6%, lo cual coincide con lo visto en otras publicaciones (Targo, 2007) y valida lo sugerido por la norma de realizar únicamente una serie de medidas (presurización o despresurización).

Resulta interesante notar que, como se dijo antes, los casos 1 y 3 consisten en edificios esencialmente iguales, pero con aberturas de diferente calidad. Se puede ver en la Tabla 4 que a través del cambio de aberturas en este caso se logra una mejora de casi el 50% en el valor de n_{50}.

Figura 3. Valores de n_{50} para los casos de estudio y niveles de referencia internacional



Fuente: Elaboración propia

Para concluir si la permeabilidad al aire de los casos considerados es aceptable, es necesario fijar una referencia, es decir, fijar un nivel de n_{50} por debajo del cual la permeabilidad al aire de un edificio se considera aceptable. A nivel nacional no existe una normativa al respecto, es por ello que se acudió a estándares internacionales, concretamente se consideraron dos niveles de referencia distintos. Dichos niveles de referencia se graficaron junto a las medidas en la Figura 3. El primero corresponde al Código Técnico de la Edificación de España (Ministerio de Fomento, 2019) se establece que las construcciones nuevas con compacidades menores a 2 (razón entre volumen interior y área de envolvente) deben poseer un valor de n_{50} menor a 6 h^{-1}. Todos los casos de estudio en este trabajo presentan una compacidad menor a 2, lo cual se puede deducir a partir de los datos de la Tabla 2. En la Figura 2 se puede ver que los casos 1, 5, 6 y 7 satisfacen la exigencia española, mientras que los casos 2, 3 y 4 no lo hacen. Vale destacar que los casos 5, 6 y 7 son de reciente construcción, y el caso 1 corresponde a un edificio antiguo pero reacondicionado. El promedio de estos (1, 5, 6 y 7) fue de 4.4 h^{-1} con una desviación estándar de 0.72 h^{-1}, y el promedio de los edificios de construcción antigua sin reacondicionar fue de 19.7 h^{-1} con una desviación estándar de 11.7 h^{-1}. Los resultados de este último grupo presentan una mayor variabilidad. Además, se destaca que el promedio de los edificios de construcción antigua sin reacondicionar más que cuadriplica el promedio de los de construcción reciente y antiguo reacondicionado. Se puede concluir que a la hora de presentar los resultados es importante discriminar no solo por la antigüedad de la construcción, sino también tomar en cuenta si el edificio fue reacondicionado o no.

El segundo estándar utilizado es el *Passivhaus* (Passive House, s.f.) el cual considera aceptable un valor de n_{50} por debajo de 0.6 h^{-1}. Se eligió este estándar debido a que es muy conocido a nivel internacional. En nuestro estudio, ninguno de los casos considerados cumple con dicho estándar. Sin embargo, si bien es un estándar ampliamente utilizado en países nórdicos con climas fríos, al ser el mismo mucho más restrictivo, su utilización en climas templados como el de Uruguay no parece apropiada.

Por otra parte, utilizando el modelo de Sherman (1980) y el año meteorológico típico de la ciudad de Salto (Alonso-Suárez, Bidegain, Abal, G. y Modernell, 2019), para cada uno de los casos se calculó la tasa de infiltración promedio anual $\overline{n_0}$, para lo cual se utilizó una temperatura interior constante de 24 °C. Los resultados se presentan en la Tabla 4. El valor promedio general de $\overline{n_0}$ fue de 0.55 h^{-1}, el de los edificios de construcción nueva más el caso reacondicionado 0.22 h^{-1}, y el de construcción antigua sin reacondicionar 0.98 h^{-1}, el cual es más del cuádruple que el primero. El promedio de los cocientes entre n_{50} y $\overline{n_0}$ fue de 22.0, mayor que el valor dado por el método empírico de la Ecuación (9). El valor mínimo de este cociente fue de 15.5 y el máximo de 29.2: la variabilidad de este cociente se debe a las diferencias en la implantación de los edificios y la altura de estos. Esta variabilidad muestra que el método de cálculo de $\overline{n_0}$ dado por la Ecuación (9) no es recomendable.

A nivel nacional no existe una normativa al respecto, es por ello que se acudió a estándares internacionales, concretamente se consideraron dos niveles de referencia distintos.

En la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de la República, se sugieren para cálculos de diseño, valores de $\overline{n_0}$ entre 0.5 h^{-1} y 1.5 h^{-1} (Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2002). Se desconoce el origen de este criterio, pero se cree que están basados en datos empíricos de la década de los 80' y 90' aportados por CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*). Al comparar este criterio con los resultados de este trabajo, parecería que el criterio es apropiado para edificios antiguos no reacondicionados, pero no para edificios nuevos o antiguos reacondicionados.

COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE OTRAS PUBLICACIONES

En la introducción se plantea la interrogante de si es apropiado utilizar datos empíricos de otros países para estudios en Uruguay. En esta sección se comparan los resultados de este trabajo con los resultados de cuatro publicaciones diferentes. Procurando establecer una comparativa razonable, se buscan estudios cuya muestra bajo análisis sea similar a la analizada en el presente trabajo. Por este motivo, los edificios considerados en todos los trabajos de referencia son de mampostería y exhiben, por razones climáticas, de cercanía o influencia cultural, características arquitectónicas similares. Estos trabajos se describen brevemente a continuación.

El primer trabajo analizado (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío, 2014) se ubica en Chile. En el mismo se presentan los resultados de 216 ensayos realizados sobre edificios del sector residencial y del sector de servicios construidos en 2007 y en 2010. Los resultados se agrupan de acuerdo a la materialidad de los muros, observándose para mampostería de ladrillo un valor medio de n_{50} de 11.8 h^{-1} con una desviación estándar de 3.6 h^{-1} para el sector residencial. Los trabajos restantes se ubican en el área del mar Mediterráneo. Feijó-Muñoz et al. (2019) presenta los resultados de 225 ensayos realizados en España sobre edificios residenciales construidos entre 1890 y 2015. El promedio general de los resultados es de 8.43 h^{-1} y no se reporta desviación estándar. En Italia, d'Ambrioso Alfano et al. (2012) mide la permeabilidad al aire de 20 edificios residenciales construidos entre 1810 y 2010. Los resultados presentan un promedio general de 7.4 h^{-1} y una desviación estándar de 2.4 h^{-1}. Por último, en Portugal, Ramos et al. (2015) mide la permeabilidad al aire de 25 edificios con edades de construcción de entre 90 y 10 años. El promedio de los resultados es 8.9 h^{-1} y la desviación estándar 3.2 h^{-1}. Todos los datos antes mencionados se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos encontrados en otras publicaciones

País	Autor	# de casos	n_{50} (h^{-1})	
			Promedio	Desv. Est.
Uruguay	Trabajo actual	7	11.0	10.6
Chile	CITCUBB[1] (2014)	216	11.8	3.6
España	Feijó-Muñoz et al. (2019)	225	8.5	-
Italia	d'Ambrioso et al. (2012)	20	7.4	2.4
Portugal	Ramos et al. (2015)	25	8.9	3.2

1 - Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío

Al comparar los datos que aquí se presentan, se puede observar que los resultados de los trabajos de los países mediterráneos son bastante similares entre sí. Si bien los tres trabajos evalúan edificios en cada país de diferentes antigüedades, las desviaciones estándar de los promedios presentados son relativamente bajas, mostrando una cierta homogeneidad, lo cual habla del buen estado de conservación y mantenimiento de los edificios evaluados. Por otro lado, el trabajo chileno, si bien es sobre una amplia muestra de edificaciones relativamente nuevas, muestra un promedio del orden de un 50% mayor que el de las edificaciones europeas acá presentadas. Respecto a las medidas realizadas en el presente trabajo, una primera mirada muestra una similitud entre el promedio de ellas y el promedio del trabajo chileno. Sin embargo, la alta desviación estándar de nuestros resultados muestra que hay una alta diversidad de resultados entre sí. Por un lado, están los edificios antiguos sin reacondicionados, con un promedio de n_{50} de 19.7 h^{-1} y desviación estándar de 11.7 h^{-1} y, por otro, los edificios nuevos y/o reacondicionados, con un promedio de 4.4 h^{-1} y desviación estándar de 0.7 h^{-1}. Por ende, los resultados acá medidos muestran una gran diferencia tanto con los resultados de Chile para nuevas construcciones como con los resultados europeos. Se observa entonces que utilizar valores empíricos de infiltraciones de otros países, a la hora de modelar construcciones locales, conlleva a un error. Por lo tanto, será necesario continuar midiendo las infiltraciones de edificaciones en Uruguay, ya sean nuevas, antiguas o recicladas, en cantidad suficiente como para tener valores medios característicos que puedan ser usados de referencia.

CONCLUSIONES

Se determinó con éxito la permeabilidad al aire de siete edificios en Uruguay de acuerdo al estándar ISO 9972:2015. Se hallaron los coeficientes C_L y n con un muy buen nivel de incertidumbre (error relativo de 8%). El coeficiente de correlación en 6 casos fue mayor a 0.99. Se deduce que el modelo teórico dado por la Ecuación (1) ajusta muy bien los datos experimentales y que la metodología ha sido correctamente implementada. A esto último, se suma el hecho de que se utilizaron instrumentos calibrados y que se siguió un método estandarizado.

El valor promedio de n_{50} de los casos estudiados fue de 11.0 h^{-1} con una desviación estándar de 10.6 h^{-1} Al comparar los resultados con la exigencia del Código Técnico de la Edificación de España ($n_{50} < 6$ h^{-1}) se encontró que los edificios nuevos y/o reacondicionados satisfacen dicha exigencia en tanto que, los antiguos sin reacondicionar, no lo hacen. Además, el valor de n_{50} de los edificios del primer grupo casi cuadriplica el valor del primer grupo.

Partiendo del modelo de Sherman (1980) se pudo calcular la tasa de infiltraciones promedio anual $\overline{n_0}$, el valor el valor promedio general de $\overline{n_0}$ fue de 0.55 h^{-1}, el de los edificios de construcción nueva más el caso reacondicionado 0.22 h^{-1}, y el de construcción antigua sin reacondicionar 0.98 h^{-1}, el cual es más del cuádruple que el primero. La comparación de estos resultados con el criterio utilizado en FADU deja en evidencia que este criterio debe ser revisado y actualizado, fundamentalmente para los edificios de reciente construcción.

Finalmente, al comparar los valores de n_{50} obtenidos con los resultados de otras publicaciones, se encuentran diferencias importantes en los promedios y en la variabilidad de los resultados (desviación estándar). A partir de esto, y de lo expuesto en el párrafo anterior, se concluye que es importante que se sigan realizando ensayos en Uruguay que permitan tener valores más acordes al momento de modelar térmicamente los edificios locales. A futuro, sería deseable ensayar una cantidad significativa de edificios, con diversas características, como para inferir conclusiones más generales de la situación actual del parque edilicio nacional. Ello podría servir como insumo para diseñar normativas adecuadas a nuestro país con el objetivo de limitar el consumo de energía de los edificios.

REFERENCIAS

Alonso-Suárez, R., Bidegain, M., Abal, G. y Modernell, P. (2019). *Año Meteorológico Típico para aplicaciones de Energía Solar (AMTUes): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay*. Montevideo, Uruguay: Ediciones Universitarias (UCUR) de la Universidad de la República (Udelar).

ASHRAE. (2009). *2009 ASHRAE Handbook Fundamentals.* Atlanta.

Casañas, V., Pereira, L., Liston, M. y Cataldo, J. (2016). Caracterización y valoración energética de infiltraciones por aberturas en el parque habitacional uruguayo. *XXXIX Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente, 4*, págs. 07.11-07.18. Argentina.

Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción de la Universidad del Bío-Bío. (2014). *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Obtenido de http://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual_de_hermeticidad_al_aire_de_edificaciones.pdf

d'Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M., Ficco, G. and Tassini, F. (2012). Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressuritation method. *Building and Environment, 53*, 16-25.

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. (2002). AT02 Repartido. Cátedra de Acondicionamiento Térmico. Montevideo, Uruguay. Obtenido de http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-termico/files/2012/02/repartido-02.pdf

Feijó-Muñoz, J., González-Lezcano, R. A., Poza-Casado, I., Padilla-Marcos, M. Á. and Meiss, A. (2019). Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain. *Building and Environment, 148*, 299-308.

Feijó-Muñoz, J., Pardal, C., Echarri, V., Fernandéz-Agüera, J., Assiego de Larriva, R., Montesdeoca Calderín, M., . . . Meiss, A. (2019). Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary inslans. *Energy & Buildings*, 226-238.

IEA. (2016). F*inal Energy Consumption in the World*. Obtenido de https://www.iea.org/Sankey/#?c=World&s=Final%20consumption

ISO. (2015). ISO 9972. T*hermal performance of buildings – determination of the air permeability of buildings – fan pressurization method*. Geneva, Switzerland.

MIEM. (2018). *Balance Energético Nacional de Uruguay*. Obtenido de https://ben.miem.gub.uy/index.html

Ministerio de Fomento. (2019). *Código Técnico de la Edificación de España*. Obtenido de https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf

Passive House. (s.f.). *Passive House Institute*. Obtenido de https://passivehouse.com/

Ramos, N. M., Almeida, R. M., Curado, A., Pereira, P. F., Manuel, S., and Maia, J. (2015). Airtghtness and ventilation in mild climate counrty rehabilitated social housing buildings - What users want and what they get. *Building and Environment* (92), 97-110.

Sherman, M.H. and Modera, M.P. (1986). *Comparation of Measured and Predicted infiltration Using the LBL Infiltration Model*. Measured Air Leakage of Buildings, ASTM STP 904, H.R. Trechsel and P.L Lagus, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelpphia, 325-347.

Sherman, M.H., Grimsrud, D.T. (1980). *Infiltration-presurization correlation: Simplify physical modeling*. ASHRAE Transactions, 86(2), 778

Targo, K. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweigth single-family datached houses in Estonia. *Building and Environment, 42*, 2369-2377.

DESARROLLO DE NUEVOS CATALIZADORES BASADOS EN NÍQUEL PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL SINTÉTICO A PARTIR DE LA HIDROGENACIÓN DE CO_2

DEVELOPMENT OF NEW NICKEL-BASED CATALYSTS FOR SYNTHETIC NATURAL GAS PRODUCTION FROM CO_2 HYDROGENATION

Santiago German Veiga Bacci [1], Juan Bussi [2]

Recibido: 05/03/2020 y Aceptado: 21/09/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (92 - 107)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto del banco de imágenes de OLADE.

1 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Química. Uruguay.
sveiga@fq.edu.uy
http://orcid.org/0000-0002-3269-4292

2 Universidad de la República (UDELAR). Facultad de Química. Uruguay.
jbussi@fq.edu.uy
http://orcid.org/0000-0002-7305-411X

RESUMEN

La hidrogenación de CO_2 puro fue estudiada, para la producción de CH_4 (gas natural sintético), sobre catalizadores NiLaMe (Me = Ce, Ti, Zr). Los catalizadores fueron sintetizados por el método del precursor polimérico modificado y caracterizados mediante diferentes técnicas fisicoquímicas. En todos los casos, los catalizadores reducidos están compuestos por Ni (12% p/p) y un óxido mixto de estequiometría definida. El catalizador NiLaZr que presenta mayor dispersión de la fase activa, y una mayor concentración de los sitios básicos superficiales conduce a una mayor conversión de CO_2 y mayor selectividad a CH_4. Este catalizador presenta buena estabilidad y selectividad a CH_4 durante 100 horas de reacción a 400 °C. Este mismo catalizador fue evaluado en la hidrogenación directa de un biogás modelo demostrando poseer buenas propiedades catalíticas para transformar de manera eficiente el CO_2 en CH_4 y, de esa forma, aumentar su contenido energético para varias aplicaciones.

Palabras clave: Hidrogenación, Dióxido de Carbono, CO_2, Biogás, Gas Natural Sintético, Catalizadores de Níquel.

ABSTRACT

The hydrogenation of pure CO_2 was studied to produce CH_4 (synthetic natural gas), on NiLaMe catalysts (Me = Ce, Ti, Zr). The catalysts were synthesized by the modified polymer precursor method and characterized by different physicochemical techniques. In all cases, the reduced catalysts are composed of Ni (12% w/w) and a mixed oxide of defined stoichiometry. The NiLaZr catalyst that exhibits higher dispersion of the active phase, and a higher concentration of the basic surface sites leads to a higher conversion of CO_2 and greater selectivity to CH_4. This catalyst exhibits good stability and selectivity for 100 hours at 400 °C and then also evaluated in the direct hydrogenation of a model biogas demonstrating to have good catalytic properties to efficiently transform CO_2 into CH_4 and thereby to increase its heating value in several applications.

Keywords: *Hydrogenation, Carbon Dioxide, CO_2, Biogas, Synthetic Natural Gas, Nickel Catalysts.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) siguen representando un elevado porcentaje de las energías primarias fundamentales para nuestra economía. Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) procedentes de su combustión son una de las principales causas del incremento del efecto invernadero y, en consecuencia, del calentamiento global. Por ello, el control de las emisiones de este gas se ha convertido en un desafío global (Milani et al., 2015). Diversas estrategias se han propuesto, basadas principalmente en el aumento de la eficiencia energética de los procesos industriales que generan estas emisiones o el cambio a fuentes de energía no fósiles (renovables, nuclear, etc.). A pesar de esto, el cambio total hacia otras fuentes de energía menos contaminantes requerirá enormes inversiones y también un largo período de transición durante el cual seguirán aumentando las emisiones de CO_2. Otra estrategia, actualmente en estudio, consiste en la captura, almacenamiento y posterior transformación en productos de interés (Iaquaniello et al., 2018). En tal sentido, diferentes trabajos proponen a la hidrogenación de CO_2 como la mejor manera de almacenar y transportar energía. En efecto, en determinadas condiciones, el metano (CH_4) (componente mayoritario del gas natural) es el principal producto de la hidrogenación, por lo que su almacenamiento, transporte y uso puede realizarse con la tecnología ya existente para el gas natural.

El gas natural es considerado una fuente limpia de energía en comparación con otros combustibles fósiles debido a las menores emisiones de CO_2 (Spivey y Hutchings, 2014). Por esto, se considera una de las soluciones más limpias para impulsar la industria del transporte y para combinarse con recursos renovables para suministrar electricidad en horas de alta demanda energética. Por todo esto la demanda de gas natural ha aumentado considerablemente en las últimas décadas (Odumugbo, 2010) y se espera que continúe de la misma forma en los años siguientes.

En el mismo sentido, el gas natural sintético (GNS) que puede obtenerse a partir de la hidrogenación de CO_2 tiene la ventaja de que puede inyectarse directamente en la red de gas natural existente y utilizarse, como tal o para la producción de electricidad y productos químicos (Janke et al., 2014). Si además se tiene en cuenta que el hidrógeno (H_2) necesario puede ser producido en forma renovable mediante la utilización de energía solar o eólica, la hidrogenación de CO_2 y posterior uso del CH_4 como combustible, como puede verse en la Figura 1, configura un ciclo cuyo resultado neto es la conversión de fuentes renovables de energía sin contribuir al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero. Muchos países de la Unión Europea, Japón y China han comenzado la producción de GNS para evitar los impactos ambientales derivados del consumo de carbón (Hussain et al., 2020). En comparación con el hidrógeno, el GNS se puede almacenar y distribuir sin gastos adicionales debido a la infraestructura existente para el gas natural, incluidas las instalaciones de almacenamiento, estaciones de servicio y red de tuberías.

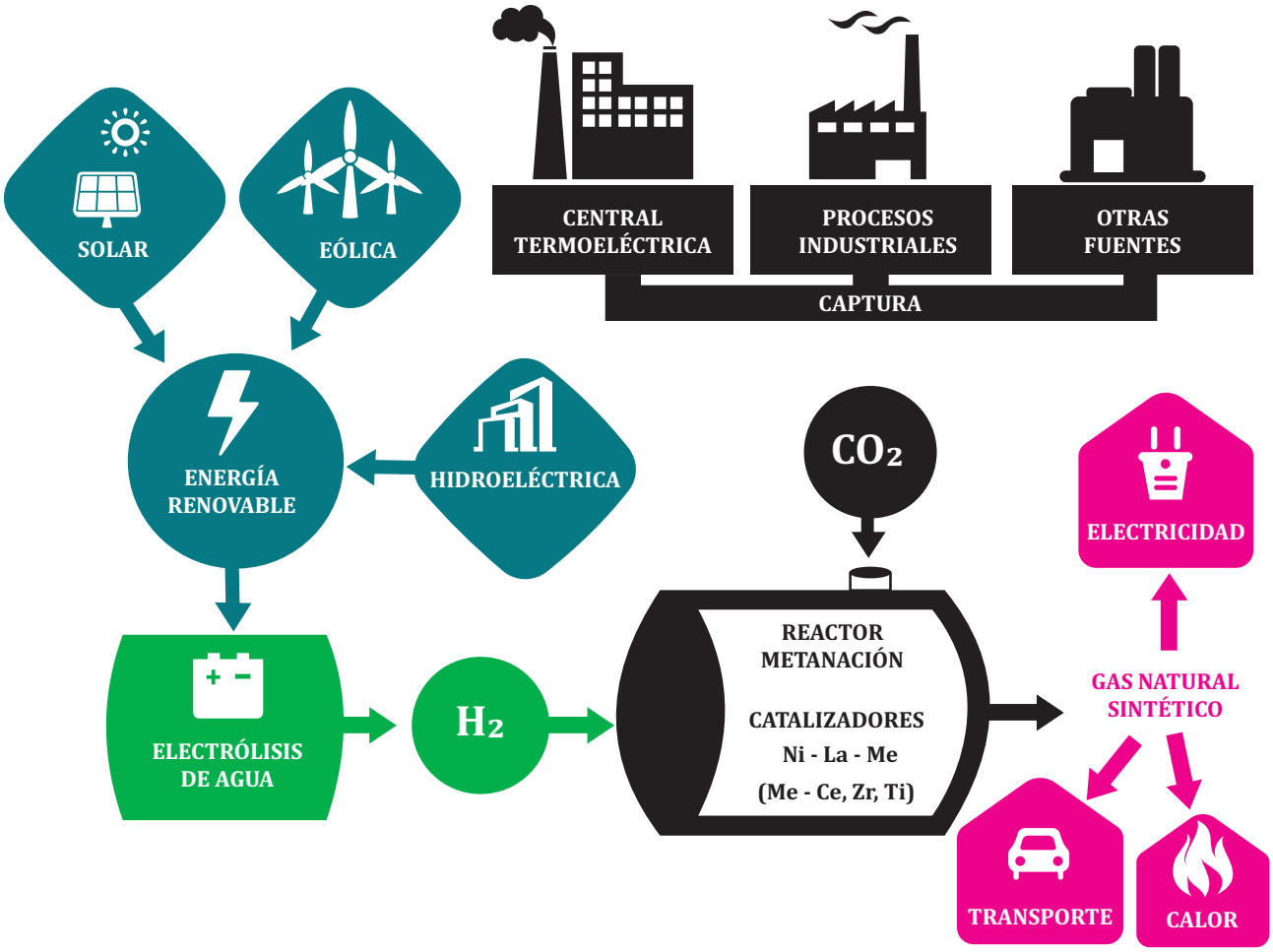
La obtención de CH_4 transcurre mediante la reacción de Sabatier (Ecuación 1) que es altamente exotérmica por lo que se encuentra favorecida termodinámicamente a temperaturas bajas y presiones elevadas, en donde H_2 y CO_2 reaccionan para formar CH_4 y H_2O. Esta reacción viene acompañada por la reacción de desplazamiento de agua reversa (RDAR) (Ecuación 2) en donde se obtiene monóxido de carbono (CO) como producto.

$$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrows CH_4 + H_2O \qquad \Delta H_{298\,K} = -165\ kJ\ mol^{-1} \qquad \textbf{(1)}$$

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrows CO + H_2O \qquad \Delta H_{298\,K} = 42\ kJ\ mol^{-1} \qquad \textbf{(2)}$$

Para la reacción de Sabatier puede utilizarse CO_2 recuperado de diferentes procesos industriales (Ashok et al., 2017), aunque también se está investigando esta reacción como una alternativa para la valorización de biogás (Witte et al., 2019).

Figura 1. Hidrogenación de CO_2 para la producción de gas natural sintético



Fuente: Elaboración propia

Este biocombustible disponible en Uruguay y en la región, se obtiene a través de la degradación anaerobia de materiales orgánicos y está compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 con algunos componentes minoritarios (H_2S, NH_3, siloxanos, etc.). Su uso directo incluye la generación de electricidad por combustión (Cipiti et al., 2016). Sin embargo, el uso directo del biogás tiene dos inconvenientes principales debido al contenido relativamente alto de CO_2 (40-60%) que disminuye su poder calorífico y la generación de mayores emisiones de CO_2 a la atmósfera.

Por lo anterior, la hidrogenación de esta fracción de CO_2 presente en el biogás es una opción atractiva para su valorización. Para ello se podría utilizar el CO_2 que se obtuvo en etapas previas de separación o realizar la hidrogenación directa del biogás. En este último caso se eliminaría la necesidad de retirar el CO_2 que normalmente se realiza mediante la absorción con aminas consumiendo una gran cantidad de energía.

Sin embargo, existen importantes limitaciones cinéticas que dificultan la hidrogenación directa de CO_2 a CH_4, por lo que es necesario utilizar catalizadores que presenten elevada actividad y selectividad a CH_4 (Pastor-Pérez et al., 2018).

En los últimos años, se han publicado una gran cantidad de trabajos (Gödde et al., 2021; Zhou et al., 2016; Zhang et al., 2020) con el objetivo de desarrollar un catalizador que presente una elevada estabilidad térmica con una alta conversión de CO_2 y elevada selectividad a CH_4.

Los catalizadores de níquel son los más investigados para aplicaciones en procesos de hidrogenación a escala industrial debido a su elevada actividad y relativo bajo costo. Sin embargo, el catalizador convencional Ni/Al_2O_3 sufre desactivación incluso a temperaturas de reacción bajas debido principalmente a la sinterización de partículas de Ni y la deposición de carbón (Falbo et al., 2017). Además de la fase activa, la elección de un soporte adecuado es fundamental para obtener una importante actividad catalítica y estabilidad. Los soportes más reportados son Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, La_2O_3, CeO_2 y ZrO_2. Para resolver los problemas asociados a los fenómenos de desactivación se vienen estudiando nuevos catalizadores preparados a partir de óxidos mixtos tipo perovskita o pirocloro que han demostrado tener buena actividad y elevada estabilidad térmica (Sekine et al., 2013). Algunos de estos óxidos son utilizados por esta última propiedad como recubrimiento de barrera térmica en turbinas de gas (Ramachandran et al., 2013).

En un trabajo anterior se ha sintetizado una serie de catalizadores conteniendo 12% de níquel que se encuentra disperso sobre un óxido de lantano-cerio y lantano-zirconio que fueron evaluados en el reformado con vapor de glicerina cruda para la producción de hidrógeno (Veiga et al., 2020).

El objetivo del presente trabajo es sumar a los catalizadores antes mencionados uno en el cual el soporte esté constituido por lantano-titanio y evaluar estos catalizadores en la hidrogenación de CO_2 puro y en la hidrogenación de un biogás modelo para la producción de CH_4 (GNS). En forma adicional, con fines comparativos, se prepararon y evaluaron los catalizadores Ni/Al_2O_3 y Rh/Al_2O_3 que están ampliamente documentados en la literatura existente. (Swalus et al., 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de catalizadores

La síntesis de los catalizadores se realizó mediante el método del precursor polimérico modificado que es una variación del método de Pechini (Gaura et al., 2011). En este se polimeriza una solución de etilenglicol (E), ácido cítrico (AC) y los precursores metálicos. Las sales precursoras utilizadas fueron $Ni(NO_3)_2.5H_2O$, $La(NO_3)_3.6H_2O$, $Ce(NO_3)_3.6H_2O$, $Zr(OiPro)_4$ 70% en isopropanol y $Ti(OCH_2CH_2CH_3)_4$. La relación molar E:AC utilizada fue 4:1 y la relación molar de los metales para los cinco catalizadores preparados fue: La:Ce=1:1, La:Ti=1:1, La:Zr=1:1. En todos los casos el contenido de níquel fue 12% en peso. La mezcla resultante se agita por 1 hora a 70 °C. Luego se calienta hasta 130 °C para favorecer la polimerización y remover el exceso de solvente. La resina resultante se pre-calcina a 300 °C por 2 horas para posteriormente calcinar el sólido resultante a 850 °C (temperatura necesaria para obtener el sistema bifásico NiO-$La_2Me_2O_7$ por 4 horas. Para su identificación en el resto del trabajo los catalizadores serán citados como NiLaCe, NiLaTi, y NiLaZr.

El catalizador Ni(12%)/Al_2O_3 fue preparado por impregnación húmeda de alúmina comercial (Sasol, Puralox SCCa-150/200) con una solución acuosa de $Ni(NO_3)_2.6H_2O$. Luego de varias horas con agitación se evapora el agua en un rotavapor y luego se calcina a 700 °C durante 4 horas. Para el catalizador Rh(1%)/Al_2O_3 se siguió el mismo procedimiento, pero utilizando una solución acuosa de $RhCl_3.3H_2O$.

Los catalizadores de níquel son los más investigados para aplicaciones en procesos de hidrogenación a escala industrial debido a su elevada actividad y relativo bajo costo.

Caracterización de catalizadores

Para la determinación de áreas específicas y volumen de poros se utilizaron datos de adsorción-desorción de N_2 a -196°C. Antes del análisis las muestras fueron desgaseadas a vacío a 100 °C por 10 horas. La caracterización estructural de los catalizadores se realizó utilizando un difractómetro de polvo Rigaku modelo Ultima IV con una fuente de rayos X de CuKα (λ=1.54186 Å) en un rango 2θ=10-60°. Los difractogramas obtenidos fueron analizados para estimar el tamaño de partícula de níquel metálico utilizando la ecuación de Scherrer (Tada, 2017). El contenido de níquel de los catalizadores se obtuvo por espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), mediante una unidad Perkin-Elmer Optima 2100. Las dispersiones de níquel en los catalizadores se determinaron por quimisorción de H_2 en un equipo volumétrico a 25°C, empleando el método de doble isoterma y asumiendo una estequiometria H:Metal=1. Previo a realizarse la quimisorción, las muestras fueron reducidas en un flujo de H_2 a 600 °C y evacuadas a la misma temperatura. La basicidad de los catalizadores reducidos fue evaluada mediante desorción térmica programada de CO_2 (TPD-CO_2). Primero se realizó un pretratamiento en N_2 (60 mL min^{-1}) a 250 °C por una hora. Posteriormente se enfrió a temperatura ambiente y se realizó el TPD-CO_2 que consistió en exponer a la muestra a una mezcla de CO_2(3%)/N_2 hasta que se alcanzó la saturación superficial (5 min). El CO_2 adsorbido débilmente se eliminó haciendo pasar N_2 (1 hora). Finalmente, la temperatura se incrementó desde temperatura ambiente a 800°C, a una velocidad de calentamiento de 10 °C min^{-1}. El flujo que contiene el CO_2 desorbido se pasó a través de un reactor de metanación y se convirtió en CH_4 usando un catalizador de Ni/Kieselghur a 400 °C. El CH_4 se analizó continuamente utilizando un detector de ionización de llama.

Ensayos catalíticos

La actividad de los catalizadores (0.2 g, 120-170 mesh) fue evaluada en un reactor tubular de cuarzo de lecho fijo a presión atmosférica calefaccionado en un horno eléctrico con una trampa a -10°C a la salida de este para recoger el agua. Previo a la reacción el catalizador fue reducido *in situ* en corriente de H_2 (20 mL min^{-1}) durante 1 hora a 700°C. En estudios previos se determinó que estas condiciones son necesarias para reducir completamente el NiO a Ni metálico. Los gases fueron cuantificados por cromatografía gaseosa utilizando un equipo Shimadzu 14B. En los ensayos de hidrogenación de CO_2 puro se trabajó con una relación H_2/CO_2 = 4/1/con un flujo total de 70 mL min^{-1} que corresponde a una velocidad espacial de 21000 mL h^{-1} g_{cat}^{-1}. En los ensayos de hidrogenación de un biogás modelo se trabajó con una relación $CH_4/CO_2/H_2$ = 2.33/1/4 (que corresponde a un biogás de composición 70% CH_4 y 30% CO_2) utilizando la misma velocidad espacial.

Los datos termodinámicos fueron calculados utilizando el *software Fact-Web*. Se trabajó en el rango 250-500 °C. Para cada temperatura, el análisis de la fase gaseosa se realizó luego de alcanzar el estado estacionario (1 hora). La conversión de CO_2, la selectividad hacia CH_4 y CO se determinaron por las fórmulas siguientes y el T_{50} se define como la temperatura necesaria para convertir el 50% de CO_2.

$$\text{Conversión } CO_2\ (\%) = \frac{[CO_2]\text{in} - [CO_2]\ \text{out}}{[CO_2]\text{in}} * 100 \quad \textbf{(3)}$$

$$\text{Selectividad } CH_4 \text{ o CO } (\%) = \frac{\text{moles } CH_4 \text{ o CO}}{\text{moles } CH_4 + CO} * 100 \quad \textbf{(4)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra diferentes caracterizaciones para los tres catalizadores preparados. Las áreas BET bajas son similares a las ya informadas en trabajos anteriores para otros sistemas de óxidos mixtos. Está reportado que una elevada temperatura de calcinación conduce a la sinterización de este tipo de catalizadores, resultando en sólidos con baja porosidad (Haynes et al., 2017). Se muestra también que el contenido de Ni está razonablemente cerca del valor nominal (12%). También se observa que no hay diferencias significativas en el diámetro de cristalita de Ni obtenidos a partir de la ecuación de Scherrer. La baja dispersión metálica es esperable por las bajas áreas obtenidas y la alta carga metálica de los catalizadores. En los catalizadores reducidos se obtienen difractogramas donde se puede identificar el níquel metálico segregado de un óxido mixto de estequiometría definida. No se detectaron picos de difracción correspondientes a La_2O_3, CeO_2, ZrO_2 ni TiO_2 en los catalizadores reducidos lo que demuestra que el método de síntesis utilizado permite obtener fases puras de estos óxidos mixtos.

Tabla 1. Parámetros texturales y estructurales de catalizadores Ni-La-Me (Me = Ce, Zr, Ti)

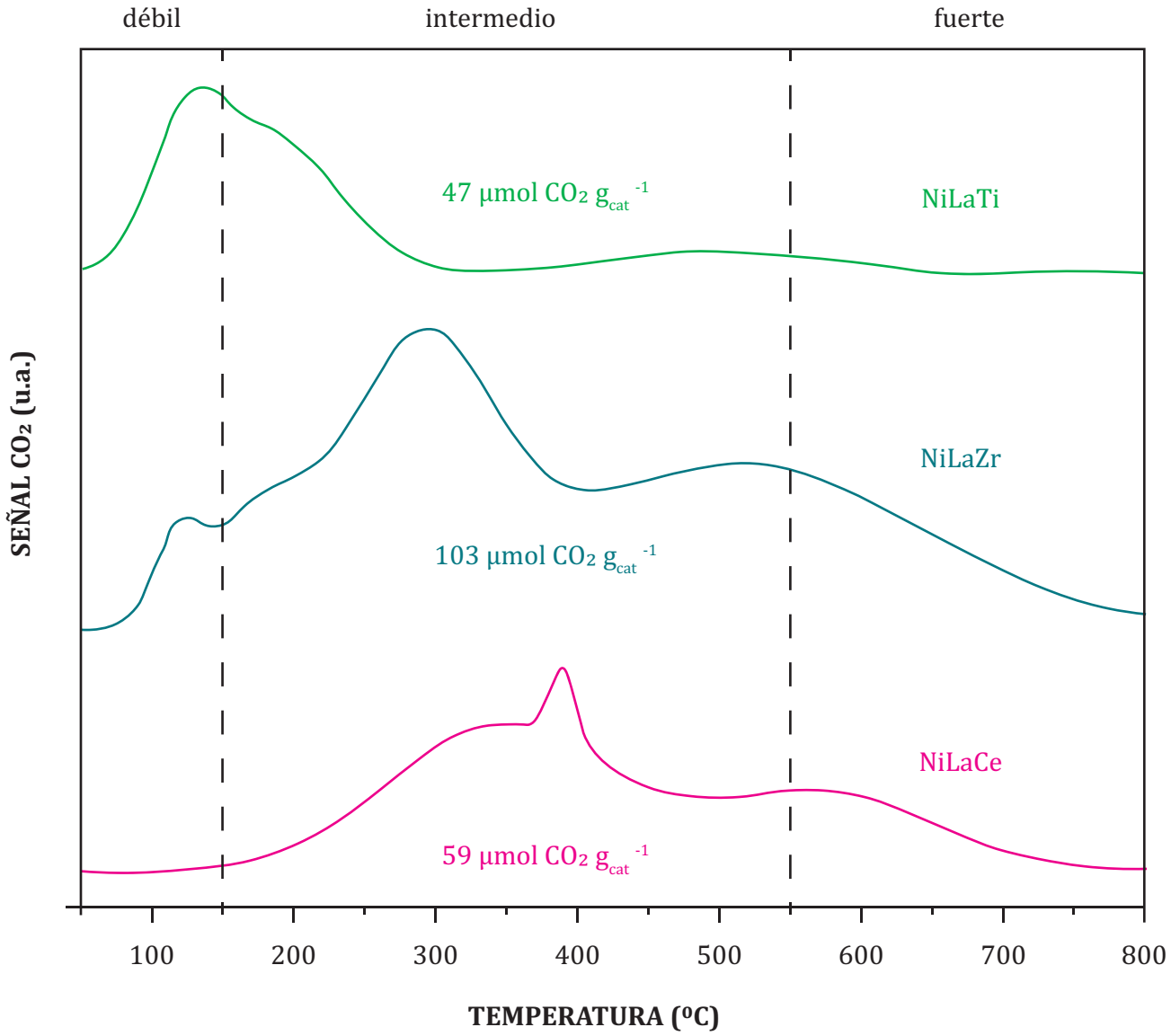
Catalizador →	**NiLaCe**	**NiLaZr**	**NiLaTi**
$Área_{BET}$ ($m^2\ g^{-1}$)	6.1	7.3	13.9
Fases DRX	Ni, $La_2Ce_2O_7$	Ni, $La_2Zr_2O_7$	Ni, $La_2Ti_2O_7$
D_{Ni} (nm)	20	18	21
Ni (% p/p)	11.7	11.7	11.8
Dispersión Ni (%)	0.73	1.98	0.29

Fuente: Elaboración propia

Varios trabajos han demostrado que los sitios básicos son muy importantes para la metanación de CO_2 (Vita et al., 2018), por lo tanto, se realizaron los perfiles de desorción térmica programada de CO_2 para los catalizadores reducidos para cuantificar la basicidad superficial. Dado que uno de los reactivos es el CO_2, que es ligeramente ácido, la presencia de sitios básicos es útil en términos de adsorción y activación de este gas. Los sitios básicos más débiles causan la desorción de CO_2 adsorbido a temperaturas más bajas, mientras que los sitios básicos más fuertes

conducen a la desorción de CO_2 a temperaturas relativamente altas (Xu et al., 2017). Dado que la reacción se lleva a cabo a temperaturas entre 200 y 500 °C, los centros básicos de naturaleza intermedia son, desde un punto de vista catalítico, los de mayor interés. La composición del óxido mixto que acompaña a la fase activa influye significativamente en la fuerza y concentración de los sitios básicos obteniendo el siguiente orden decreciente: NiLaZr (103 µmol CO_2 g^{-1}) > NiLaCe (59 µmol CO_2 g^{-1}) > NiLaTi (47 µmol CO_2 g^{-1}). Esto significa que el catalizador NiLaZr proporciona mayor densidad superficial de sitios básicos.

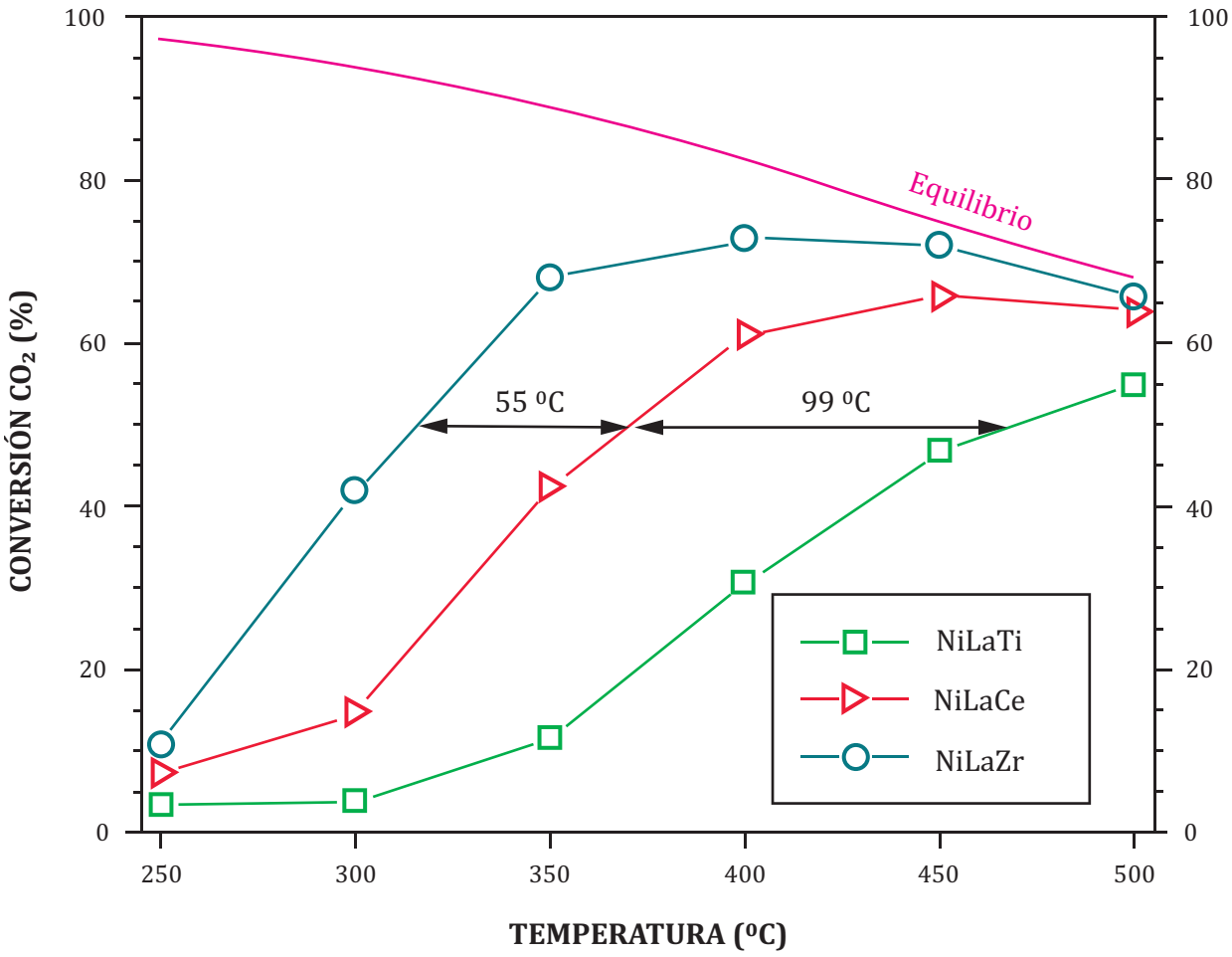
Figura 2. Perfiles de desorción térmica programada de CO_2



Fuente: Elaboración propia

La conversión de CO_2 entre 200 – 500 °C sobre los catalizadores NiLaCe, NiLaTi y NiLaZr se presenta en la Figura 3. Para estos ensayos se utilizó una relación H_2 /CO_2 = 4 y una velocidad espacial (GHSV) de 21000 mL h^{-1} g_{cat}^{-1}.

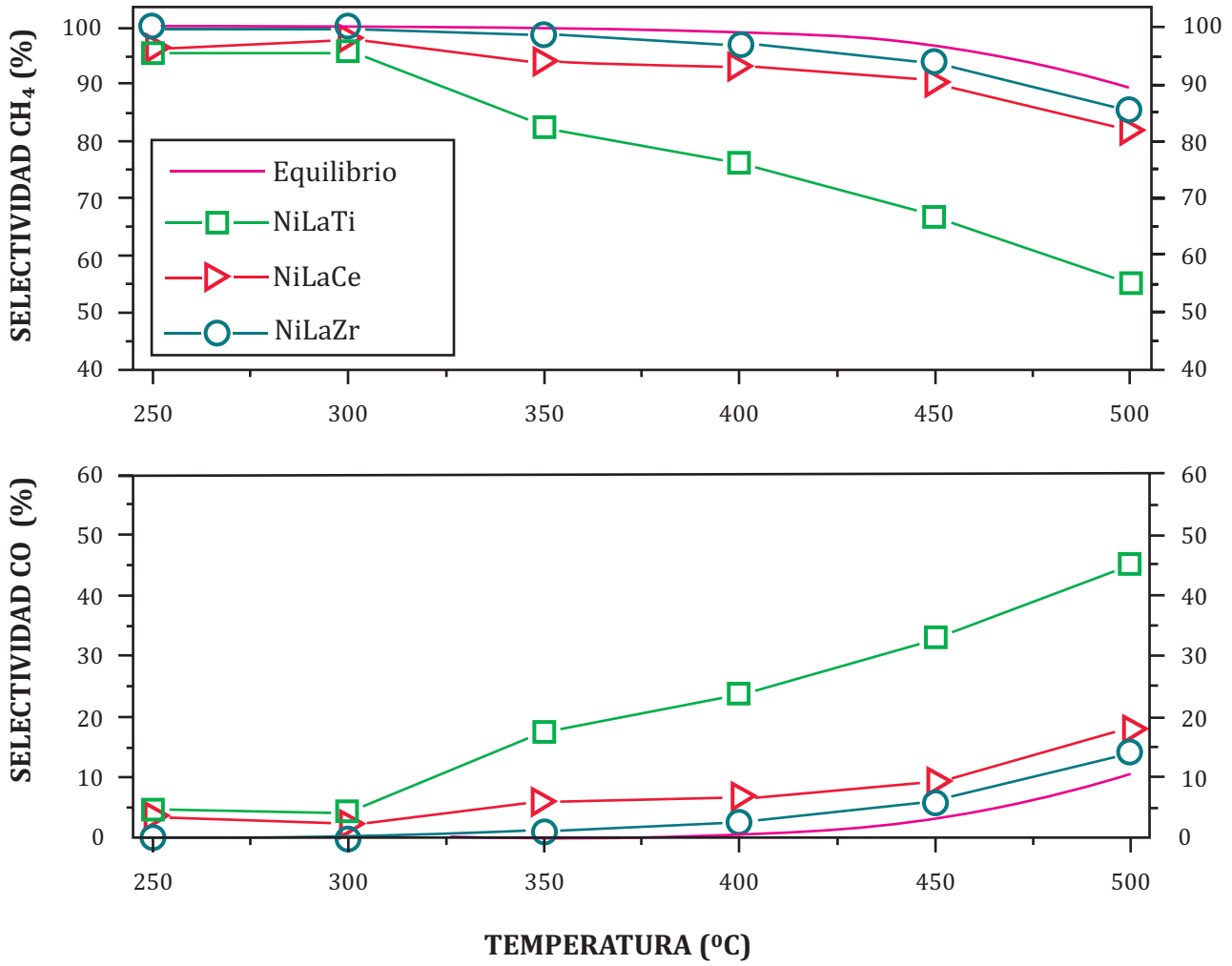
Figura 3. Conversión de CO_2 para los catalizadores Ni-La-Me (Me = Ce, Ti, Zr)



Fuente: Elaboración propia

La línea continua representa la conversión de CO_2 predicha por el equilibrio termodinámico. En las condiciones de trabajo la conversión de CO_2 está lejos de los valores de equilibrio por debajo de 400 °C. Aunque la hidrogenación de CO_2 es termodinámicamente favorable a bajas temperaturas, lograr una elevada conversión a tales temperaturas es un desafío. Esto se debe principalmente a la dificultad asociada con la activación de CO_2 y cinética de la reacción a bajas temperaturas. Para el catalizador NiLaZr, desde 250 a 400 °C, la conversión de CO_2 se incrementó gradualmente, mientras que, a partir de los 400 °C, la conversión disminuye con la temperatura (debido al hecho que la metanación de CO_2 es exotérmica) con valores cercanos al equilibrio termodinámico. Para los otros dos catalizadores se observa un aumento en la conversión de CO_2 con la temperatura, pero ambos presentan valores de T_{50} inferiores que el catalizador NiLaZr: (55 °C vs. NiLaCe) y (154 °C vs. NiLaTi).

Figura 4. Selectividad de catalizadores Ni-La-Me (Me = Ce, Ti, Zr) en la hidrogenación de CO_2 puro

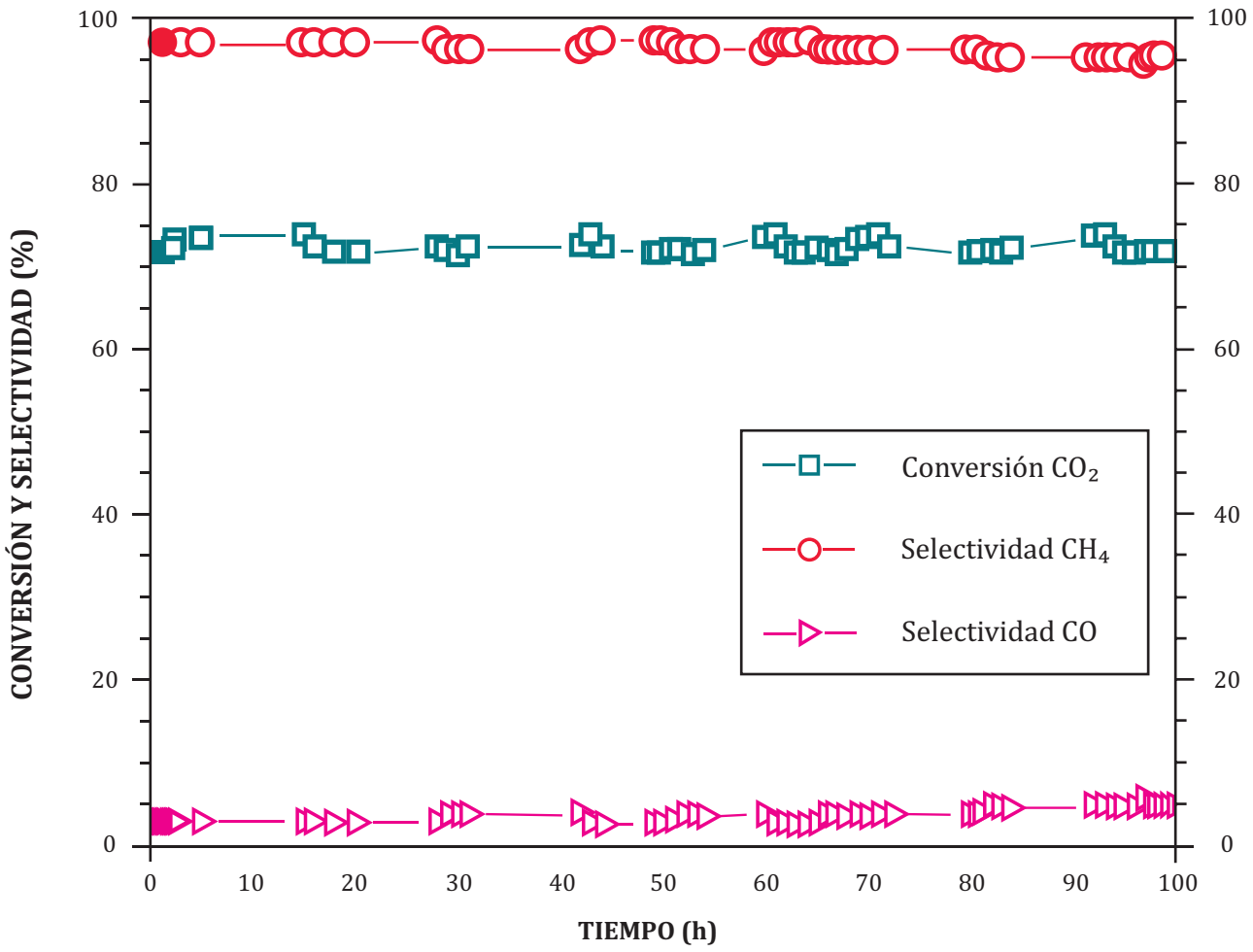


Fuente: Elaboración propia

La selectividad hacia CH_4 y CO para los tres catalizadores ensayados se muestra en la Figura 4. Como se comentó anteriormente la metanación de CO_2 es exotérmica, sin embargo, la RDAR es endotérmica. Por lo tanto, a bajas temperaturas la selectividad a CH_4 es cercana al 100% mientras que al ir aumentando la temperatura la selectividad de CH_4 comienza a disminuir mientras que la de CO aumenta. Los valores para NiLaZr y NiLaCe están cercanos a lo que predice el equilibrio termodinámico mientras que NiLaTi presenta diferencias significativas con los dos anteriores. Este catalizador convierte CO_2 vía RDAR pero no es eficaz en la metanación. Otros posibles productos como etano, etileno y propano no se detectaron durante las experiencias.

La mejor performance catalítica del catalizador NiLaZr está atribuida a una mejor dispersión de Ni observada en los ensayos de quimisorción de H_2 y a una mayor densidad de sitios básicos observada en los ensayos de TPD-CO_2.

Figura 5. Ensayo de estabilidad del catalizador NiLaZr a 400 °C

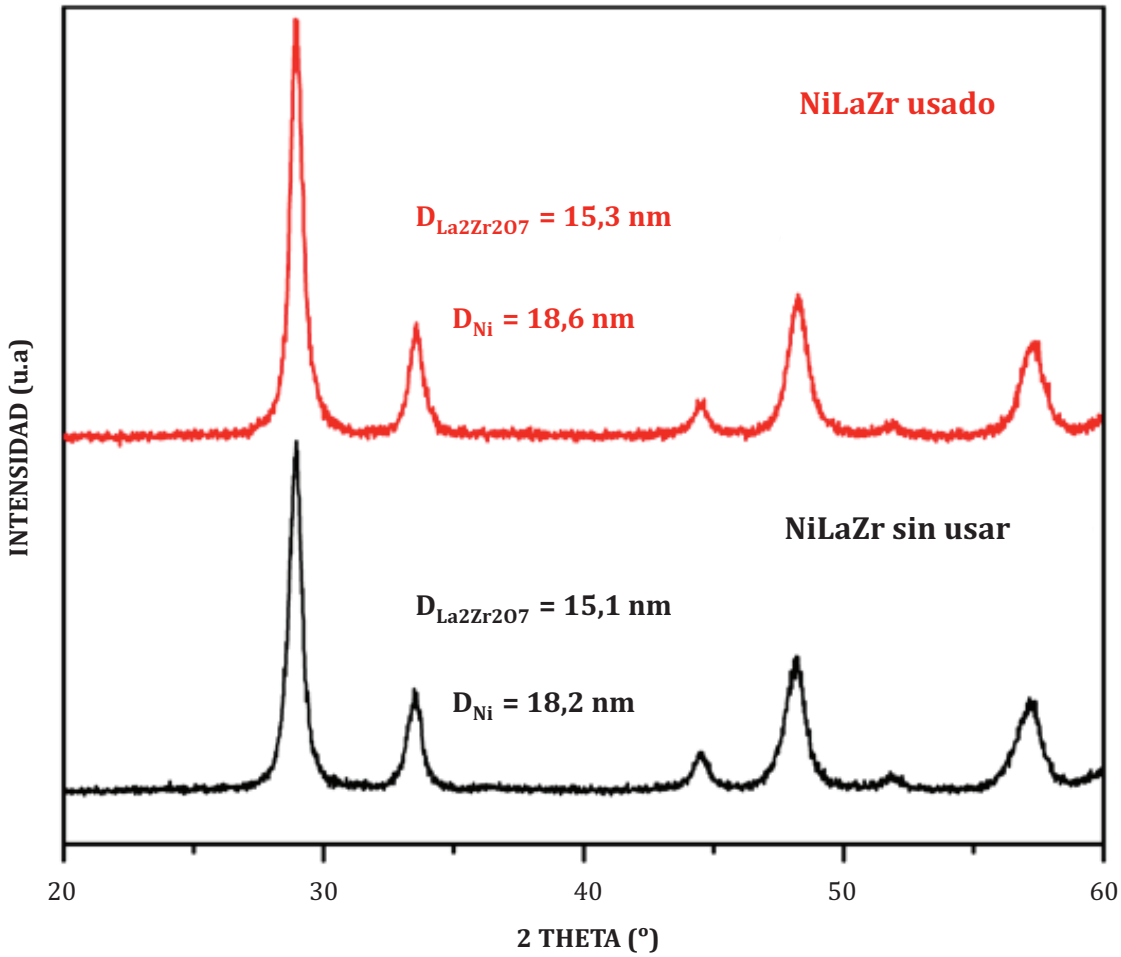


Fuente: Elaboración propia

La actividad del catalizador NiLaZr fue luego evaluada en una experiencia durante 100 horas a 400 °C y los datos de conversión de CO_2 y selectividad a CH_4 y CO se muestran en la Figura 4. La conversión se mantuvo estable alrededor de 72% y se observa un leve descenso en la selectividad a CH_4 que pasa de 97.1% a 95.4% luego de las 100 horas de ensayo demostrando una desactivación prácticamente nula en el tiempo de reacción estudiado.

Luego de este ensayo se procedió a estudiar posibles modificaciones estructurales del catalizador mediante difracción de rayos X. Con fines comparativos también se presenta el catalizador sin usar. Ambos difractogramas se presentan en la Figura 6. En ambos difractogramas pueden identificarse los picos asociados a la fase pirocloro $La_2Zr_2O_7$ en 2θ=28.7, 33.4, 47.8 y 56.6° y los picos en 2θ=44.5° y 51.8° son asociados al níquel metálico. Utilizando la ecuación de Scherrer se calculó el tamaño de cristalita de níquel y del pirocloro antes y después del ensayo de 100 horas. No existen diferencias significativas en ambos parámetros indicando que no existe sinterización apreciable de las partículas de níquel y confirmando la buena estabilidad térmica y química que presenta el compuesto $La_2Zr_2O_7$ utilizado como soporte en este catalizador sumado a la ausencia de otros picos como La_2O_3 y ZrO_2 que podrían estar asociados a modificaciones estructurales del óxido mixto.

Figura 6. Difractogramas del catalizador NiLaZr sin usar y usado durante 100 h a 400 °C

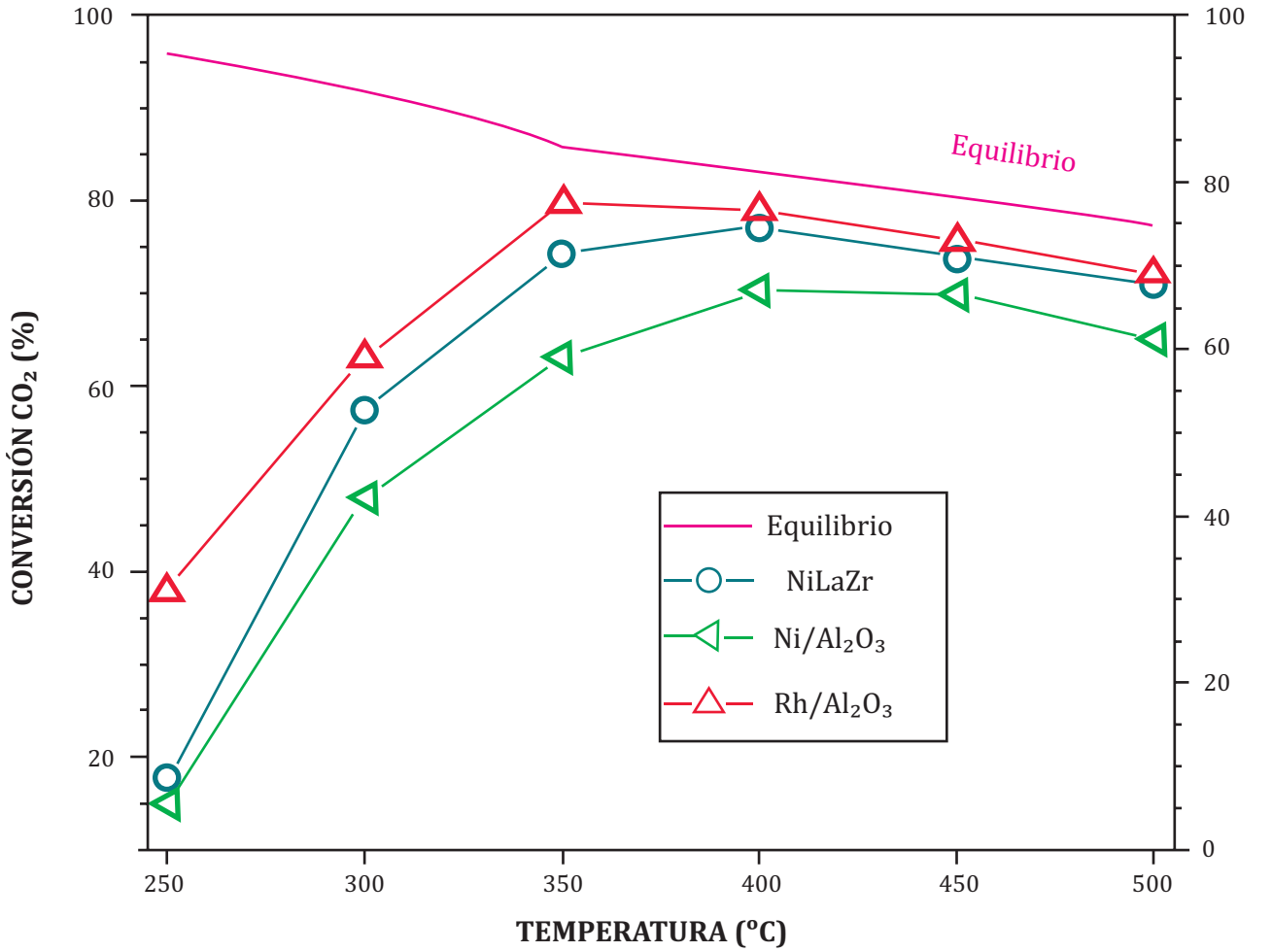


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se muestran los resultados de la hidrogenación directa de un biogás modelo (CH_4 = 70% , CO_2 = 30%) con una relación $CH_4/CO_2/H_2$ = 2.33/1/4 y una velocidad espacial de 21000 mL h^{-1} g_{cat}^{-1}. En este ensayo el catalizador NiLaZr fue comparado con el catalizador Ni(12%)/Al_2O_3 que está ampliamente reportado en la literatura (Stangeland et al., 2018) y otro catalizador basado en un metal noble como el rodio soportado también sobre Al_2O_3 (Rh(1%) Al_2O_3). A temperaturas bajas este último catalizador presenta la mayor conversión de CO_2 pero a partir de 400 °C los valores son similares a los obtenidos por el catalizador NiLaZr. Los valores de conversión de CO_2 para el catalizador Ni(12%)/Al_2O_3 son inferiores a los que presenta el catalizador NiLaZr indicando una menor actividad para este proceso posiblemente asociado a menor basicidad superficial.

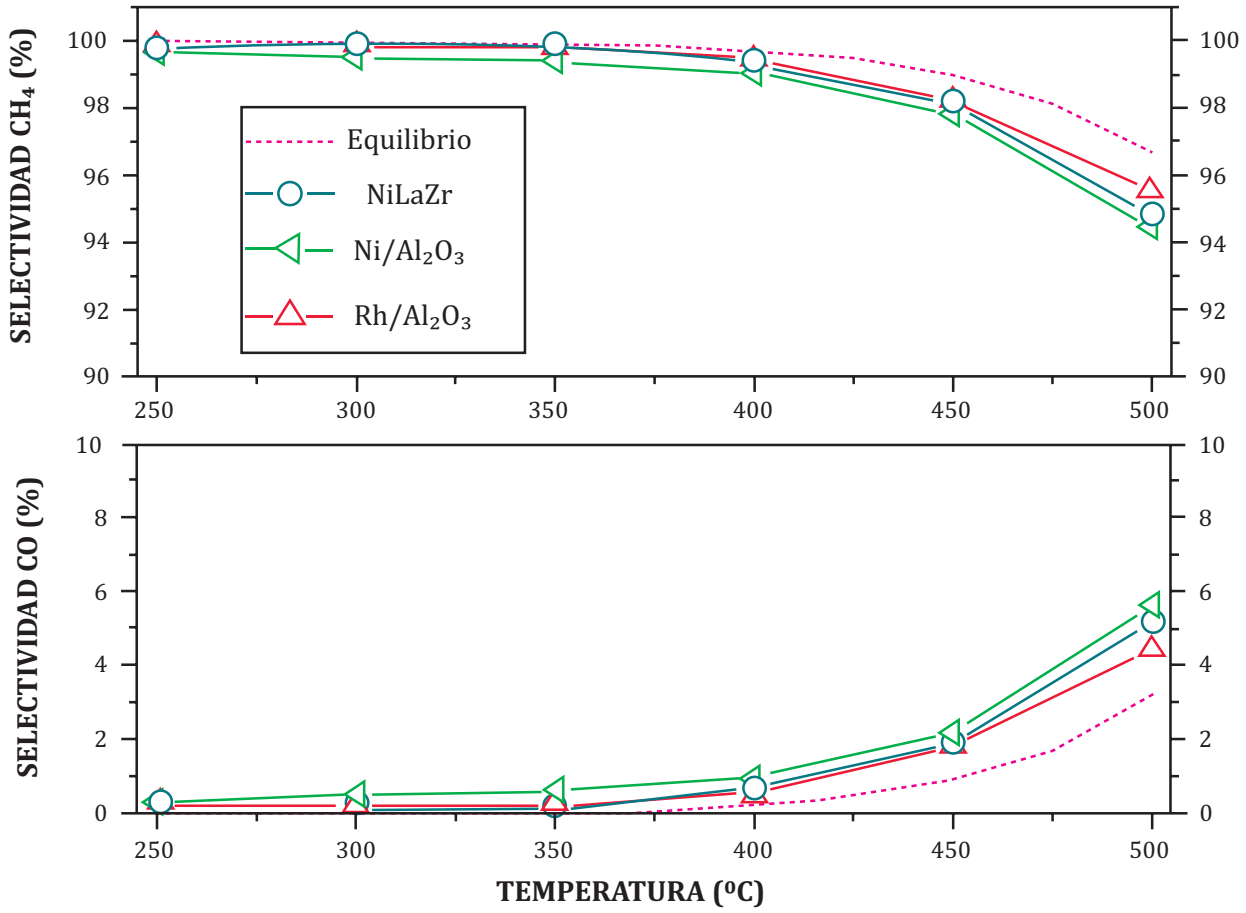
La selectividad para los catalizadores ensayados se presenta en la Figura 8. No se observan diferencias significativas en los valores de selectividad alcanzando valores cercanos al equilibrio termodinámico para temperaturas menores a 400 °C. Sin embargo, el gas obtenido no alcanza la concentración necesaria para poder ser inyectada directamente en la red de gas natural (CH_4 > 96%, H_2 < 2% y CO_2 < 4%) por lo que sería necesario adicionar otra etapa de acondicionamiento como etapas de separación de H_2 y CO_2 o utilizar un segundo reactor de metanación para cumplir con las especificaciones. Esta opción ya fue contemplada por otros autores (Witte et al., 2018).

Figura 7. Ensayos de hidrogenación de biogás



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Selectividad en los ensayos de hidrogenación de un biogás modelo



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Catalizadores Ni-La-Me (Me= Ce, Ti o Zr) preparados por el método del precursor polimérico modificado y calcinados a 850 °C fueron ensayados en la hidrogenación de CO_2 para la producción de CH_4. En todos los casos los catalizadores reducidos están compuestos por Ni (12% p/p) y un óxido mixto de estequiometría definida. La composición de este óxido que acompaña a la fase activa influye significativamente sobre las propiedades fisicoquímicas y la actividad del catalizador. El catalizador NiLaZr que presenta mayor dispersión de la fase activa, y una mayor concentración de los sitios básicos superficiales conduce a una mayor conversión de CO_2 y mayor selectividad a CH_4. Este catalizador presenta buena estabilidad y selectividad a CH_4 durante 100 horas de reacción a 400°C, demostrando poseer buenas propiedades catalíticas para transformar de manera eficiente el CO_2 en CH_4. Este catalizador fue ensayado en la hidrogenación directa de un biogás modelo y su actividad fue comparada con los catalizadores Ni/Al_2O_3 y Rh/Al_2O_3 presentando buena actividad y selectividad hacia CH_4. Este comportamiento confirma la estabilidad de los sistemas catalíticos presentados en este trabajo basados en níquel disperso en un óxido mixto con elevada estabilidad térmica y química y brinda resultados prometedores para futuros desarrollos. Sin embargo, para que el gas obtenido pueda ser inyectado directamente en la red de gas natural se debe acondicionar su concentración ya sea a través de procesos de separación o en otro reactor de metanación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa para el Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) por el apoyo económico. También al Dr. Alejandro Amaya por la determinación de los parámetros texturales de los catalizadores; a los Dres. Mariano Romero y Ricardo Faccio por la realización de los difractogramas de los catalizadores y a los Dres. Carlos Apesteguía, Hernán Duarte y Darío Segobia por la realización de los estudios de reducción térmica programada y quimisorción de H_2 y CO_2.

Se confirma la estabilidad de los sistemas catalíticos presentados en este trabajo basados en níquel disperso en un óxido mixto con elevada estabilidad térmica y química y brinda resultados prometedores para futuros desarrollos.

REFERENCIAS

Ashok, J., Ang, M. L. and Kawi, S. (2015). Enhanced activity of CO_2 methanation over Ni/CeO2-ZrO2 catalysts: Influence of preparation methods. *Catalysis Today, 281*, 2–9.

Cipiti, F., Barbera, O., Briguglio, N., Giacoppo, G., Italiano, C. and Vita, A. (2016). Design of a biogas steam reforming reactor: A modelling and experimental approach. *International Journal of Hydrogen Energy, 41*(27), 11577–11583.

Falbo, L., Martinelli, M., Visconti, C. G., Lietti, L., Bassano, C. and Deiana, P. (2017). Kinetics of CO_2 methanation on a Ru-based catalyst at process conditions relevant for Power-to-Gas applications. *Applied Catalysis B: Environmental, 225*(17), 354–363.

Gaura, S., Haynes, D. and Spivey, J. (2011). Rh, Ni, and Ca substituted pyrochlore catalysts for dry reforming of methane. *Applied Catalysis A: General, 403*, 142-151.

Gödde, J., Merko, M., Xia, W. and Muhler, M. (2021). Nickel nanoparticles supported on nitrogen–doped carbon nanotubes are a highly active, selective and stable CO_2 methanation catalyst. *Journal of Energy Chemistry, 54*, 323–331.

Haynes, D. J., Shekhawat, D., Berry, D. A., Zondlo, J., Roy, A. and Spivey, J. J. (2017). Characterization of calcination temperature on a Ni-substituted lanthanum-strontium-zirconate pyrochlore. *Ceramics International, 43*(18), 16744–16752.

Hussain, I., Jalil, A.A., Hassan, N.S., Hambali, H.U. and Jusoh, N.W.C. (2020). Fabrication and characterization of highly active fibrous silica-mordenite (FS@SiO2-MOR) cockscomb shaped catalyst for enhanced CO_2 methanation. *Chemical Engineering Science, 228*, 115978.

Iaquaniello, G., Setini, S., Salladini, A. and Falco, M. De. (2018). CO_2 valorization through direct methanation of flue gas and renewable hydrogen : A technical and economic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy, 43*, 17069-17081.

Janke, C., Duyar, M.S., Hoskins, M. and Farrauto, R.J. (2014). Catalytic and adsorption studies for the hydrogenation of CO_2 to methane. *Applied Catalysis. B Environmental*. 152–153.

Milani, D., Khalilpour, R., Zahedi, G. and Abbas, A. (2015). A model-based analysis of CO_2 utilization in methanol synthesis plant. *Journal of CO_2 Utilization, 10*, 12–22.

Odumugbo, C.A. (2010). Natural gas utilisation in Nigeria: Challenges and opportunities. *Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2*, 310-316.

Pastor-Pérez, L., Saché, E. L., Jones, C., Gu, S., Arellano-García, H. and Reina, T. R. (2018). Synthetic natural gas production from CO_2 over Ni-x/CeO2 -ZrO2 (x = Fe, Co) catalysts: Influence of promoters and space velocity. *Catalysis Today, 317*, 108-113.

Ramachandran, C.S., Balasubramanian, V. and Ananthapadmanabhan, P.V. (2013). Thermal cycling behaviour of plasma sprayed lanthanum zirconate based coatings under concurrent infiltration by a molten glass concoction. *Ceramics International, 39*(2), 1413-1431.

Sekine, Y., Mukai, D., Murai, Y., Tochiya, S., Izutsu, Y., Sekiguchi, K. & Sugiura, Y. (2013). Steam reforming of toluene over perovskite-supported Ni catalysts. *Applied Catalysis A: General, 451*, 160–167.

Spivey, J.J. and Hutchings, G. (2014). Catalytic aromatization of methane. *Chemical Society Reviews, 43*, 792–803.

Stangeland, K., Kalai, D. Y., Li, H. and Yu, Z. (2018). Active and stable Ni based catalysts and processes for biogas upgrading: The effect of temperature and initial methane concentration on CO_2 methanation. *Applied Energy, 227*, 206-212.

Swalus, C., Jacquemina, M., Poleunis, C., Bertrand, P. and Ruiz, P. (2012). CO_2 methanation on Rh/g-Al_2O_3 catalyst at low temperature: "In situ" supply of hydrogen by Ni/activated carbon catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental, 125*, 41–50.

Tada, S., Ikeda, S., Shimoda, N., Honma, T., Takahashi, M., Nariyuki, A. and Satokawa, S. (2017). Sponge Ni catalyst with high activity in CO_2 methanation. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*(51), 30126–30134.

Veiga, S., Romero, M., Faccio, R., Segobia, D., Duarte, H., Apesteguía, C., and Bussi, J. (2020). Hydrogen-rich gas production by steam and oxidative steam reforming of crude glycerol over Ni-La-Me mixed oxide catalysts (Me= Ce and/or Zr). *Catalysis Today, 344*, 190–198.

Vita, A., Italiano, C., Pino, L., Frontera, P. and Ferraro, M. (2018). Activity and stability of powder and monolith-coated Ni / GDC catalysts for CO_2 methanation. *Applied Catalysis B : Environmental, 226*, 384–395.

Witte, J., Calbry-Muzyka, A., Wieseler, T., Hottinger, P., Biollaz, S. and Schildhauer, T.J. (2019). Demonstrating direct methanation of real biogas in a fluidised bed reactor. *Applied Energy, 240*, 359–371.

Witte, J., Settino, J., Biollaz, S., Tilman, J. and Schildhauer, T. (2018). Direct catalytic methanation of biogas – Part I: New insights into biomethane production using rate-based modelling and detailed process análisis. *Energy Conversion and Management, 171*, 750–768.

Xu, L., Wang F., Chen, M., Nie, D., Lian, X., Lu, Z., Chen, H., Zhang, K., Ge, P. (2017). CO_2 methanation over rare earth doped Ni based mesoporous catalysts with intensified low-temperature activity. *International Journal of Hydrogen Energy, 42*, 15523-15539.

Zhang, F., Lu, B.and Sun, P. (2020), Highly stable Ni-based catalysts derived from LDHs supported on zeolite for CO_2 methanation. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*, 16183-16192.

Zhou, R., Rui, N., Fan, Z. and Liu, C. (2016). Effect of the structure of Ni/TiO_2 catalyst on CO_2 methanation. *International Journal of Hydrogen Energy, 41*(47), 22017–22025.

RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE): IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL, GESTIÓN Y METODOLOGÍAS SOBRE SU MANEJO

WASTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES (WEEE): SOCIAL, ENVIRONMENTAL IMPACT, MANAGEMENT AND METHODOLOGIES ON ITS HANDLING

Dulce Kristal Becerra Paniagua [1], Araceli Hernández Granados [2], Evelyn Betsabe Díaz Cruz [3], Karla Graciela Cedano Villavicencio [4], Horacio Martínez Valencia [5]

Recibido: 18/03/2020 y Aceptado: 14/08/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (108 - 131)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

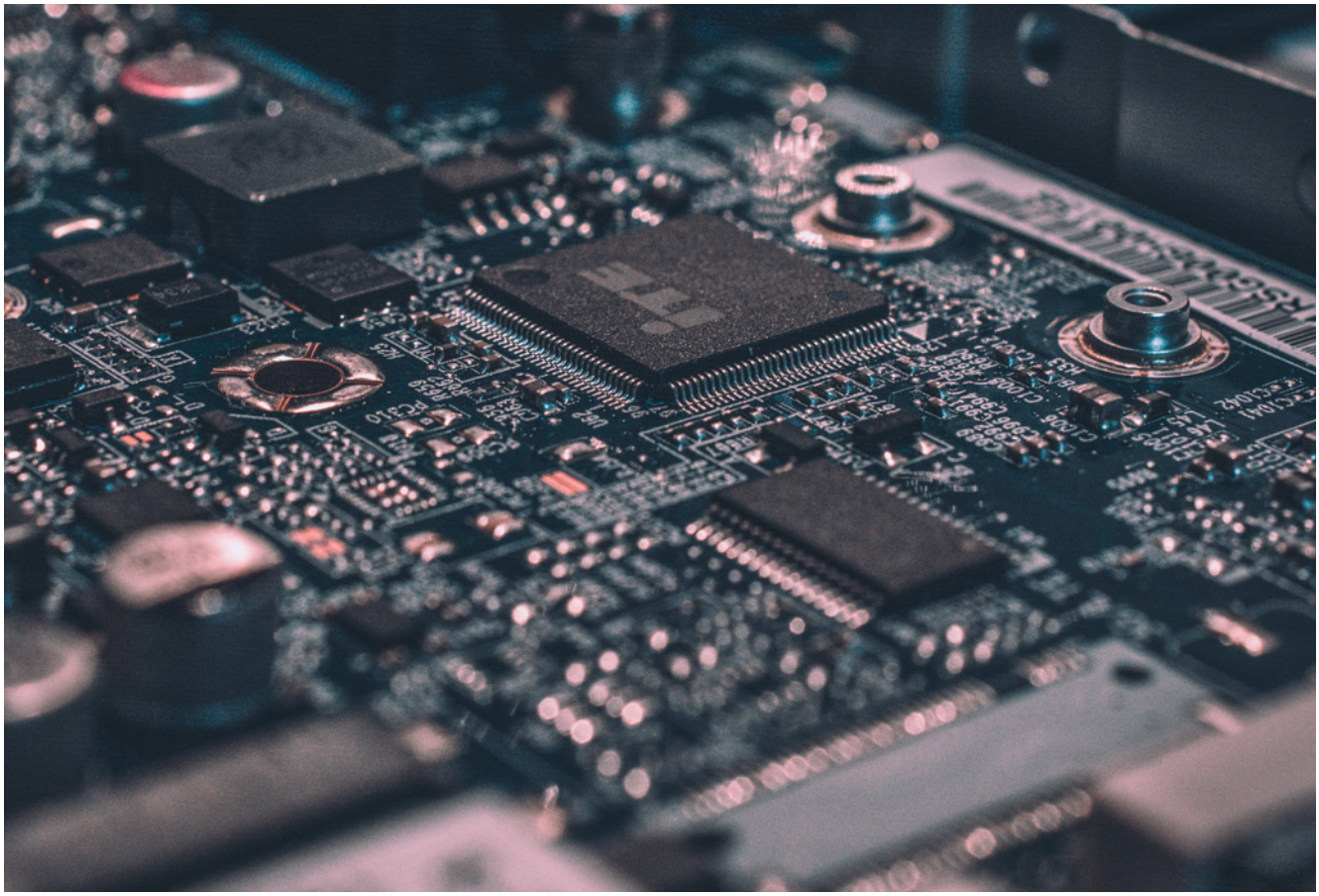


Foto de Alexander Debiève de Unsplash.

RESUMEN

A medida que el mercado de la tecnología continúa evolucionando, el flujo de residuos de dispositivos eléctricos y electrónicos (RAEE) generados pueden constituir una amenaza ambiental y social, debido en gran parte al manejo inadecuado, al servicio insuficiente de recolección de estos residuos y a la desinformación existente sobre el tema. En este artículo se presenta una revisión sistemática de la literatura publicada sobre los RAEE, incluyendo información sobre su generación, destino y metodologías ambientalmente amigables que se han propuesto para su gestión-reciclaje, así como sobre impactos ambientales y en la salud derivados de los RAEE y su manejo. Esta revisión tiene el propósito de sensibilizar a la población sobre el peligro de un tratamiento inadecuado de los RAEE, y a su vez considerar la implementación de estrategias de gestión y acciones a tomar, a través de procesos de reciclaje amigables con el medio ambiente. Las primeras menciones de los RAEE en la producción científica datan de 1996, evidenciándose que el tópico ha seguido en constante crecimiento hasta el 2019, cuando se publicaron 735 documentos. Las categorías con mayor número de documentos donde se ha generado mayor conocimiento y aportaciones científicas de alto impacto destacan las enfocadas al medio ambiente o a la sustentabilidad energética, así como las áreas de metalurgia, química, eléctrica y de combustibles fósiles. Además, se presenta el mapeo de los desechos electrónicos en millones de toneladas que se produce mundialmente y se muestran las regiones que envían RAEE a otros países en su mayoría en forma ilegal. Por otra parte, el reciclaje de RAEE es un proceso complicado, pero con un alto potencial para generar una economía circular verde.

Palabras clave: RAEE, ODS, Basura Electrónica, Reciclaje, Electroquímica, Recuperación de Metales.

1 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
dkbp@ier.unam.mx
http://orcid.org/0000-0003-0471-7044

2 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Ciencias Físicas (ICF-UNAM).
aracelih@icf.unam.mx
http://orcid.org/0000-0001-9439-5362

3 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
ebdc@ier.unam.mx
http://orcid.org/0000-0002-3219-129X

4 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
kcedano@ier.unam.mx
http://orcid.org/0000-0002-8102-7226

5 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Instituto de Ciencias Físicas (ICF-UNAM)
hm@icf.unam.mx
http://orcid.org/0000-0002-0695-3457

ABSTRACT

As the technology market continues to evolve, the flow waste from the electrical and electronic devices (WEEE) generated may constitute an environmental and social threat, due in large part to the inadequate management of these wastes, as well the insufficient collection services, and the existing disinformation on this topic. In this article its present a systematic review of the literature published about WEEE, including information on their generation, destination and environmentally friendly methodologies that have been proposed for its management-recycling, as well as on environmental and health impacts derived from WEEE and its handling. This review aims to sensitize the population about the danger of inadequate treatment of WEEE and in turn to consider the implementation of management strategies and actions to be taken for these, through environmentally friendly recycling processes. The first mentions of WEEE in scientific production date from 1996, evidencing that the topic has continued to grow steadily until 2019, when 735 documents were published. The categories with the greatest number of documents where the greatest knowledge and high-impact scientific contributions have been generated include those focused on the environment or energy sustainability, as well as the areas of metallurgy, chemistry, electricity and fossil fuels. In addition, the mapping of electronic waste produced in millions of tons that is produced worldwide is presented and the regions that send WEEE to other countries, mostly illegally, are shown. On the other hand, the recycling of WEEE is a complicated process, but with a high potential to generate a green circular economy.

Keywords: *WEEE, ODS, Electronic Waste, Recycling, Electrochemistry, Metal Recovery.*

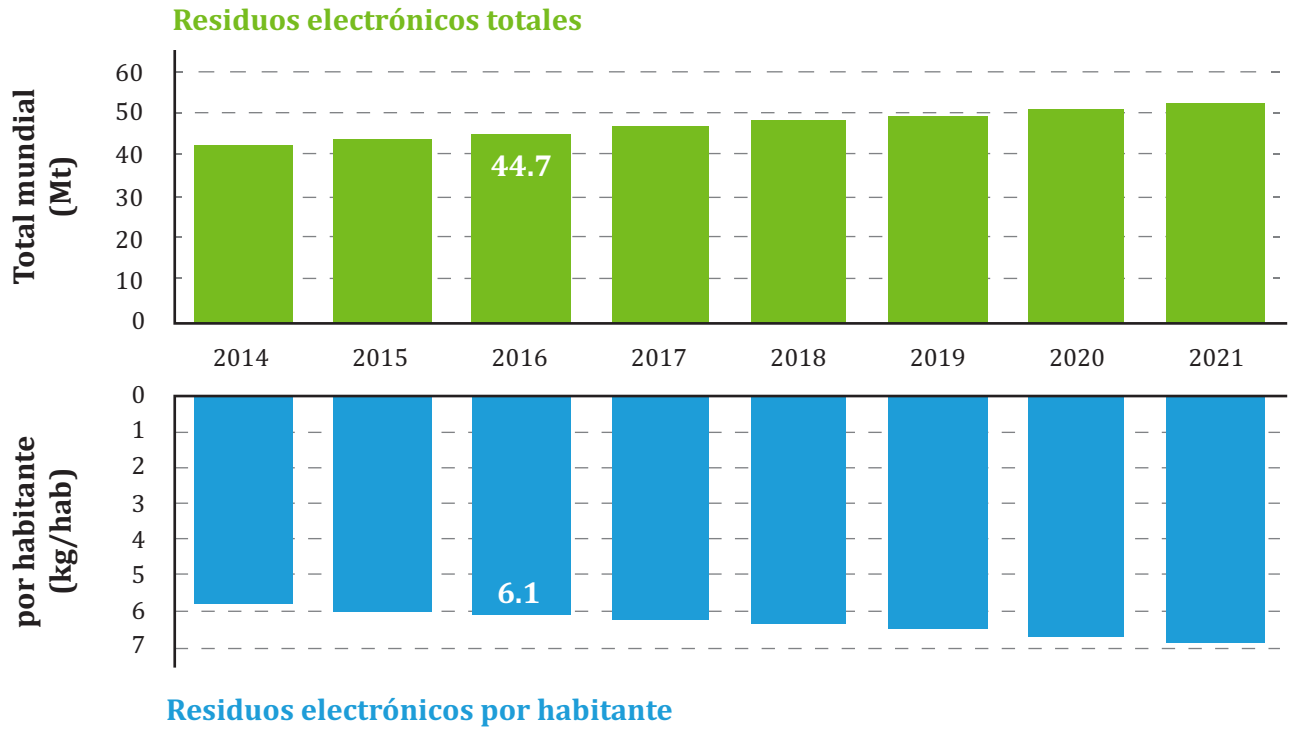
INTRODUCCIÓN

Se definen como RAEE a los residuos o desechos de aparatos eléctricos y electrónicos, o WEEE por sus siglas en inglés (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) a cualquier aparato eléctrico o electrónico cuyo periodo de vida útil ha concluido. Los dispositivos eléctricos o electrónicos (DE) son por definición aquellos que contienen circuitos y/o componentes eléctricos o que para su funcionamiento necesitan corriente eléctrica, campos electromagnéticos o baterías (Blaisdell-Vidal, 2019). Los RAEE son generados cuando el usuario decide dejar de utilizar sus DE como resultado de la creciente demanda de nuevos productos, falla física, las constantes actualizaciones o la llamada obsolescencia programada (problemas de compatibilidad) (Ongondo et al., 2011). Por ejemplo, en 1992 la vida útil (EoL, *End of Life*, en inglés) de las computadoras personales (PC, personal computer, en inglés) era en promedio de 4.5 años, esta decreció a 3 años en 1999 y pasó a ser de sólo 2 años en el 2005 (Culver, 2005; Widmer et al., 2005). Entre los RAEE más generados se encuentran teléfonos celulares, computadoras, impresoras, televisores, tabletas, paneles fotovoltaicos, refrigeradores, entre otros más (Cucchiella et al., 2015; Wong et al., 2007). Esto se debe en gran parte al deseo de los consumidores por adquirir los modelos más recientes en materia tecnológica.

Datos recientes informan que anualmente en el mundo se generan de 20 a 50 millones de toneladas aproximadamente de estos residuos (Tuncuk et al., 2012). Tan solo en el 2016 se generaron 44.7 millones de toneladas métricas (Mt) de desechos, que significa 6.1 kilogramos por habitante en el planeta (kg/hab), lo cual equivale al peso de 9 pirámides de Giza o 4,500 torres Eiffel; y se estima que esta cifra pueda incrementar a 52.2 Mt para el 2021 (Baldé et al., 2017); esta estimación se puede observar en la Figura 1.

Este incremento de RAEE no sólo origina la generación de desechos sólidos, si no que otro problema que se produce es el inadecuado manejo de estos, ocasionando problemas como la contaminación del suelo y agua; asimismo si los residuos se incineran, también se contamina el aire [1], impactando de manera negativa la salud humana y al ambiente (Dimitrakakis et al., 2009; Stenvall et al., 2013). Cuando los contaminantes penetran en el suelo, pueden filtrarse al subsuelo, de manera que alteran la calidad de las aguas subterráneas. Las personas que habitan cerca de los sitios de reciclaje al tomar agua, usarla en la comida o respirar aire contaminado quedan expuestos a compuestos tóxicos como aluminio, bario, berilio, cadmio, cobalto, plomo, níquel, entre otros más (Cesaro et al., 2018; Yang et al., 2018). Debido a la magnitud de las problemáticas anteriormente mencionadas, en este artículo se presenta una revisión sistemática de la literatura publicada sobre los RAEE. Además, se proporciona información sobre su generación, destino, impacto a la salud y a la calidad del ambiente, con el objetivo de sensibilizar e informar sobre el peligro que existe en el tratamiento inadecuado de los RAEE. Adicionalmente, se muestra la importancia de formular e implementar estrategias de gestión de residuos mediante procesos de reciclaje ambientalmente amigables.

Figura 1. Generación mundial de residuos electrónicos por habitante y total mundial, periodo 2014 a 2016



Nota: Los valores de 2017 a 2021 son estimaciones del estudio de Baldé et al. (2017)
Fuente: Elaboración propia con datos basados del estudio de Baldé et al. (2017)

1 Los componentes principales fueron plásticos a base de estireno (84% en peso) así como poliolefinas (12% en peso) y principalmente acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliestireno (PS), polipropileno (PP).

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA BÚSQUEDA DE LITERATURA SOBRE RAEE

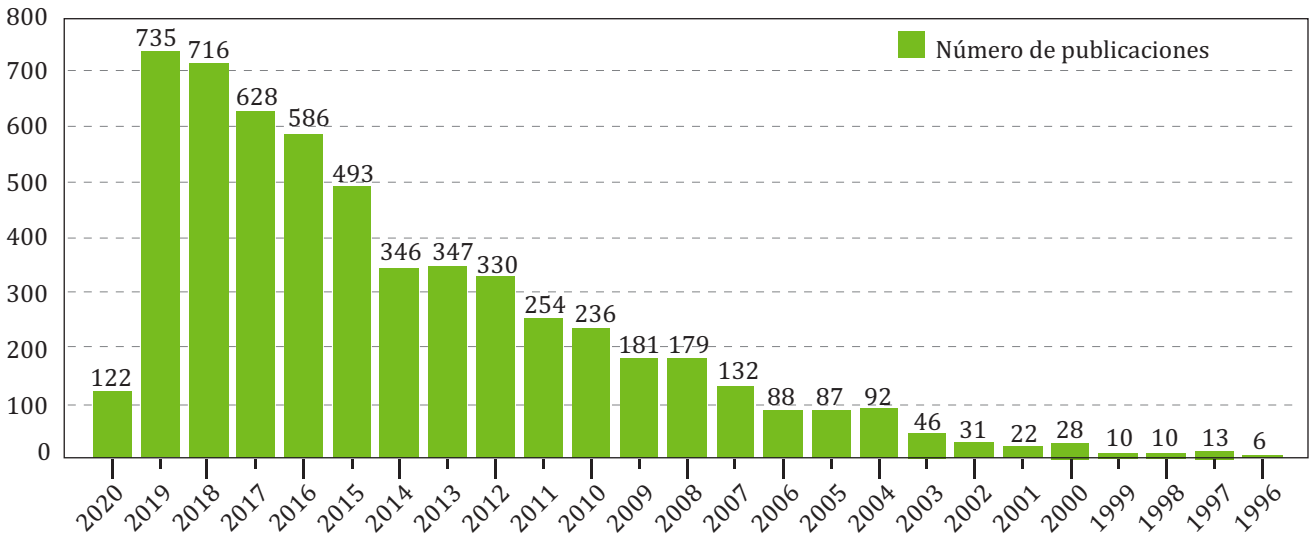
Para conocer de forma general los esfuerzos hechos por la comunidad científica en torno a los RAEE, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre la producción científica en este tema. La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el buscador *web of science* (WOS) de *Clarivate Analytics*; (WOS, 2020), con la colección de las siguientes revistas indexadas: "*Science Citation Index Expanded*", "*Social Sciences Citation Index*", "*Conference Proceedings Citation Index*", "*Conference Proceedings Citation Index-Social Science & Humanities*", "*Book Citation Index-Science*" "*Book Citation Index-Social Sciences & Humanities*" y "*Emerging Sources Citation Index*". Se investigaron el grupo de palabras: TS= "WEEE" OR "*e-waste*" OR "*electr* waste*" (*sirve como comodín y para incluir las palabras derivadas como *electric*, *electronic*, etc.) OR "*Waste Electrical and Electronic Equipment*". Se realizó la búsqueda de estas palabras en el campo de búsqueda "tema" (TS=*topic*), es decir en título, abstract y palabras clave.

Resultados

La búsqueda proporcionó 5,778 documentos de la combinación del grupo de palabras utilizadas (datos al 28 de febrero del 2020). De ellos, 2,916 documentos contenían la palabra "*e-waste*", 1,847 de "WEEE" y sólo 856 mencionan la frase "*Waste Electrical and Electronic Equipment*" (las cifras no son acumulativas). En la Figura 2 se observa que la producción científica (número de publicaciones) de documentos relacionados a este tema comenzó en 1996 y ha seguido en constante crecimiento hasta llegar a 735 documentos en el 2019. Dentro del total de documentos encontrados, el 72% corresponde a artículos, el 21% a memorias de trabajo y el porcentaje restante se divide entre conferencias, capítulos de libros, resúmenes, etc. Se puede atribuir que los primeros resultados de documentos que aparecieron en 1996, se debió a que a inicios de ese año se comenzó con la generación de políticas públicas sobre la protección del medio ambiente que prohibía la importación de residuos municipales peligrosos y sólidos en algunos países como la República Popular China (Long et al., 2016).

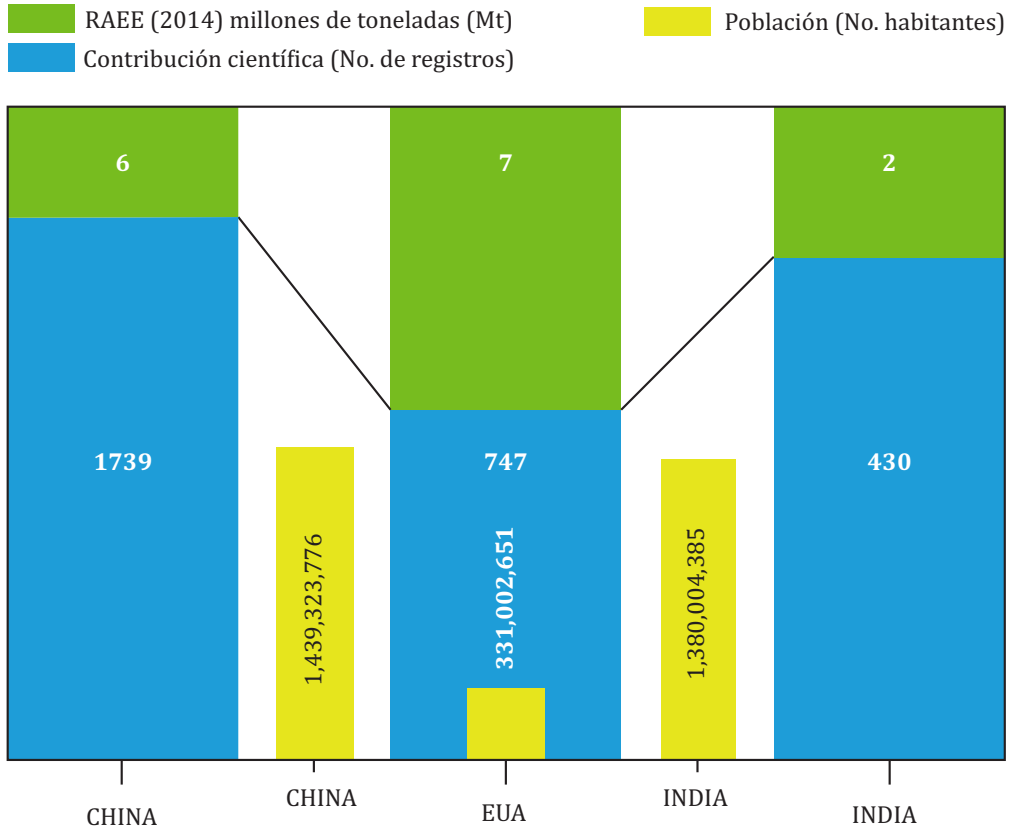
De acuerdo con la Figura 3, los países con mayor aportación de documentos (producción científica, barras color celeste) son la República Popular de China (China), Estados Unidos de América (EUA) e India. Lo anterior se puede correlacionar a que también son los países con mayor inversión en investigación y desarrollo (I+D) del mundo (Fondo Monetario Internacional, 2019) y con mayor número de pobladores de acuerdo con las estadísticas de Worldometer (población, barras color amarillo) (Worldometer, 2020). Es interesante destacar que también se clasificaron dentro de los 5 países que más RAEE produjeron en el 2014 (producción de RAEE, barras color verde) (Lines et al., 2016).

Figura 2. Producción científica por año durante el periodo de 1996-2020, para los criterios de búsqueda establecidos



Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020)

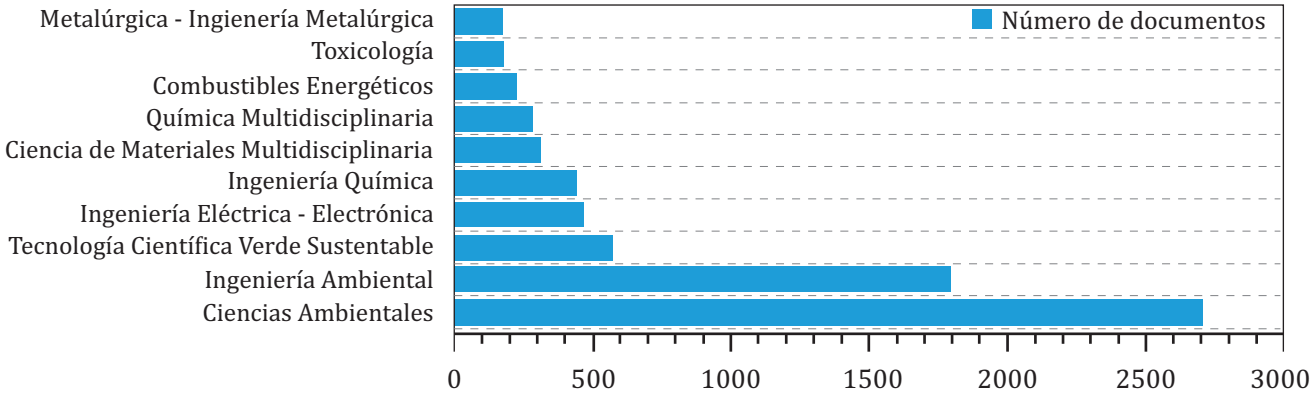
Figura 3. Número de contribuciones científicas (documentos), RAEE en millones de toneladas y población de China, EUA e India



Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020) y cifras de la población mundial por país (Worldometer, 2020).

En la Figura 4, se muestran las categorías con mayor número de documentos donde se ha generado mayor conocimiento y aportaciones científicas de alto impacto. Dentro de estas, destacan las enfocadas al medio ambiente o a la sustentabilidad energética, así también las áreas de metalurgia, química, eléctrica y de combustibles fósiles.

Figura 4. Top 10 de categorías donde se encuentran la mayoría de los documentos



Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020)

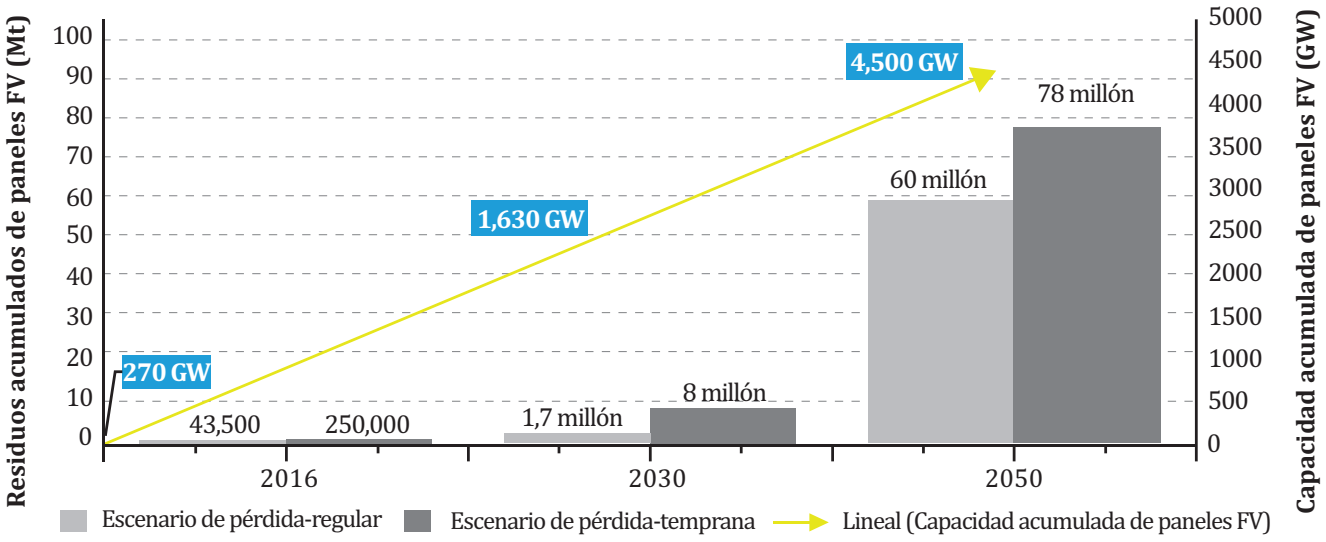
ORIGEN DE LOS RAEE Y MATERIALES CONTENIDOS

Entre los diferentes tipos de dispositivos eléctricos y electrónicos que han llamado más la atención por su amplia popularidad de uso y desechos que generan, se encuentran los celulares, computadoras, pantallas y monitores de CRT, LCD y LED, tabletas, placas de circuitos impresos (PCB, *Printed Circuit Board*, en inglés) discos duros de estado sólido y paneles fotovoltaicos (Cucchiella et al., 2015). Por ejemplo, los celulares son dispositivos que poseen diferentes tipos de baterías como níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal hidruro y de iones de litio (Li-ion), estas baterías poseen elementos altamente contaminantes. En 2006 se estimó que se desecharon mil millones de celulares (Rahmani et al., 2014). Sin embargo, es difícil calcular con certeza los RAEE derivados de esta industria ya que estos pueden permanecer en casa de los usuarios por años, incluso cuando dejan de funcionar, o dejan de usarse (aunque sean funcionales) o por obsolescencia programada (Cucchiella et al., 2015). Este término se utilizó por primera vez cuando Bernard London lo acuñó en uno de sus ensayos en 1932 (London, 1932) y se popularizó en 1954 por Brooks Stevens, el cual lo llevó a la definición de obsolescencia planeada como: "Inculcar en el comprador el deseo de poseer algo un poco más nuevo, un poco mejor, un poco antes de lo necesario". De acuerdo con los datos de GSMA[2], hasta el día de hoy existen 5.8 mil millones de personas que poseen un dispositivo móvil en el mundo, lo cual significa que al 67.95% de la población mundial posee un dispositivo de este tipo (Turner, 2020). En el 2004, se estimó que se vendieron más de 180 millones de computadoras personales (PC), aproximadamente 100 millones de PC's fueron desechadas y en el mismo año alrededor de 315 millones de PC's quedaron obsoletas. Dejando a su paso una generación de aproximadamente 544,310 toneladas de plomo, 907 toneladas de cadmio y 1,814,369 toneladas de plástico (Babu et al., 2007; Daven & Klein, 2008). Otros materiales contaminantes presentes en su gran mayoría en las computadoras son resinas como ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), HIPS (*high-impact polystyrene*), PPO

2 Global System for Mobile Communications

(*polyphenylene oxide*), PPE (*polyphenylene ether*) y PVC (*polyvinyl chloride*) (Babu et al., 2007) que pueden resultar altamente tóxicos. Las pantallas y monitores de CRT, LCD y LED son consideradas una sección altamente generadora de RAEE. La composición de las pantallas o televisores de CRT son de mayor volumen en comparación con las de LCD. Por ejemplo, una TV y un monitor de CRT pesan aproximadamente 25 y 16 kilos respectivamente, en cambio las de LCD tienen un peso menor de aproximadamente 60% (10 y 5 kilos, para TV y CRT respectivamente). Esto se puede observar al hacer la comparación en gramos/unidad de tres de los principales materiales (vidrio, plástico, acero/hierro) contenidos en los monitores y/o pantallas de CRT y LCD. Por ejemplo, vidrio 15,760 vs 590, plástico 8,755 vs 1,780, acero/hierro 2,088 vs 2,530 en gramos/unidad para CRT vs LCD (Cucchiella et al., 2015). Los paneles fotovoltaicos (FV) se presentan como una tecnología alterna viable para la generación de energía limpia, debido a la intensa radiación que incide en la tierra, casi 127 mil TW de energía solar llegan a la tierra anualmente, de los cuales sólo 1.2 % se afirma que son aprovechables, es decir, 1,600 TW (Kabir et al., 2018) o aproximadamente 104 veces más de lo que la humanidad consume actualmente (Adachi et al., 2013). La industria solar FV se encuentra exclusivamente dominada por la tecnología convencional de semiconductores inorgánicos como el silicio policristalino, monocristalino y las celdas de película delgada. Esta tecnología actualmente representa un porcentaje bajo de generación de RAEE a nivel mundial. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (Stephanie Weckend et al., 2016) menos del 1% de los paneles FV que produjeron una potencia energética de 222 GW a finales del 2015 cumplieron su vida útil. Sin embargo, para el 2050 se proyecta una instalación de paneles FV que producirá 4,500 GW y por ende los desechos de paneles solares se incrementará. La vida útil promedio de un panel fotovoltaico es de hasta 30 años. Tomando en cuenta este último dato y la capacidad de desechos de paneles solares acumulados para el 2050, se tendrán alrededor de 60 a 70 millones de toneladas generadas de residuos de paneles FV (Stephanie Weckend et al., 2016); está estimación se puede observar en la Figura 5, donde el Escenario de pérdida-regular: supone una vida útil de 30 años para los paneles solares, sin desgaste anticipado, mientras que el Escenario de pérdida-temprana: tiene en cuenta una vida útil "temprana", "mediana edad" y fallas de "desgaste" antes de los 30 años.

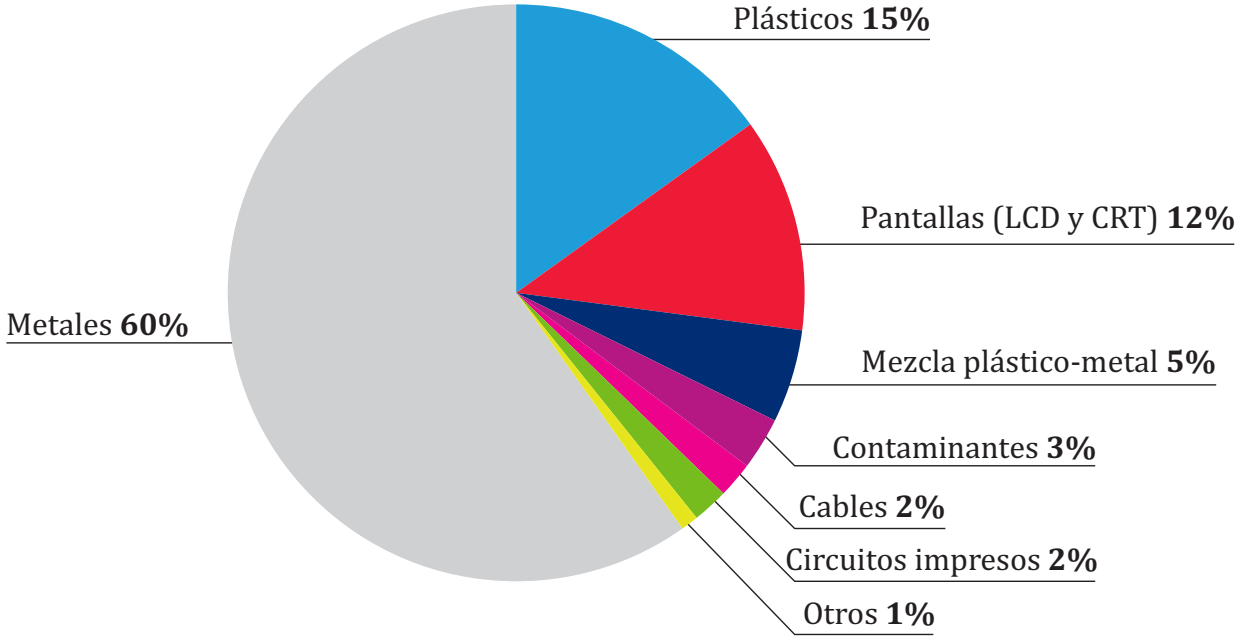
Figura 5. Estimación global de residuos de paneles fotovoltaicos, periodo 2016-2050



Fuente: Elaboración propia con datos basados del estudio de Stephanie Weckend et al. (2016) Definir pérdida-regular y pérdida temprana

Los RAEE contienen una combinación de materiales para hacer posible el funcionamiento y el diseño que el consumidor espera. Los tipos de RAEE se han clasificado en cinco categorías principalmente (Figura 6), las cuales son: i) metales-férreos, ii) plásticos, iii) metales no férreos, iv) vidrio y v) otros materiales como madera, caucho, cartón. Los metales-férreos como el hierro y el acero son los materiales más comunes de encontrarse en los RAEE y ambos pueden contribuir al 50% del peso total de los desechos; el segundo grupo que más peso aporta es el plástico, constituye aproximadamente el 21%; el tercer grupo incluye a los metales preciosos y representa un 13%; finalmente el porcentaje total lo conforman otros materiales como el vidrio. Además, se han encontrado más de 1,000 substancias tóxicas en los RAEE (Puckett et al., 2002), entre ellos los retardadores de llamas bromados (BFR, *brominated flame retardants*, en inglés), que contienen grupos orgánicos como: los bifenilos policlorados (BPCs), éteres bifenílicos polibromados (PBDEs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), entre otros. Así también algunos elementos tóxicos como: bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), litio (Li), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plata (Ag) (Kiddee et al., 2013). Lo cual genera una alta preocupación entre la comunidad científica y por lo que sugiere documentarse con la literatura generada sobre los RAEE, para conocer las propuestas que se han hecho y poder sugerir procesos alternos a los existentes para la gestión de estos residuos con metodologías y tecnologías que consideren principios de producción más limpia y economía circular de los residuos que incluyan procesos ecológicos o que minimicen el daño generado.

Figura 6. Fracciones de materiales típicos en RAEE



Fuente: Elaboración propia con datos adaptados del estudio de Widmer et al. (2005)

CIFRAS INTERESANTES SOBRE LOS RAEE

Parte fundamental para conocer el daño ocasionado por los RAEE, es conocer en cifras el impacto que generan. A continuación, se mencionan algunos datos que son preocupantes y que tienen un potencial educativo para concienciar acerca de los desechos generados por el uso de aparatos eléctricos y electrónicos.

Los RAEE representan el 2% de los desechos sólidos en el mundo, pero pueden llegar a ser el 70% de los residuos peligrosos que se encuentran en los rellenos (ONU, 2019) y se estima que para el 2040 los RAEE representen el 14% de las emisiones totales de carbono (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Además, sólo el 20% de los RAEE son reciclados y el 80% restante se incinera o termina en los rellenos sanitarios (World Economic Forum, 2019). La importancia del reciclaje de los RAEE tiene grandes beneficios ambientales y de salud, pero también su valor económico es considerable. Los RAEE al ser compuestos por más de 60 metales diferentes, se estima que su valor es de 48 mil millones de euros. Bullion Street, analizó que la industria electrónica consume 320 toneladas de oro y 7,500 toneladas de plata cada año y que la extracción urbana de desechos electrónicos podría generar $ 21 mil millones cada año (United Nations University, 2012). El valor calculado de los RAEE con un tratamiento de reciclaje adecuado rebasa los 62,500,000,000 de dólares anuales, lo cual supera al producto interno bruto (PIB) de algunos países (UN, 2019). Otro beneficio económico es que al reciclar 10,000 toneladas de desechos pueden crear los siguientes empleos: 1 empleo para incineración, 6 empleos en rellenos sanitarios, 36 empleos en centros de reciclaje y 296 empleos en el reciclaje de computadoras (ILSR, 2002). Aun cuando este es un problema global, actualmente sólo 67 países cuentan con una legislación ambiental para el manejo adecuado de los RAEE (World Economic Forum, 2019).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA, *Environmental Protection Agency*, en inglés) en EUA se desechan diariamente 416,000 celulares y 142,000 computadoras, mientras que anualmente se producen 1,000,000,000 de celulares y 300 millones de computadoras (Chandler, 2017). Se ha estimado que al reciclar un millón de celulares (148.4 toneladas) se pueden obtener 34 kilos de oro, 350 kilos de plata, 15 kilos de paladio y más de 16,000 kilos de cobre (Kumar et al., 2017).

El reciclaje de los RAEE ofrece un ahorro de energía, ya que al no producir estos la disminución de gases de efecto de invernadero será de uno de los efectos positivos más importantes. Por ejemplo, al reciclar 10 kg de aluminio se estima que el ahorro de energía es del 90%, se evitan aproximadamente 13kg de bauxita[3], 20 kg de dióxido de carbono (CO_2) y 0.11 kg de dióxido de azufre (SO_2) (Kumar et al., 2017). Otra ventaja de los RAEE es que el grado de concentración de metales en los electrónicos es mayor que los extraídos por la actividad minera. Por ejemplo, en promedio varios RAEE pueden contener 1,009 ppm de plata, 127 ppm de oro y 51.6 ppm de paladio, para el caso de la minería los valores son 215.5 ppm de plata, 1.01 ppm de oro y 2.7 ppm de paladio, lo cual es una diferencia significativa (Kumar et al., 2017).

DESTINO DE LOS RAEE

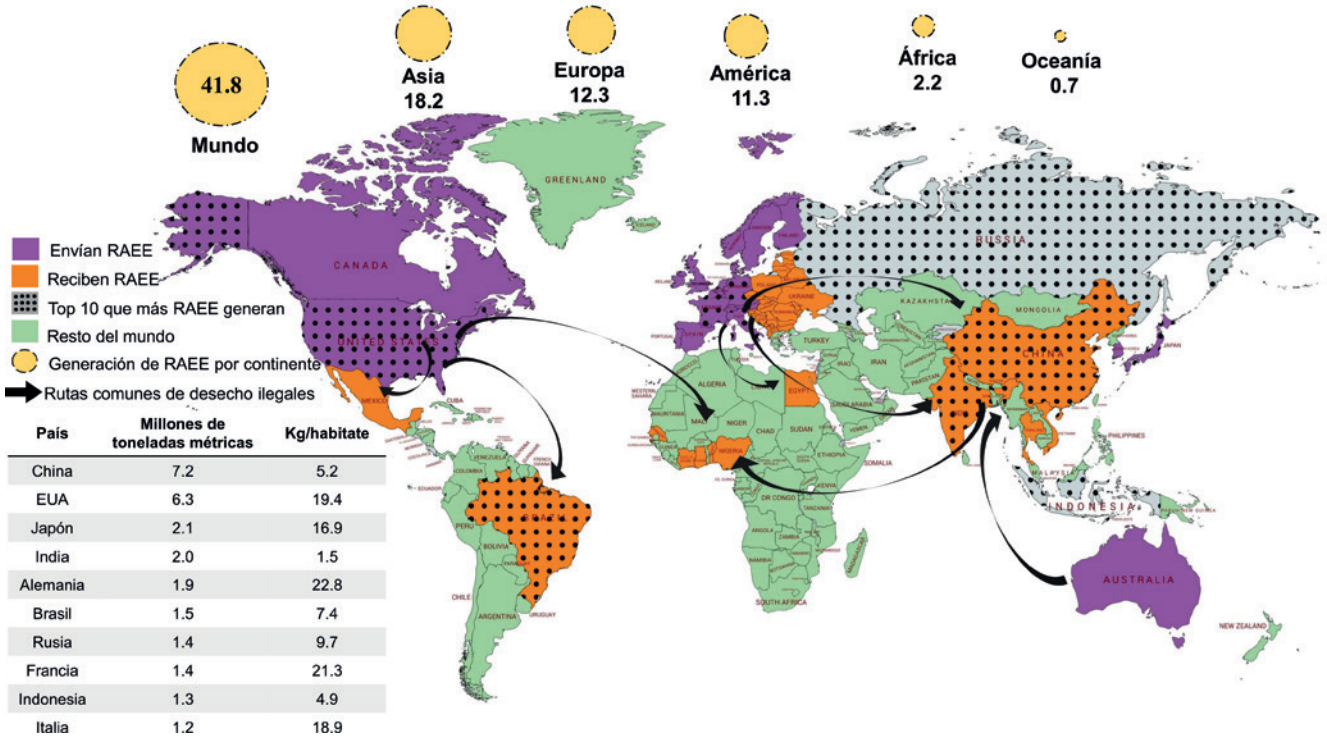
El código HS o código arancelario es un grupo de números que se asignan de acuerdo con el sistema de clasificación estandarizado internacionalmente a las importaciones y exportaciones entre países. Oficialmente se le conoce como Sistema Armonizado o en inglés como *Harmonized Commodity Description and Coding System* o *Harmonized System* o simplemente HS. Los códigos HS clasifican aproximadamente 8,000 productos, pero ninguno de estos incluye una categoría para los RAEE. Cuando un cargamento de este tipo ocurre, este solo tiene la opción de usar la clasificación de "electrónicos nuevos". Alrededor de 67 países cuentan con una legislación referente a los RAEE, lo cual comprende aproximadamente 2/3 del total de países del mundo (World Economic Forum, 2019). No obstante, existen regiones como África, América Latina y parte de Asia que no cuentan ninguna restricción sobre los RAEE. Por lo tanto, se vuelve más complicado hacer una estimación del volumen

3 Roca compuesta en su mayoría por alúmina y, en menores proporciones óxido de hierro y sílice. Es la fuente principal de donde se extrae el aluminio.

de intercambio o comercio de los RAEE de forma correcta. Por este motivo se han hecho diversas investigaciones al respecto, por ejemplo, en el trabajo de Hopson y Puckett mencionan que se rastrearon 205 DE con un sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*, en inglés). Del total de estos, el 74% (152 DE) se envió a un centro de reciclaje, el 25% (51 DE) fueron donaciones y el 1% restante (2 DE) a reventa, se observó que de los 152 DE, el 34% (69 DE) salieron del país en envíos ilegales a países como Hong Kong, China o Taiwán.

En la Figura 7 se presenta el mapeo de los desechos electrónicos, se describe (círculos amarillos) la cantidad en millones de toneladas que se produce mundialmente, así como las aportaciones que generan cada continente. Si se correlaciona el área de los continentes en km^2 y en función de la cantidad de desechos que generan, es de esperarse que Asia [44,579,000 km^2 (P. Prakashan, 2019)] ocupe el primer lugar. Lo que es preocupante es observar que Europa [10,180,000 km^2 (Cañellas Blanco y Castellano Alcaide, 2019)] siendo 4.3 veces menor del tamaño de Asia, posea el segundo lugar en generación de RAEE. También se muestra en la tabla indexada el top 10 de países (gris con puntos negros) que más RAEE producen en millones de toneladas métricas y la aportación calculada de kg/habitante (Baldé et al., 2017; Prasad, 2020). Asimismo, se muestran (color morado) las regiones que envían RAEE a otros países en su mayoría en forma ilegal (flechas negras). Por ejemplo, América del Norte envía a algunas regiones de América Latina y África; Europa a regiones como China, Corea del Sur, la India, África. Finalmente, se ilustra también la contraparte los países que más reciben RAEE (color naranja) los cuales son países como México, Brasil y algunas regiones en Europa, China, India y Tailandia.

Figura 7. Mapeo de desechos electrónicos



País	Millones de toneladas métricas	Kg/habitate
China	7.2	5.2
EUA	6.3	19.4
Japón	2.1	16.9
India	2.0	1.5
Alemania	1.9	22.8
Brasil	1.5	7.4
Rusia	1.4	9.7
Francia	1.4	21.3
Indonesia	1.3	4.9
Italia	1.2	18.9

Fuente: Elaboración propia con datos de World Economic Forum (2019); Baldé et al. (2017) y el uso de mapas de MapChart (2020)

IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE

Existen investigaciones (Babu et al., 2007; Grant et al., 2013; Hopson y Puckett, 2016) que han comprobado la enorme problemática que conlleva el manejo inadecuado de desechos de DE en rellenos sanitarios, debido a que estos se componen de elementos tóxicos como el Cd, Ni, Li, Cr, Cu, Pb, Sn, Hg, que generan problemas ambientales y a la salud del ser humano al no saberlos manipular. Los RAEE impactan de manera directa a las personas que se encuentran trabajando o viviendo cerca de los sitios de reciclaje o separación de éstos. La ingesta de estos contaminantes puede ocurrir por inhalación, absorción dérmica o digestiva de vapores o partículas de compuestos tóxicos producidas cuando se incineran o cuando los contaminantes penetran en el suelo, ya que pueden filtrarse al subsuelo, de manera que pueden llegar a las fuentes de consumo de agua (Kiddee et al., 2013). La población infantil, las mujeres embarazadas y los adultos mayores son los más vulnerables a este tipo de sustancias, ocasionando diversas enfermedades mencionadas en la Tabla 1.

Por ejemplo, una computadora en promedio pesa 29.6 kg, de lo cual el porcentaje en peso es 43.7% metal, 23.3% es plástico, 17.3% componentes electrónicos y 15.7% es vidrio. Para producir una computadora, así como un monitor se necesitan 1.5 toneladas de agua, 22 kilos de componentes y 240 kilos de combustibles fósiles, lo cual refleja en una pequeña escala todos los recursos energéticos no renovables y renovables que se requieren para la fabricación de estos dispositivos (Rahmani et al., 2014).

Los contaminantes tóxicos encontrados en los RAEE se pueden clasificar en dos grupos: 1) éteres de bifenilos poli bromados (PBDEs) y 2) metales pesados. Los PBDEs son popularmente usados como retardantes de llama. Diversas investigaciones han señalado a lo largo de los años la presencia de PBDEs en sangre, cabello y orina en personas por exposición directa o indirecta (Kiddee et al., 2013; Lechuga Vázquez y Paredes Rizo, 2014). Este hallazgo es considerado un riesgo potencial de salud debido a que los PBDEs están asociados a problemas de desestabilización del sistema hormonal-tiroideo, tumores y toxicidad neurológica, por mencionar algunos (Qu et al., 2007; Rocha-Gutiérrez et al., 2015). Por otra parte, se encuentran los metales pesados, se estima que el 70% de los metales pesados que llegan a los rellenos en EUA provienen de los RAEE (Lines et al., 2016). Estos pueden provocar serias afectaciones, como daños al bazo, riñones, dermatitis, asma y afectaciones neurodegenerativas como el Alzheimer (aluminio) y el Parkinson (plomo) (Grant et al., 2013). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los tipos de contaminantes comúnmente encontrados en RAEE, su aplicación en la industria y los impactos que pueden ocasionar en la salud.

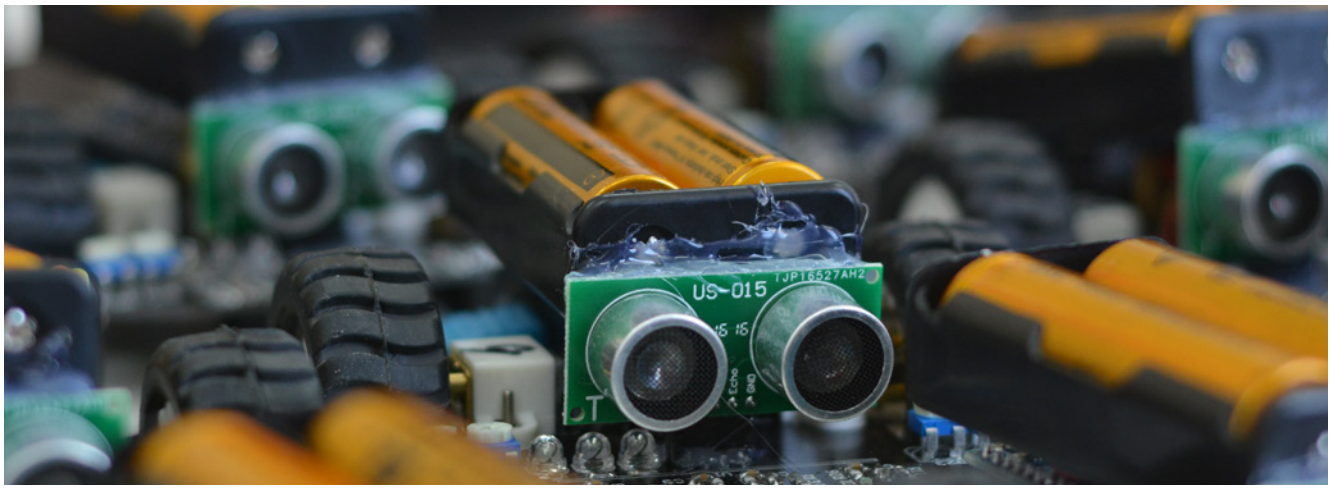


Foto de Frank Wang de Unsplash.

Tabla 1. Sustancias más comunes en los RAEE y sus impactos en la salud

Contaminantes orgánicos	**Aplicaciones en RAEE**	**Impactos en la salud, puede ocasionar:**
PBDEs	Plásticos para electrónicos para retardar consumo de un producto por fuego de circuitos, teclados y cables	Al arder produce vapores tóxicos que pueden ocasionar: cáncer, tumores en hígado, desestabilización del sistema hormonal tiroideo.
Elementos	**Aplicaciones en RAEE**	**Impactos en la salud, puede ocasionar:**
Cadmio	Resistencias de chip de dispositivos de montaje en superficie (SMD), detectores de infrarrojos, chips semiconductores, interruptores, muelles, conectores, PCB, baterías de NiCd, fotocopiadoras de tóner, tubos de rayos catódicos.	Respirar altos niveles de cadmio produce graves lesiones en los pulmones, irritación en el estómago e induce vómitos, diarrea y daños irreversibles en los riñones.
Litio	Baterías	Están conformadas por plomo, cromo, cobalto, cobre, níquel y talio. Pueden provocar efectos adversos de respiración, pulmonares y neurológicos.
Mercurio	Termómetros, sensores, equipo médico, lámparas, teléfonos celulares, baterías, tubos fluorescentes, algunas baterías e interruptores de luz.	Daños al cerebro e hígado, tos, dolores en el pecho, náusea, vómito, diarrea, aumentos en la presión arterial o en el ritmo cardíaco, erupciones de piel e irritación de los ojos.
Plomo	Monitores, soldaduras en PCB, tubos de rayos catódicos, lámparas, baterías,	Daños al sistema central y periférico nervioso, al sistema sanguíneo, reproductivo y al riñón. Debilidad en los dedos, las muñecas y los tobillos;

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de Grant (2013); Ramesh (2007); Puckett (2002); Cucchiella (2015)

ACCIONES QUE SE HAN IMPLEMENTADO A NIVEL MUNDIAL

La Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU) en el 2015 presentó la agenda de desarrollo sostenible e identificó 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), 169 metas para acabar con la pobreza, proteger al planeta y garantizar la prosperidad de todos en los próximos años. Al incrementarse los niveles de RAEE en el mundo estos impactan directamente de manera negativa en el medio ambiente, la salud pública y los ODS. Se ha identificado que su impacto en los ODS es del 30%, específicamente en los siguientes objetivos: Salud y bienestar (3), agua limpia y saneamiento (6), trabajo decente y crecimiento económico (8), ciudades y comunidades sostenibles (11), producción y consumo responsables (12), vida marina (14).

Además de los ODS, existen otros esfuerzos internacionales sobre el manejo de los RAEE para proteger la salud humana y del medio ambiente, como el convenio de Basilea en el cual

su meta fue la reducción de generación de desechos peligrosos y su movimiento transfronterizo; convenio de Estocolmo su objetivo consistió en la regulación de contaminantes orgánicos persistentes (COP) así como también promover prácticas y tecnologías para el remplazo de estos; convenio de Rotterdam este ayudó para establecer procedimientos sobre la importación y exportación de sustancias químicas peligrosas y plaguicidas; la Comisión para la Coo-peración Ambiental de América del Norte que consiste en la cooperación entre Estados Unidos, Canadá y México para la conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente; el convenio de Minamata con el objetivo de proteger la salud humana y del medio ambiente contra los efectos dañinos del mercurio, por mencionar algunos (Instituto Nacional de Ecología INECC, 2006). Todos estos están encaminados a tratar de regular el derrame ilegal, adoptar modelos de economía circular, brindar un tratamiento apropiado, promover la reutilización y el reciclaje de los RAEE. En la Tabla 2 se presenta más información de los ODS y las metas en el manejo de los RAEE propuestos por la ONU.

Tabla 2. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y metas con relación a los RAEE

Objetivo	Metas propuestas por la ONU
3. Salud y bienestar	3.9: "Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos…"
6. Agua limpia y saneamiento	6.1: "De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos"
	"6.3: De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos… aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización …"
8. Trabajo decente y crecimiento económico	8.3: "Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes…"
	8.8: "Proteger los derechos laborales y promover un entorno de trabajo seguro y sin riesgos para todos los trabajadores…personas con empleos precarios"
11. Ciudades y comunidades sostenibles	11.6: "De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo"
12. Producción y consumo responsables	12.4: "De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida … y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente"
	12.5: "De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización"
14. Vida marina	14. 1: "De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes".
	14.2: "De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes..."

Fuente: Elaboración propia utilizando datos basados en el estudio de Baldé (2017)

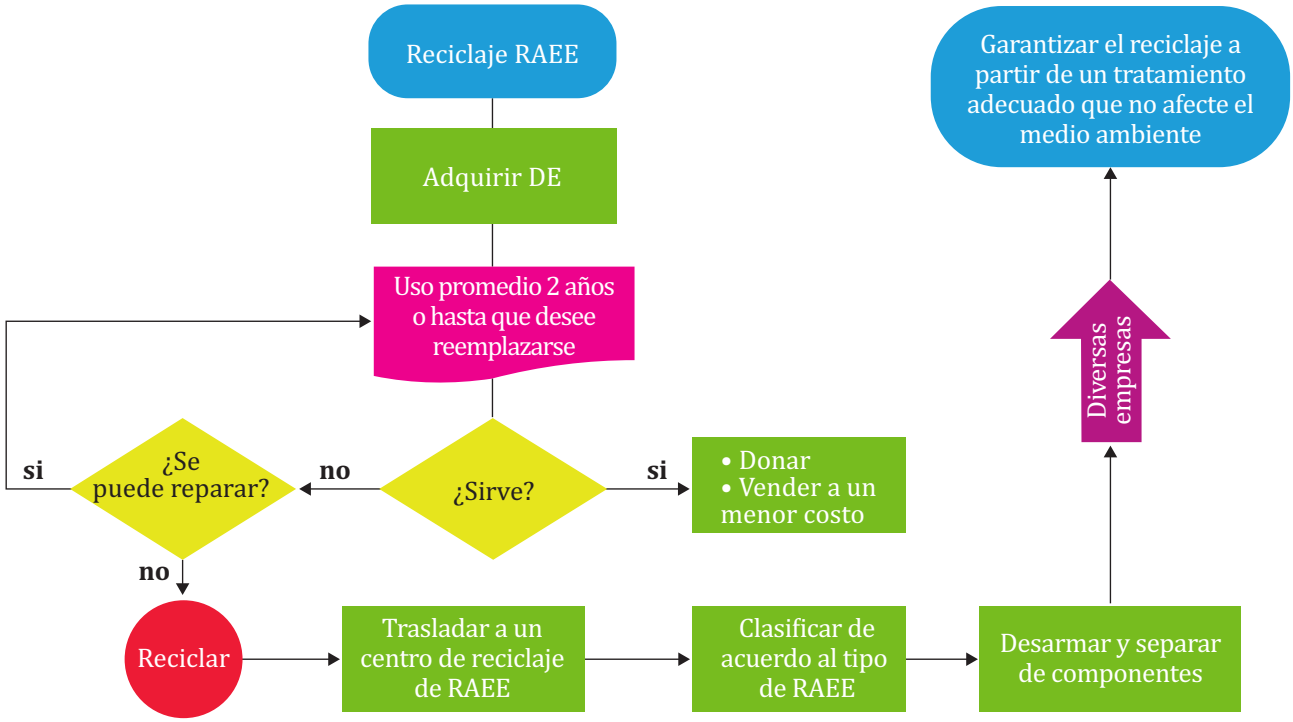
ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LA GENERACIÓN DE RAEE

Como se mencionó anteriormente, la importancia del manejo correcto de los RAEE es una pieza fundamental para evitar los daños a la salud pública y al ambiente (Dalrymple et al., 2007). Este gran problema del manejo de RAEE puede tener diversas razones, una de ellas es que los países desarrollados poseen un costo de jornada laboral alta y varias regulaciones para disposición final de estos residuos, por lo cual se exportan a países subdesarrollados. Estos a su vez, poseen herramientas y tecnologías más rudimentarias para la extracción/reciclaje de los RAEE (Perkins et al., 2014) y es de esperarse que estos sean recibidos en casi cualquier vertedero por su alto valor comercial (Tuncuk et al., 2012). Por otra parte, se estima que el 40% de la composición de los RAEE son metales de interés comercial, tales como cobre, plomo, estaño, mercurio, plata, oro, platino y paladio. Estos últimos, los metales preciosos, atraen gran interés por su alto valor comercial. (Hagelüken y Corti, 2010). Aunque su extracción está limitada debido a la compleja composición de metales en los desechos electrónicos, más del 80% del valor total de recuperación comprende metales preciosos (Ag, Au y Pt) y más del 95% del total de metales son básicos (Cu, Sn, Hg, Pb) (Diaz et al., 2017). Aunado a esto, los RAEE pueden contener de 25 a 250 veces más oro comparado con la cantidad encontrada en los minerales de los que se extraen estos metales en la actividad minera (Tuncuk et al., 2012). Además, el costo de extraer estos metales a partir de minerales es 13 veces más alto en yacimientos naturales que en RAEE (Zeng et al., 2018). Aun cuando esta actividad tiene un alto impacto económico, los metales en RAEE son reciclados y extraídos mediante herramientas de uso común como desarmadores, martillos y cinceles. Algunos otros ejemplos de extracción son las placas de circuitos impresos que son calentadas y los componentes son removidos; el oro y otros metales se extraen con baños de ácido; los plásticos son triturados y se funden, y en el caso del cobre, este se obtiene quemando el plástico que tiene como cubierta. Todo lo anterior mencionado con escasa o nula protección personal, lo cual conlleva a una actividad de alto riesgo para la integridad y salud del reciclador (Perkins et al., 2014). Es por ello, que en los últimos tiempos la comunidad científica ha enfocado su atención en el desarrollo de estrategias que incluyan métodos, procesos, protocolos y técnicas que no sólo permitan recuperar estos metales de los desechos electrónicos, principalmente los metales preciosos, sino, que consideren un buen uso de los desechos de DE, un manejo adecuado de estos y un reciclaje óptimo de RAEE con un enfoque de economía circular y amigables con el ambiente.

Se estima que el 40% de la composición de los RAEE son metales de interés comercial, tales como cobre, plomo, estaño, mercurio, plata, oro, platino y paladio, sobre todo estos últimos, los metales preciosos.

En la Figura 8, se presenta un diagrama de flujo como propuesta individual para estimular el seguimiento que los usuarios pueden realizar cuando desean deshacerse de sus dispositivos eléctricos y electrónicos. Esto con la finalidad de que los DE no estén almacenados en los hogares o negocios, así como también para evitar que terminen en rellenos sanitarios sin la gestión adecuada y de esta manera evitar contaminación ambiental y daños a la salud.

Figura 8. Diagrama de flujo de los RAEE



Fuente: Elaboración propia con base a los estudios de Cordova-Pizarro et al. (2019); Estrada-Ayub & Kahhat (2014)

Métodos teóricos

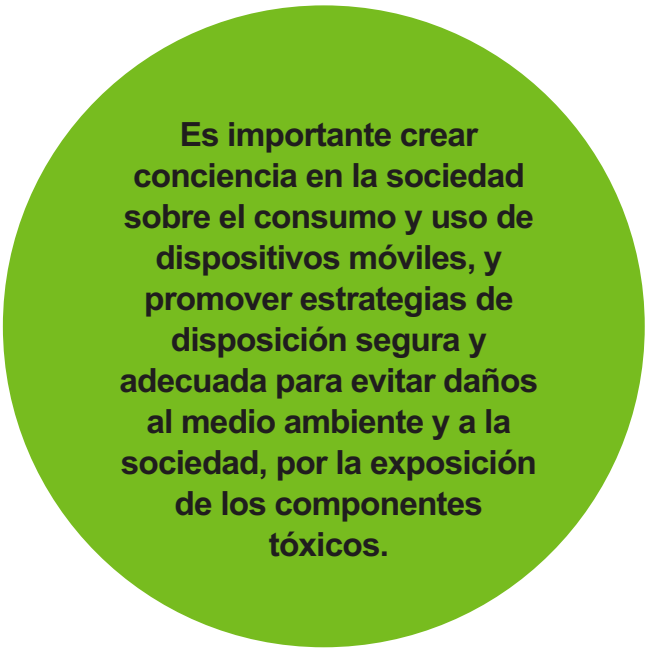
Dentro de los métodos teóricos existen investigaciones sobre la evaluación de métodos para la cuantificación de RAEE, los cuales generalmente se clasifican en cuatro categorías: 1) análisis relacionados con la eliminación, 2) análisis de series de tiempo (proyecciones), 3) modelos de factores (utilizando factores determinantes para la correlación) y 4) análisis de entrada-salida (Wang et al., 2013). Algunas otras investigaciones se han enfocado en buscar soluciones para evaluar la localización geográfica de plantas recicladoras. Esto por ejemplo se hizo con el método discreto de decisión de criterios múltiples llamado "método de organización de clasificación de preferencias para evaluaciones de enriquecimiento, PROMETHEE", (*Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*, en inglés) (Queiruga et al., 2008). También algunos países han incluido poco a poco nuevas y mejores políticas sobre la gestión y el mejor manejo de los RAEE; un claro ejemplo es Corea del Sur que introdujo en el 2003 el sistema de Responsabilidad Extendida del Productor (EPR, *Extended Producer Responsibility*, en inglés), el cual se define como un instrumento que obliga a los fabricantes e importadores de ciertos productos de consumo masivo, a organizar, desarrollar y financiar la gestión integral de los residuos derivados de sus productos una vez que el consumidor final los desecha. Para mejorar esta política EPR, Kim M. propuso la aplicación del método Delphi y el modelado del proceso de jerarquía analítica AHP (*Analytical Hierarchy Process*, en inglés) a la herramienta de gestión de RAEE en el proceso de formulación de políticas, con la finalidad de determinar la prioridad de los RAEE que se incluirán en el sistema de EPR (Kim et al., 2013). Otro análisis para ayudar en la toma de decisiones en el proceso del fin de la vida útil (EoL) de los RAEE, basadas en la reutilización, recuperación y reciclaje es el que propuso Rubin R.S (Rubin et al., 2014), donde se compararon dos procesos de tratamiento de placas de circuitos impresos (PCB) mediante la metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA, *Life Cycle Assessment*, en inglés).

Métodos experimentales

Actualmente los métodos experimentales más utilizados para separar los metales nobles y preciosos de desechos electrónicos son aquellos que implican la calcinación (pirometalurgia) y la lixiviación con ácidos concentrados (hidrometalurgia) (Leirnes y Lundstrom, 1983). Dentro de estos trabajos se encuentran el de Petter P. (Petter et al., 2014), en el cual se reportó la utilización de lo que comúnmente se llama agua regia (mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado) para la extracción de metales en placas de circuitos impresos. Con esta metodología se obtuvieron 880 g de oro y 376 kg de cobre por tonelada de residuos de PCB. Otros trabajos reportados han combinado la hidrometalurgia con procesos térmicos y de pirólisis para hacer más efectiva la extracción de los metales (Chen et al., 2013; Swain et al., 2015). En el trabajo reportado de Havlik T. (Havlik et al., 2010), se discute que al aumentar la temperatura de pirólisis se mejoró la extracción de cobre y estaño. Aun cuando los reportes científicos son en su mayoría enfocados a la recuperación de metales, también hay trabajos que se enfocan en la recuperación de polímeros. Por ejemplo, el trabajo de Achilias D.S. (Achilias et al., 2009), se centra en el reciclaje de tres tipos de polímeros: policarbonato (PC), poli (acrilonitrilo-butadieno-estireno) (PABS) y poliestireno (PS) con técnicas como la disolución/re-precipitación y pirólisis.

Sin embargo, todos los métodos mencionados presentan grandes desventajas, en el caso de la pirometalurgia esta produce grandes cantidades de gases tóxicos como el óxido de nitrógeno y requiere de equipos especiales para manejar altas temperaturas. Similares efectos pasan con la hidrometalurgia ya que esta implica un consumo excesivo de ácidos concentrados (Leirnes y Lundstrom, 1983). En un proceso hidrometalúrgico convencional esta situación da como resultado el consumo excesivo de ácidos que no son reutilizados, se incrementan los costos y los desechos generados durante el proceso (Kaya, 2016).

Diversos son los esfuerzos que se han hecho para proponer métodos con menores impactos, tal es el caso de Yue C. (Yue et al., 2017), que propuso un método químico de bajo costo e impacto ambiental, basado en el uso combinado de N-bromosuccinimida (NBS) y piridina (Py), lo cual llevó a obtener una alta selectividad de lixiviación del Au sobre otros metales, mostrando un gran potencial para la aplicación práctica industrial hacia la obtención sostenible del oro a partir de minerales y desechos electrónicos. Otros métodos propuestos llamados ecológicos o verdes que han logrado importantes resultados por la alta tasa de recuperación de RAEE y el bajo impacto ambiental son los trabajos de Estrada-Ruiz R.H y de Jadhao P., en los cuales propusieron: 1) un proceso de flotación inversa para la separación eficiente y limpia de las fracciones metálicas y no metálicas sin generar contaminación al usar solo agua y aire durante la operación (Estrada-Ruiz et al., 2016); y 2) la utilización del proceso de quelación ecológica, con este proceso se logró una recuperación del 83.8% del cobre metálico, mientras que solo el 27% de este mismo metal se pudo recuperar usando el método de lixiviación ácida (Jadhao et al., 2016).



Enfoque electroquímico

Como se planteó anteriormente, se han realizado varios enfoques novedosos sobre la recuperación de metales para proporcionar una respuesta real a los actuales requisitos sobre legislación ambiental, entre ellos se incluyen métodos bio-químicos y electroquímicos. Estos últimos han demostrado ser más ecológicos debido a que su principal reactivo es el electrón, un "reactivo limpio" (Fogarasi et al., 2013). Bajo ese contexto, un método fácil y efectivo para la recuperación de metales contenidos en RAEE basados en los trabajos de Chu Y. e Imre-Lucaci F., (Chu et al., 2015; Imre-Lucaci et al., 2009) muestran la recuperación de cobre, mediante un proceso de electrólisis que consiste en el galvanizado de piezas metálicas con metales provenientes de RAEE. La electrólisis, es un proceso donde la energía eléctrica se transforma en energía química. El proceso se lleva a cabo en un electrolito, el cual es una solución acuosa que contiene iones libres, capaces de producir la corriente eléctrica mediante la transferencia de los iones entre dos electrodos, estos electrodos a su vez están conectados a una corriente directa (Alvarado-Flores y Ávalos-Rodríguez, 2013) en una celda electroquímica. Si se aplica un potencial y una corriente eléctrica, los iones positivos -cationes- se desplazan al cátodo mientras que los iones negativos -aniones- se dirigen al ánodo. En diversos trabajos de investigación (Diaz et al., 2017; Diaz y Lister, 2018; Lister et al., 2014) se han propuesto procesos electroquímicos para la regeneración de los oxidantes requeridos en la extracción de metales mediante un análisis RMS (Response Surface Methodology, en inglés). La ventaja de este proceso es que los tiempos de proceso pueden reducirse significativamente porque la extracción y recuperación de metales se realizan simultáneamente. Los procesos electroquímicos pueden resultar una solución atractiva para resolver problemas comúnmente presentados en procesos hidrometalúrgicos e integrarse como etapas previas en dichos procesos, ya que permite la reutilización de ácidos en la solución de lixiviación de metales, reduciendo significativamente los impactos ambientales y los costos operativos asociados con la generación de residuos y el consumo de productos químicos. Un claro ejemplo es la electrónica de un celular, su reciclaje puede generar 1 kg de plata y 235 g de oro por tonelada de estos, mientas que la actividad minera solo promedia 100 g de plata en cada tonelada de mineral extraído y de 2 a 5 g de oro por tonelada de mineral, lo cual lleva a necesitar de 17 veces menos de energía para la recuperación de RAEE en comparación con materiales vírgenes (Smedley, 2020).

CONCLUSIONES

Como sociedad, se está viviendo en una era donde el consumo y adquisición de bienes hace que sea más cómoda la vida cotidiana. Dentro de estos bienes se encuentran los dispositivos eléctricos y electrónicos, como la televisión, computadoras, tabletas, paneles fotovoltaicos y celulares, entre los principales. Sin embargo, estos tienen un tiempo de uso relativamente corto, provocado por diferentes causas, tales como daños, obsolescencia o simplemente porque se adquiere un modelo más reciente o con nuevas funcionalidades. Debido a esto, los dispositivos "viejos" pasan a convertirse en desechos electrónicos, cuya cantidad en los últimos años se ha incrementado muy rápidamente, provocando un problema de contaminación ambiental y paralelamente se vuelve un problema de desigualdad social. Por lo que se destaca la importancia de crear conciencia en la sociedad sobre el consumo y uso de estos, y promover estrategias de disposición segura y adecuada para evitar daños al medio ambiente y a la sociedad, por la exposición de los componentes tóxicos mencionados en ellos.

Como parte de las acciones a tomar, diversos países del mundo han identificado y evaluado las tendencias globales referentes a la cantidad y composición de los RAEE, y han comenzado a implementar normativas para regular y prevenir los RAEE, aunque aún queda mucho camino por recorrer. Por otra parte, la comunidad científica

ha sumado esfuerzos para desarrollar novedosos procesos electroquímicos de reciclaje de RAEE, que son menos contaminantes, más amigables al ambiente y relativamente menos costosos. Para lograr una reducción significativa y un reciclaje adecuado de los RAEE es importante brindar información a los usuarios sobre qué hacer con sus desechos eléctricos y electrónicos, a dónde deben llevarlos y por qué es importante hacerlo de manera sustentable.

Finalmente, la importancia del desarrollo sustentable reside en que se debe velar por el mejoramiento de la calidad de vida en toda actividad humana. Tomar conciencia y acciones sobre los RAEE que pueden ayudar a disminuir las emisiones de gases tóxicos, generar un descenso de los residuos destinados a incineración y contribuir a que se reduzcan los residuos de basura electrónica que terminan en vertederos, evitando así problemas socio ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Energías Renovables (IER) e Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el espacio de trabajo brindado, a la Dra. Hailin Zhao Hu por su invaluable apoyo en los laboratorios de Celdas Híbridas 204-205 del IER-UNAM. A Barcelona Activa-innoBAdora por el curso de capacitación de emprendimiento de Dulce Kristal Becerra Paniagua y Araceli Hernández Granados en Barcelona, España. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de doctorado de Dulce Kristal Becerra Paniagua. Y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por la beca postdoctoral otorgada a Araceli Hernández Granados.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores confirmamos que no hay conflictos de intereses y que no existe un apoyo financiero significativo para este trabajo que pueda haber influido en su resultado.

REFERENCIAS

Achilias, D. S., Antonakou, E. V., Koutsokosta, E. and Lappas, A. A. (2009). Chemical recycling of polymers from Waste Electric and Electronic Equipment. *Journal of Applied Polymer Science, 114*(1), 212–221. https://doi.org/10.1002/app.30533

Adachi, M., Tanino, R., Adachi, J., Mori, Y., Tsuchiya, K., Isoda, S. and Uchida, F. (2013). Verification of necessity of one-dimensional titania nanoscale materials for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources, 226*, 94–100. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.024

Alvarado-Flores, J. and Ávalos-Rodríguez, L. (2013). Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). *Revista Mexicana de Física, 59*(1), 66–87. http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v59n1/v59n1a1.pdf

Babu, B. R., Parande, A. K. and Basha, C. A. (2007). Electrical and electronic waste: A global environmental problem. *Waste Management and Research, 25*(4), 307–318. https://doi.org/10.1177/0734242X07076941

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. and Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM 2017/Global-E-waste Monitor 2017 .pdf

Blaisdell-Vidal, S. F. (2019). *Alternativas para el manejo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) principalmente computadoras* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/E28C8JAK5F49U9EMXSRDFE7493HRI727P4URBI586CD8DAAM7A-02264?func=find-b&REQUEST=SERGIO+FERNANDO+BLAISDELL+VIDAL&find_code=WRD&ADJACENT=N&local_base=TES01&x=72&y=12&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=

Cañellas Blanco, A. M. y Castellano Alcaide, J. M. (2019). *Ámbito Lingüístico y Social. Geografía Humana.* Editex, S.A. ISBN: 978-84-9161-998-7

Cesaro, A., Belgiorno, V., Vaccari, M., Jandric, A., Chung, T. D., Dias, M. I., Hursthouse, A. and Salhofer, S. (2018). A device-specific prioritization strategy based on the potential for harm to human health in informal WEEE recycling. *Environmental Science and Pollution Research, 25*(1), 683–692. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0390-7

Chandler, D. (2017). *Strategic Corporate Social Responsibility: Sustainable Value Creation*. https://books.google.com.mx/books?id=q4CzDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Chen, M., Wang, J., Chen, H., Ogunseitan, O. A., Zhang, M., Zang, H. and Hu, J. (2013). Electronic waste disassembly with industrial waste heat. *Environmental Science and Technology, 47*(21), 12409–12416. https://doi.org/10.1021/es402102t

Chu, Y., Chen, M., Chen, S., Wang, B., Fu, K. and Chen, H. (2015). Micro-copper powders recovered from waste printed circuit boards by electrolysis. *Hydrometallurgy, 156*, 152–157. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.06.006

Cordova-Pizarro, D., Aguilar-Barajas, I., Romero, D. and Rodriguez, C. (2019). Circular economy in the electronic products sector: material flow analysis and economic impact of cellphone e-waste in Mexico. *Sustainability, 11*(5), 1361. https://doi.org/10.3390/su11051361

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C. and Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51*, 263–272. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010

Culver, J. (2015). *The life cycle of the CPU*. http://www.cpushack.com/life-cycle-of-cpu.html

Dalrymple, I., Wright, N., Kellner, R., Bains, N., Geraghty, K., Goosey, M. and Lightfoot, L. (2007). An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling. *Circuit World, 33*(2), 52–58. https://doi.org/10.1108/03056120710750256

Daven, J. I. and Klein, R. N. (2008). *Progress in waste management research*. Nova Science, Publishers, Inc, pp. 93–102.

Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B. and Gidarakos, E. (2009). Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials, 161*(2–3), 913–919. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.054

Ellen MacArthur Foundation. (2018). The circular economy opportunity for urban & industrial innovation in China. *Circular Economy Perspectives Series*, 1–166. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/The-circular-economy-opportunity-for-urban-industrial-innovation-in-China_19-9-18_1.pdf

Estrada-Ayub, J. A. and Kahhat, R. (2014). Decision factors for e-waste in Northern Mexico: To waste or trade. *Resources, Conservation and Recycling, 86*, 93–106. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.012

Estrada-Ruiz, R. H., Flores-Campos, R., Gámez-Altamirano, H. A. and Velarde-Sánchez, E. J. (2016). Separation of the metallic and non-metallic fraction from printed circuit boards employing green technology. *Journal of Hazardous Materials, 311*, 91–99. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.061

Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Ilea, P. and Imre-Lucaci, Á. (2013). The environmental assessment of two new copper recovery processes from Waste Printed Circuit Boards. *Journal of Cleaner Production, 54*, 264–269. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.044

Fondo Monetario Internacional. (2019). *Perspectivas de la economía mundial. Desaceleración mundial de la actividad manufacturera, crecientes barreras comerciales*. ISSN 1564-5215 (online)

Grant, K., Goldizen, F. C., Sly, P. D., Brune, M. N., Neira, M., van den Berg, M. and Norman, R. E. (2013). Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review. *The Lancet Global Health, 1*(6), e350–e361. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3

Hagelüken, C. and Corti, C. W. (2010). Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through "design for recycling." *Gold Bulletin, 43*(3), 209–220. https://doi.org/10.1007/BF03214988

Havlik, T., Orac, D., Petranikova, M., Miskufova, A., Kukurugya, F. and Takacova, Z. (2010). Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials, 183*(1–3), 866–873. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.107

Hopson, E. and Puckett, J. (2016). *Scam Recycling: e-Dumping on Asia by US Recyclers, Basel Action Network, USA*. https://wiki.ban.org/images/1/12/ScamRecyclingReport-web.pdf

ILSR. (2002, February). *Recycling Means Business - Institute for Local Self-Reliance*. https://ilsr.org/recycling-means-business/

Imre-Lucaci, F., Dorneanu, S. A. and Ilea, P. (2009). Electrochemical metals recovery from electronic wastes. Part. I. copper recovery from synthetic solutions. *Studia Universitatis Babes-Bolyai Chemia, SPEC. ISSUE 1*, 105–111. https://www.researchgate.net/profile/Sorin_Dorneanu/publication/294494630_Electrochemical_metals_recovery_from_electronic_wastes_Part_I_copper_recovery_from_synthetic_solutions/links/56d5cd5208aee1aa5f730b22/Electrochemical-metals-recovery-from-electronic-wastes-Part-I-copper-recovery-from-synthetic-solutions.pdf

Instituto Nacional de Ecología INECC. (2006). *Diagnóstico sobre la Generación de Residuos Electrónicos en México.* SEMARNAT. http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/res_electronicos_borrador_final.pdf

Jadhao, P., Chauhan, G., Pant, K. K. and Nigam, K. D. P. (2016). Greener approach for the extraction of copper metal from electronic waste. *Waste Management, 57*, 102–112. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.023

Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A. and Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 894–900. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094

Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. In *Waste Management, 57*, 64–90. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004

Kiddee, P., Naidu, R. and Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Management, 33*(5), 1237–1250. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006

Kim, M., Jang, Y. C. and Lee, S. (2013). Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool. *Journal of Environmental Management, 128*, 941–948. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.049

Kumar, A., Holuszko, M. and Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling, 122*, 32–42. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018

Lechuga Vázquez, P. y Paredes Rizo, M. . L. (2014). Efectos biológicos derivados de la exposición a PBDES en trabajadores del reciclaje de e-waste: revisión sistemática. *Medicina y Seguridad Del Trabajo, 60*(237), 685–713. https://doi.org/10.4321/s0465-546x2014000400008

Leirnes, J. S. and Lundstrom, M. S. (1983). *Method for working-up metal-containing waste products*. https://www.google.com/patents/US4415360

Lines, K., Garside, B., Sinha, S. and Fedorenko, I. (2016). *Clean and inclusive? Recycling e-waste in China and India Issue paper Sustainable markets* (Issue March). https://pubs.iied.org/pdfs/16611IIED.pdf

London, B. (1932). Ending the depression through planned obsolescence. *Self-Published*, 1–8. https://faculty.bemidjistate.edu/mlawrence/London.pdf

Long, E., Kokke, S., Lundie, D., Shaw, N., Ijomah, W. and Kao, C. chuan. (2016). Technical solutions to improve global sustainable management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in the EU and China. *Journal of Remanufacturing, 6*(1), 1–27. https://doi.org/10.1186/s13243-015-0023-6

MapChart. (2020). *World Map - Detailed - MapChart*. https://mapchart.net/detworld.html

Ongondo, F. O., Williams, I. D. and Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management, 31*(4), 714–730. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023

ONU. (2019). *Los desechos electrónicos, una oportunidad de oro para el trabajo decente*. https://news.un.org/es/story/2019/04/1455621

Perkins, D. N., Brune Drisse, M. N., Nxele, T. and Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health, 80*(4), 286–295. https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001

Petter, P. M. H., Veit, H. M. and Bernardes, A. M. (2014). Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. *Waste Management, 34*(2), 475–482. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.032

Prakashan, P. (2019). *General Knowledge 2019* (Prabhat Prakashan (ed.)). ISBN : 9789352665976

Prasad, M. N. V. (2020). *Handbook of Electronic Waste Management International Best Practices and Case Studies.* Butterworth-Heinemann. eBook ISBN: 9780128170311

Puckett, J., Byster, L., Westervelt, S., Gutierrez, R., Davis, S., Puckett, J. and Smith, T. (2002). *Exporting Harm The High-Tech Trashing of Asia*. Svt C. http://svtc.org/wp-content/uploads/technotrash.pdf

Qu, W., Bi, X., Sheng, G., Lu, S., Fu, J., Yuan, J. and Li, L. (2007). Exposure to polybrominated diphenyl ethers among workers at an electronic waste dismantling region in Guangdong, China. *Environment International, 33*(8), 1029–1034. https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.05.009

Queiruga, D., Walther, G., González-Benito, J. and Spengler, T. (2008). Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management, 28*(1), 181–190. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.11.001

Rahmani, M., Nabizadeh, R., Yaghmaeian, K., Mahvi, A. H. and Yunesian, M. (2014). Estimation of waste from computers and mobile phones in Iran. *Resources, Conservation and Recycling, 87*, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.009

Rocha-Gutiérrez, B. A., Peralta-Pérez, M. D. R. y Zavala-Díaz de la Serna, F. J. (2015). Revisión global de los contaminantes emergentes PBDE y el caso particular de México. In *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 31*(3), 311–320. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000300010

Rubin, R. S., Castro, M. A. S. De, Brandão, D., Schalch, V. and Ometto, A. R. (2014). Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *Journal of Cleaner Production, 64*, 297–305. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051

Smedley, T. (2020). *How to mine precious metals in your home*. BBC Future. https://www.bbc.com/future/article/20200407-urban-mining-how-your-home-may-be-a-gold-mine

Stenvall, E., Tostar, S., Boldizar, A., Foreman, M. R. S. J. and Möller, K. (2013). An analysis of the composition and metal contamination of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Waste Management, 33*(4), 915–922. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.022

Stephanie Weckend, Andreas Wade and Garvin Heath. (2016). *End of Life Management Solar PV Panels.* https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_ieapvps_end-of-life_solar_pv_panels_2016.pdf

Swain, B., Mishra, C., Kang, L., Park, K. S., Lee, C. G. and Hong, H. S. (2015). Recycling process for recovery of gallium from GaN an e-waste of LED industry through ball milling, annealing and leaching. *Environmental Research, 138* (2015), 401–408. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.027

Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y. and Deveci, H. (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering, 25*(1), 28–37. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019

Turner, A. (2020). *How many people have smartphones in 2020?* Bank My Cell. https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world

UN. (2019). *UN report: Time to seize opportunity, tackle challenge of e-waste | UNEP - UN Environment Programme*. https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/un-report-time-seize-opportunity-tackle-challenge-e-waste

United Nations University. (2012). *E-waste: Annual Gold, Silver "Deposits" in New High-Tech Goods Worth $21 Billion+; Less Than 15% Recovered* - United Nations University. https://unu.edu/media-relations/releases/step-news-release-6-july-2012-e-waste-precious-metals-recovery.html

Wang, F., Huisman, J., Stevels, A. and Baldé, C. P. (2013). Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input-Output Analysis. *Waste Management, 33*(11), 2397–2407. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.005

Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. and Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review, 25*(5 SPEC. ISS.), 436–458. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001

Wong, M. H., Wu, S. C., Deng, W. J., Yu, X. Z., Luo, Q., Leung, A. O. W., Wong, C. S. C., Luksemburg, W. J. and Wong, A. S. (2007). Export of toxic chemicals - A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling. *Environmental Pollution, 149*(2), 131–140. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.044

World Economic Forum. (2019). *A New Circular Vision for Electronics Time for a Global Reboot*. January, 24. http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf

Worldometer. (2020). *Population by Country (2020) - Worldometer*. https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/

WOS. (2020). Web of Science [v.5.33] - *Colección principal de Web of Science Búsqueda básica*. www.webofknowledge.com

Yang, H., Ma, M., Thompson, J. R. and Flower, R. J. (2018). Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. *Journal of Epidemiology and Community Health, 72*(3), 237–243. https://doi.org/10.1136/jech-2016-208597

Yue, C., Sun, H., Liu, W.-J., Guan, B., Deng, X., Zhang, X. and Yang, P. (2017). Environmentally benign, rapid, and selective extraction of gold from ores and waste electronic materials. *Angewandte Chemie, 129*(32), 9459–9463. https://doi.org/10.1002/ange.201703412

CONTRIBUCIÓN DE LA CADENA PRODUCTIVA DE LA ENERGÍA EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ARGENTINA

CONTRIBUTION OF THE ENERGY VALUE CHAIN IN ARGENTINA'S GREENHOUSE GAS EMISSIONS

Maxime Le Bail [1]

Recibido: 22/06/2020 y Aceptado: 30/09/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (132 -145)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Ant Rozetsky de Unsplash.

1 Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. México.
maximelebail@hotmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1386-7370

RESUMEN

Este artículo presenta las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de Argentina, detallando su procedencia por sector, analiza la Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) comprometida ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y la factibilidad de que se cumpla, y estudia las implicaciones de la pandemia de coronavirus Covid-19 sobre las emisiones del país. De manera transversal, hace énfasis en el sector energético y demuestra su fuerte contribución en los GEI totales del país. Lo anterior se realiza mediante el estudio de las comunicaciones oficiales del país, de la CMNUCC, de la Agencia Internacional de Energía y del Programa de las Naciones Unidas para Medio Ambiente, así como de diversos artículos de investigación y de notas periodísticas.

Palabras clave: Cambio Climático, Gases de Efecto Invernadero, Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional, INDC, Energía, Covid-19, Argentina.

ABSTRACT

This paper gives an overview of the emissions of greenhouse gases (GHG) in Argentina, detailing their origin by sector; then, it analyzes the Intended Nationally Determined Contributions (INDC) presented to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the feasibility of their compliance, and studies the implications of the coronavirus pandemic Covid-19 on the country's emissions. In a transversal way, it emphasizes on the energy sector and demonstrates its wide contribution to the country's total GHG. This is done by analizing the official communications of the country, of the UNFCCC, of the International Energy Agency and of the United Nations Environment Programme, as well as several research papers and articles in the medias.

Keywords: *Climate Change, Greenhouse Gases, Intended Nationally Determined Contributions, Energy, INDC, Covid-19, Argentina.*

Se analiza la INDC comprometida por Argentina ante la CMNUCC y la factibilidad de que sea cumplida, así como las implicaciones de la actual pandemia de coronavirus Covid-19 sobre las emisiones del país.

INTRODUCCIÓN

Argentina ha asumido compromisos ante la comunidad internacional en materia de combate al cambio climático al presentar su Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) en octubre de 2015, antes de la vigésimo primera reunión de la Convención de las Partes celebrada en París donde se firmó el Acuerdo homónimo, posteriormente ratificado y promulgado por el país mediante la Ley 27270.

Siendo un país con una matriz energética dominada casi exclusivamente por los recursos fósiles, y cuyo consumo energético final es compuesto en un 75% de derivados de petróleo y gas natural (Agencia Internacional de Energía, 2020), las emisiones del sector energético en Argentina representan poco más de la mitad de las emisiones totales (Moreira Muzio, M., 2019), por lo que el cumplimiento de dichos compromisos implica inevitablemente la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en ese sector.

Para lograrlo, el país ha desarrollado el Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático y ha emprendido varias acciones que tienden a la disminución de las emisiones de GEI. Sin embargo, a la par, se siguen impulsando las actividades de explotación de hidrocarburos convencionales y no-convencionales, lo que podría poner en riesgo los compromisos asumidos.

Por otro lado, la pandemia de Covid-19 podría participar en la reducción de emisiones: para enfrentarla, el país ha tomado fuertes medidas de contingencia, restringiendo la movilidad de las personas al establecer un aislamiento social, preventivo y obligatorio para toda la población y tomando diversas medidas en materia de transporte público, por lo que la demanda de petrolíferos y la quema de combustibles ha disminuido considerablemente; por ende, las emisiones deberían de haber disminuido en ese sector durante el 2020.

Entonces, ¿qué medidas considera Argentina para disminuir sus emisiones en el sector energético? ¿Serán suficientes para cumplir a cabalidad con los compromisos adquiridos? ¿La pandemia de Covid-19 habrá contribuido lo suficiente en la reducción de emisiones?

Este ensayo presenta las emisiones de GEI de Argentina, analiza la INDC comprometida por el país ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y la factibilidad de que sea cumplida, y estudia las implicaciones de la actual pandemia de coronavirus Covid-19 sobre las emisiones del país. De manera transversal, hace énfasis sobre la contribución del sector energético.

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ARGENTINA

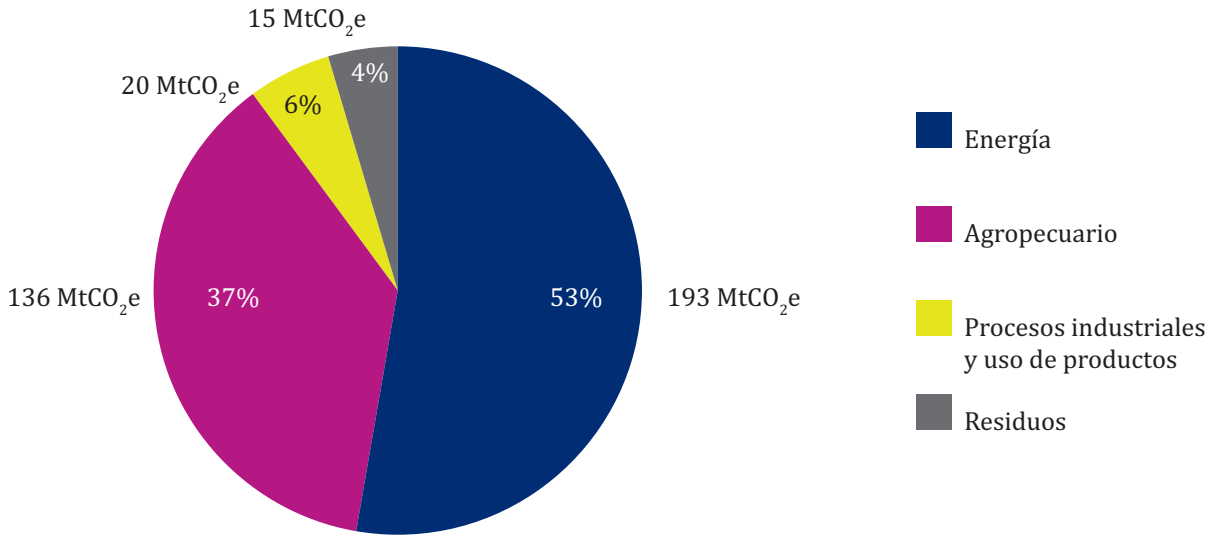
La Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Argentina reporta que 364 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente ($MtCO_2e$) de GEI fueron emitidas en 2016 en el país (Moreira Muzio, M., 2019). Lo anterior representa cerca del 0.7% de las emisiones totales a nivel mundial (UNEP, 2016) y posiciona a Argentina como el vigésimo noveno país que más GEI emite. Entre 1990 y 2016, sus emisiones de GEI aumentaron un 35%.

De esos 364 millones de toneladas, 232 $MtCO_2e$ son de dióxido de carbono (CO_2), representando cerca del 64% de las emisiones totales del país, mientras que 79 $MtCO_2e$ son de metano (CH_4), 48 $MtCO_2e$ de óxido nitroso (N_2O), 5 $MtCO_2e$ de Hidrofluorocarbono, y menos de un millón de toneladas de CO_2e de perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Con una población total de 43.51 millones de habitantes (Ourworldindata.org, 2020) y un Producto Interno Bruto (PIB) de alrededor de 447 mil millones de dólares (Ourworldindata.org, 2020), ello representa la emisión de 8.37 toneladas de CO_2 equivalente per cápita y 814 tCO_2e por millón de dólares de PIB.

Poco más de la mitad de dichas emisiones (el 53%) fueron emitidas por el sector energía con 193 $MtCO_2e$ emitidas, mientras que el 37% fue emitido por el sector agropecuario (136 $MtCO_2e$), el 6% por los procesos industriales y el uso de productos (20 $MtCO_2e$), y el 4% por los residuos (15 $MtCO_2e$).

Figura 1. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por sector en Argentina en 2016



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Moreira Muzio, M. (2019)

El sector energía

El sector energía emitió 193 $MtCO_2e$ en 2016, representando poco más de la mitad de las emisiones totales del país durante dicho año (Moreira Muzio, M., 2019).

Este sector incluye todas las emisiones de GEI que emanan de la combustión de combustibles fósiles, que representan el 94% de las emisiones de este sector, y las emisiones fugitivas, que representan el 6% restante.

Dentro de las emisiones que emanan de la combustión de combustibles fósiles, cabe resaltar la fuerte participación de la industria de la energía: la refinación del petróleo, la fabricación de combustibles sólidos y otras industrias energéticas, y la producción de electricidad y calor representan el 33% de las emisiones en este sector; por su parte, el transporte representa el 26% de las emisiones de este sector, mientras que la quema de combustibles de uso residencial, comercial y agropecuario representa el 18%, delante de la quema de combustibles de la industria manufacturera y de la construcción que representa el 17%. A lo definido por Moreira Muzio, M. (2019), faltaría agregar la extracción de hidrocarburos que genera amplias emisiones.

Este sector duplicó sus emisiones en las tres últimas décadas, conociendo un aumento de 97.9 $MtCO_2e$ en ese periodo, al pasar de 95.5 $MtCO_2e$ en 1990 a 193 $MtCO_2e$ en 2016. El aumento fue particularmente fuerte a partir del año 2000, año que corresponde tanto al inicio del aumento de la producción de gas natural en el país, como del consumo de derivados de petróleo, gas natural y electricidad (Moreira Muzio, M., 2019).

Según la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2019), el 96% de las emisiones en este sector fueron de CO_2, debido a la quema de los combustibles fósiles.

El sector agropecuario

El sector agropecuario emitió 136 $MtCO_2e$ en 2016, representando el 37% de las emisiones totales del país en ese año (Moreira Muzio, M., 2019).

En este sector, se incluyen la gestión de ganado vivo y de estiércol, que representan el 41% de las emisiones de este sector, así como las emisiones de los suelos gestionados y las emisiones de la aplicación de fertilizantes, que representan el 36% de las emisiones, y las emisiones y absorciones de tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, y otros tipos de uso de la tierra, que representan el 23% de las emisiones en este sector.

Sus emisiones han oscilado constantemente, conociendo un aumento de +33% entre 1990 y 2000 al pasar de emitir 158.8 $MtCO_2e$ a 211 $MtCO_2e$, debido particularmente a una fuerte intensificación de la agricultura en el país. A raíz de la crisis de 2001, la producción bajó hasta llegar a emitir 177.7 $MtCO_2e$ en 2010, antes de aumentar nuevamente en 2012 a 194.8 $MtCO_2e$. Desde 2012, las emisiones de este sector están disminuyendo de manera continua (Moreira Muzio, M., 2019). Lo anterior revela, de manera global, una disminución de 22.3 $MtCO_2e$, cerca del 15%, en las emisiones de este sector entre 1990 y 2016.

Los GEI en este sector son, en orden de importancia, el CH_4 (43%) debido a la crianza bovina principalmente, el N_2O (34%) debido al uso de fertilizantes, y el CO_2 (23%) debido al cambio de uso de suelo para los cultivos (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Procesos industriales y uso de productos

Los procesos industriales y el uso de productos emitieron 20 $MtCO_2e$ en 2016, representando aproximadamente el 6% de las emisiones totales de GEI del país en ese año (Moreira Muzio, M., 2019).

Este sector incluye todas las emisiones de GEI generadas como resultado de la reacción entre materias primas empleadas en diferentes procesos químicos.

Las emisiones de este sector provienen en un 35% de la industria de los minerales, así como de la industria de los metales que representa el 26% de las emisiones en este sector, mientras que el uso de productos y la industria química representan respectivamente el 26% y el 13%.

El sector multiplicó sus emisiones por 2.4 desde 1990, conociendo un aumento de 11.7 $MtCO_2e$ en ese periodo al pasar de emitir 8.4 $MtCO_2e$ a 20.1 $MtCO_2e$. Dicho aumento fue relativamente constante, a una tasa de 0.45 $MtCO_2e$ por año, conociendo su mayor aceleración en el periodo post-crisis 2001 debido a la reactivación de la economía y del sector secundario (Moreira Muzio, M., 2019).

Dicho sector emite particularmente CO_2 (71%) e hidrofluorocarbonos (28%), principalmente debido a la producción de cemento, de hierro y acero (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Residuos

Los residuos emitieron 15.4 $MtCO_2e$ en 2016, representando aproximadamente el 4% de las emisiones totales de GEI del país en ese año (Moreira Muzio, M., 2019).

En el sector se incluyen las emisiones de GEI que se generan debido a la disposición, tratamiento y gestión de residuos sólidos y de aguas residuales.

Las emisiones de este sector provienen en un 58.9% de la eliminación de residuos sólidos, y en un 40.9% del tratamiento de aguas residuales. El 0.2% restante proviene de la incineración de residuos.

Este sector duplicó sus emisiones en las tres últimas décadas, pasando de 7.6 $MtCO_2e$ en 1990, a 15.4 $MtCO_2e$ en 2016. Su aumento ha sido constante sobre este periodo, a una velocidad de 0.3 $MtCO_2e$ por año (Moreira Muzio, M., 2019).

Los GEI generados en este sector son principalmente el CH_4 (94%) y el N_2O (6%) (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019).

Así, si bien el sector procesos industriales y el uso de productos es el que conoció el mayor aumento, en cifras brutas es el sector energía que mayor aumento conoció en el periodo 1990-2016. Ante este panorama, Argentina ha desarrollado algunos compromisos de reducción de emisiones que fueron presentados algunas semanas antes de la Vigésimo Primera Conferencia de las Partes (COP 21).

CONTRIBUCIÓN PREVISTA Y DETERMINADA A NIVEL NACIONAL DE ARGENTINA

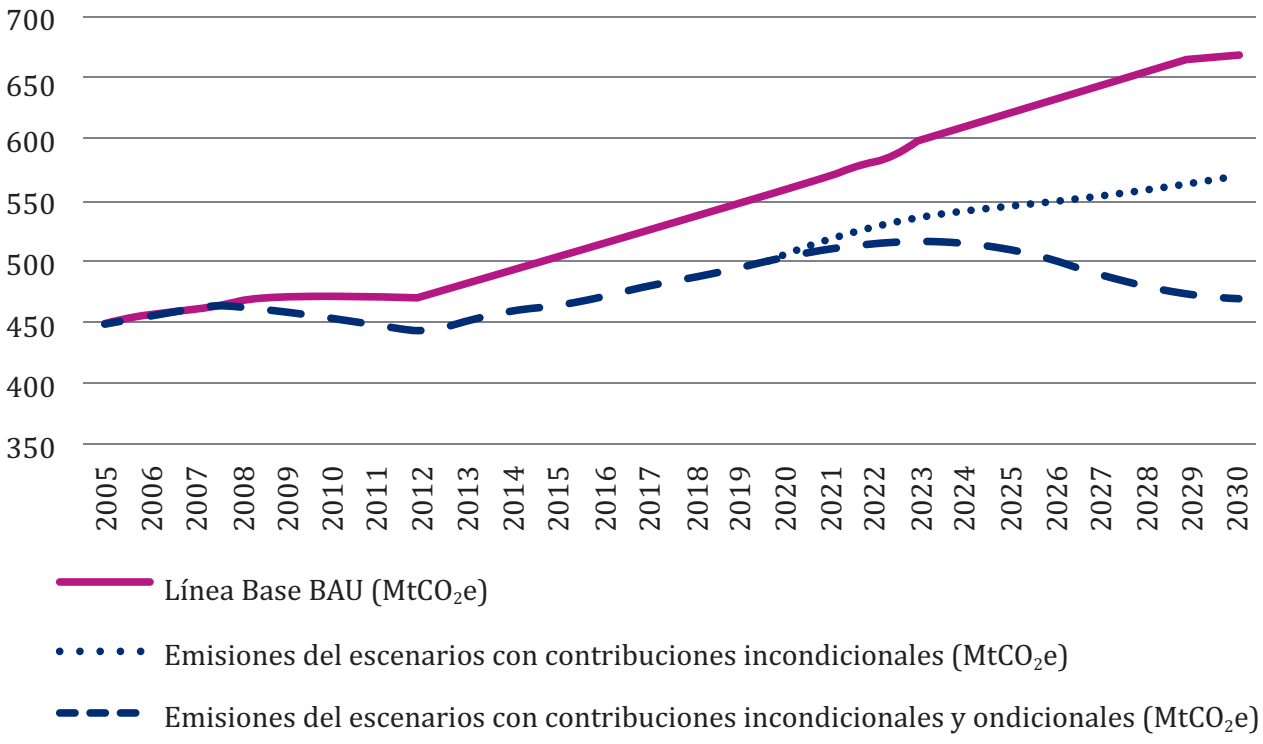
Argentina presentó su INDC el 1 de octubre de 2015, antes de la COP 21, realizada en París, Francia. Después de firmar y ratificar el Acuerdo de París, el país tomó la decisión de realizar un esfuerzo de revisión de su INDC, por lo que sometió un nuevo documento el 17 de noviembre de 2016 en el marco de la COP 22 (CMNUCC, sin fecha).

El INDC fue desarrollada con base en los resultados de la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina sobre Cambio Climático (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015), misma que toma en cuenta el Inventario Nacional de GEI de 2012 que reporta emisiones del orden de 429 $MtCO_2e$. Las cifras que se mencionan a continuación podrán entonces diferir de las presentadas anteriormente en este ensayo.

Entrega de la INDC

En la primera entrega de la INDC (República Argentina, 2015), Argentina presentó un escenario de línea de base *Business as usual* (BAU) con una proyección que inicia en el año 2005 con 450 $MtCO_2e$ y llega al año 2030 con emisiones de GEI equivalentes a 670 $MtCO_2e$. La meta incondicional de reducción pretendía la reducción de 15% de emisiones para el año 2030 con respecto de su BAU, es decir que Argentina llegaría a emitir 570 $MtCO_2e$ en ese año. Aunado a la meta incondicional, Argentina propuso reducir de manera condicionada el 30% de las emisiones de GEI para 2030 de recibir financiamiento internacional, transferencia de tecnologías y capacitación adecuada, entre otros; el país estaría entonces emitiendo 470 $MtCO_2e$.

Figura 2. Proyección de emisiones de Argentina al año 2030 según un escenario de línea de base BAU, y la reducción de emisiones gracias a la meta incondicional y la meta condicionada

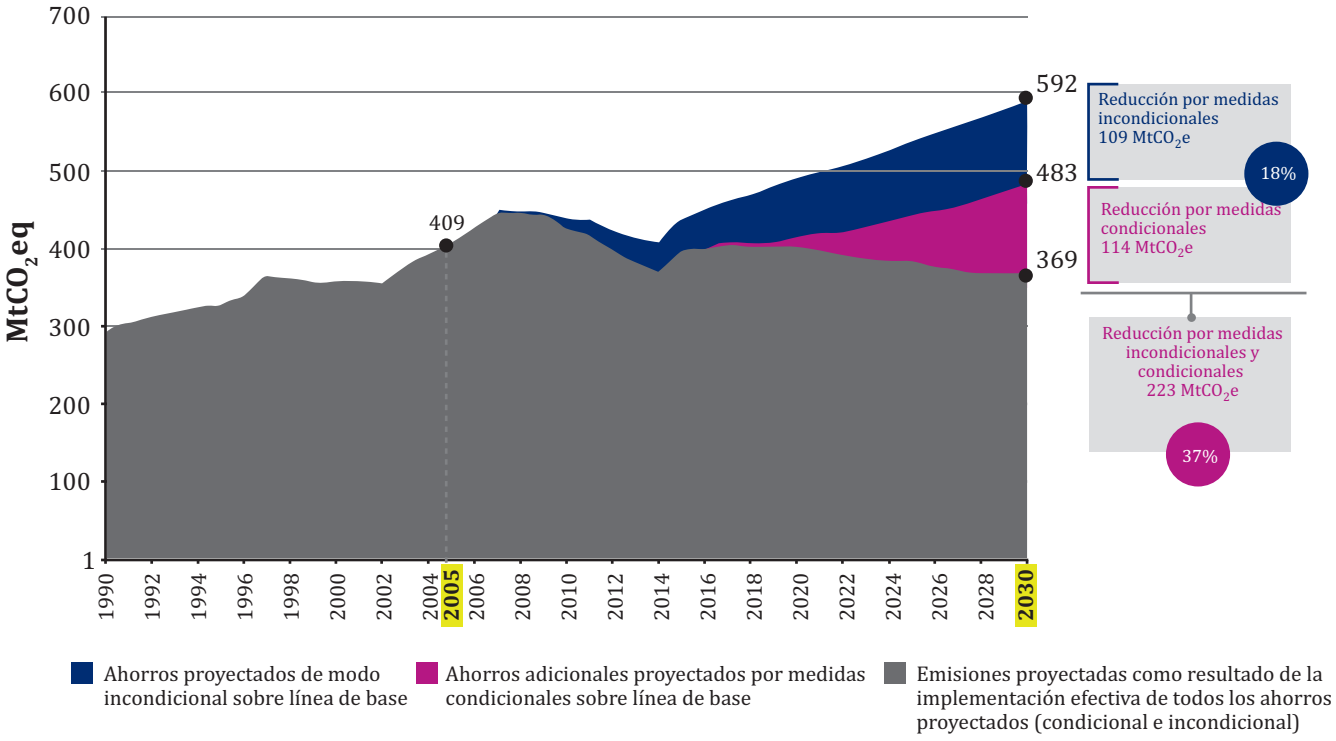


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de República Argentina (2015)

Primera revisión de su INDC

En la primera revisión de su INDC (República Argentina, 2016), Argentina presenta una nueva línea de base BAU que empieza en alrededor de 300 $MtCO_2e$ en 1990 y alcanza 592 $MtCO_2e$ en 2030. De manera incondicional, se compromete a realizar una reducción de 18% equivalente a 109 $MtCO_2e$ sobre esta proyección, lo que significaría que el país no deberá emitir más que 483 $MtCO_2e$ en 2030. Aunado a lo anterior, de manera condicionada, propone una reducción de hasta 37%, equivalente a una reducción de 223 $MtCO_2e$; el país estaría emitiendo entonces 369 $MtCO_2e$ en 2030, una cifra similar a lo que se emitió en 2016.

Figura 3. Proyección de emisiones de Argentina al año 2030 según un escenario de línea de base BAU, y la reducción de emisiones gracias a la meta incondicional y la meta condicionada, derivado de la primera revisión de su INDC



Fuente: República Argentina (2016)

Cabe resaltar las grandes diferencias entre el primer escenario presentado en 2015 y el segundo escenario presentado en 2016 donde existe una discrepancia de 50 $MtCO_2e$ para el año 2005 (datos históricos) y de hasta 78 $MtCO_2e$ para la proyección al año 2030. Por ende, la declaración relativa a que su contribución fue mejorada "planificando medidas de mitigación incondicionales que logran bajar su meta al 2030 de 570 a 483 millones de tCO_2eq" debe ser moderada; Argentina reconoce que ello es principalmente debido al "cambio a metodología" utilizada para estimar las emisiones, entre la INDC y su primera revisión, lo que permitió "mejorar la calidad del inventario evitando la sobreestimación de las emisiones agrícolas". Finalmente, la "revisión de más de 50 medidas incondicionales y la incorporación de nuevas medidas más ambiciosas" habrán resultado únicamente en la reducción adicional de 9 $MtCO_2e$. De igual manera, la revisión de las metas condicionadas aportó únicamente la reducción adicional de 19 $MtCO_2e$.

Aunada a la tímida revisión de sus compromisos, Argentina no explicita las medidas que tomará para lograr dicha reducción; sólo menciona lo siguiente: "la meta se logrará a través de la implementación de una serie de medidas a lo largo de la economía, focalizando en los sectores de energía, agricultura, bosques, transporte, industria y residuos".

En cambio, existe mucho mayor grado de detalle respecto a las acciones de adaptación que el país se compromete a emprender: "ampliación

de las redes de monitoreo, el fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana y los servicios climáticos para la salud, seguridad alimentaria, el agua, la energía y la reducción de riesgos de desastres", "impulso a proyectos de I+D y de tecnologías como así también de buenas prácticas productivas", "mapeo de vulnerabilidades y riesgos climáticos como herramienta de diagnóstico del estado de situación y apoyo a la gestión de la adaptación al cambio climático", "cuantificación económica de los impactos del cambio climático", "creación de capacidades en recursos humanos y la mejora en la coordinación interinstitucional para la planificación y gestión, en temas de adaptación al cambio climático", etc.

El Gobierno de Argentina justifica su postura explicando que el país sólo emite el 0.7% de las emisiones mundiales de GEI, mientras que su contribución de mitigación revisada representa una participación de 2.7% sobre el total de las reducciones no condicionadas para 2030 comunicadas por las Partes de la CMNUCC, las cuales se elevan a 4,000 $MtCO_2e$ (UNEP, 2016).

No obstante, es menester resaltar el esfuerzo del Gobierno de Argentina para desarrollar planes sectoriales para reducir emisiones de GEI y adaptarse al cambio climático. En particular, el Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático (Gabinete Nacional de Cambio Climático, Ministerio de Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017) merece ser destacado.

Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático

La INDC presentada por Argentina ante la CMNUCC no fue muy explícita respecto a las medidas que se tomarán para disminuir las emisiones en el sector energético del país. La publicación del Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático (Gabinete Nacional de Cambio Climático, Ministerio de Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2017) permitió no sólo compensarlo sino también dar un rumbo para lograr el compromiso de no rebasar 483 $MtCO_2e$ en 2030.

Dicho Plan presenta una serie de políticas, medidas y acciones para a) abastecer de energía limpia y sostenible, b) acompañar el crecimiento productivo y poblacional, c) fomentar el uso responsable de la energía, y d) promover la eficiencia energética. Tiene la pretensión de evitar la emisión de 77 $MtCO_2e$ en 2030, lo que representa el 70% de su meta no condicionada total, así como de adaptar la infraestructura de generación, transporte y distribución de energía para disminuir su vulnerabilidad ante los efectos adversos del cambio climático.

El Plan pretende actuar tanto sobre la oferta de energía como sobre la demanda, e implica medidas de mitigación relativas a la eficiencia energética, al desarrollo de energías renovables, la promoción de los biocombustibles y la generación a gran escala de energía a partir de centrales nucleares e hidroeléctricas, la sustitución de petróleo por gas natural y el incremento de la eficiencia de las centrales térmicas. Pretende la disminución de los combustibles fósiles en la matriz energética del país, los cuales serían sustituidos por energía procedente de las renovables y de centrales nucleares. En materia de generación eléctrica, pretende aumentar considerablemente la proporción de las energías renovables (de 2% a 25%), así como la del nuclear (de 6% a 15%), a la par con una fuerte disminución de la proporción de la energía térmica (de 66% actualmente a 31%) en 2030.

Es de reconocer que dicho Plan está muy bien elaborado y contiene medidas pertinentes y ambiciosas para reducir las emisiones de aquí a 2030. Sin embargo, la intensificación de la producción de gas natural, así como la explotación de yacimientos no convencionales en Vaca Muerta, ambos promovidos en la política energética actual del país, se contraponen con el objetivo establecido en el presente Plan de disminuir la importancia de los combustibles

fósiles en la matriz energética del país y generarán invariablemente un aumento de las emisiones de CH_4 en el sector energético.

En efecto, varios estudios recientes revelan la importancia de las emisiones de CH_4 a lo largo de la cadena de valor del sector hidrocarburos. Le Bail et al. (2019) explican que la contribución del sector hidrocarburos se debe a que "el CH_4 es uno de los principales componentes del gas natural, mismo que es liberado a la atmósfera -de manera deliberada o accidental- durante la producción, procesamiento y transporte del petróleo y gas natural" por lo que determinan que "el papel que pueda tener el gas natural dentro de las estrategias globales de descarbonización de la matriz energética depende en gran medida de la minimización de las emisiones de CH_4 de la cadena de valor del sector hidrocarburos".

Alrededor de 1/4 de las emisiones totales serían de CH_4, las cuales provendrían en un 40% de emisiones fugitivas durante la producción de gas natural.

En su tesis de maestría, Álvarez, J. M. (2017) estima que las emisiones de GEI debido a la producción de combustibles fósiles en Argentina alcanzan 26.7 $MtCO_2e$, donde cerca del 48% corresponde a emisiones provenientes de la fase de producción: un poco más de 36% de las emisiones totales provendrían de la combustión de gas (*flaring*) durante la producción de petróleo y gas, mientras que 11.5% provendrían de fugas. Alrededor de 1/4 de las emisiones totales serían de CH_4, las cuales provendrían en un 40% de emisiones fugitivas durante la producción de gas natural. Ello comprobaría que, toda vez que difícilmente se pueden controlar las emisiones fugitivas, a mayor intensidad de la producción de gas natural, existen mayores emisiones de CH_4.

Las emisiones de CH_4 serían todavía más importantes en la explotación de yacimientos no convencionales. En un estudio de Howarth et al. (2011), en el cual estiman las emisiones de CH_4 del ciclo de vida del gas natural, los autores llegan a la conclusión que estas emisiones pueden ser especialmente elevadas en la extracción de recursos no convencionales: estiman que "entre 3.6% y 7.9% del metano obtenido gracias a la producción de gas no convencional escapa a la atmósfera debido al venteo y fugas a lo largo del ciclo de la vida del pozo", lo que representaría "un aumento de 30% y quizás más del doble de la producción de gas convencional". Explican que las mayores emisiones de CH_4 en la producción de gas shale se debe principalmente al escape de las emisiones durante la perforación, que es mucho más intensa que en la producción convencional, y por los fluidos de retorno, también en volúmenes más importantes que en la producción convencional. El estudio de Honty, G. (2014) coincide con esta postura, y agrega que las emisiones fugitivas pueden ocurrir durante la fase de perforación, durante el fracturamiento hidráulico, durante la fase de producción y, también, durante la fase de abandono si los pozos abandonados no están sellados de manera adecuada.

Así, para alcanzar las metas comprometidas en la INDC gracias a la mitigación de los GEI en el sector energético, la política energética del país deberá ser adaptada para ser congruente con el Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático. En particular, se considera que para luchar eficazmente contra el cambio climático y obtener resultados prontos, Argentina deberá reorientar los estímulos creados mediante las resoluciones 74/2016 y 46E/2017 referentes a los nuevos proyectos de gas natural y la explotación de yacimientos no convencionales hacia el aprovechamiento de energía renovable y nuclear.

Finalmente, es la pandemia de Covid-19 la que podría tener mayor participación sobre la reducción de las emisiones de GEI en el sector energético.

IMPLICACIONES DE LA PANDEMIA DE COVID-19 SOBRE LAS EMISIONES DE GEI EN LA CADENA PRODUCTIVA DE ENERGÍA EN ARGENTINA

La declaración de pandemia de Covid-19 emitida por la Organización Mundial de la Salud el 11 de marzo de 2020 ha generado diversas reacciones por parte de los gobiernos alrededor del mundo, dentro de las cuales la decisión de declarar un confinamiento, así como el paro temporal de ciertas actividades industriales, ha sido muy frecuente. Lo anterior provocó una disminución global de la demanda del petróleo y otros combustibles necesarios para transportarse y para realizar diversas actividades económicas. Ello habría provocado una caída en las emisiones mundiales de los gases de efecto invernadero.

De acuerdo con el análisis realizado por Le Quéré et al. (2020), las emisiones de GEI habrían disminuido un 17% el 7 de abril, el pico de máximo contagio de la epidemia, con respecto a la misma fecha en 2019, y el total de emisiones evitadas a nivel mundial entre enero y abril sería de 1,048 $MtCO_2e$, mientras que especifican que las emisiones evitadas a futuro "dependerán de la duración y extensión del confinamiento". Según dicho estudio, las emisiones de GEI en Argentina habrían disminuido un 27.3% en ese mismo periodo.

La reducción de las emisiones se explicaría, en parte, por la menor demanda energía: el primero de abril, Bidegaray, M. (2020) declaraba "desde el inicio de la cuarentena, la demanda eléctrica cayó en un promedio del 23%. La caída más fuerte fue en las industrias (exceptuando alimentación y electro-intensivas), donde disminuyó un 60%". La caída de la demanda, aunado a la baja de los precios del petróleo, ha generado una disminución de las actividades de exploración y extracción de hidrocarburos en el país; es el caso en Vaca Muerta donde la rentabilidad de los proyectos ha sido particularmente afectada y cuestiona la permanencia del proyecto (Watts, J., 2020), mientras que varias refinerías del país suspendieron parcial o completamente sus operaciones (Garrison, C., 2020). La pandemia podría contribuir, en cierta medida, al cumplimiento de la INDC presentada por el país ante la CMNUCC.

Sin embargo, Le Quéré et al. (2020) advierten que "los cambios observados en las emisiones en 2020 serán probablemente temporales toda vez que no derivan de cambios estructurales en los sistemas económicos, de transporte o energéticos". Posterior a la pandemia, las emisiones se reanudarán y podrían incluso incrementar cuando se reactive la economía del país.

Fatih Birol, director ejecutivo de la Agencia Internacional de Energía, concluye que, si se quiere tener una disminución sostenible de las emisiones, es necesario desarrollar "las políticas energéticas correctas, incluso en los paquetes de estímulo en países individuales y a nivel mundial" (Joselow, M., 2020). Es algo que Argentina deberá tener en cuenta para reducir de manera duradera sus emisiones en el sector energético.

Se tiene la oportunidad de planear adecuadamente una transición energética que sustituya los recursos fósiles por energías renovables, y que promueva la eficiencia energética, con la posibilidad de disminuir fuertemente sus emisiones de GEI.

CONCLUSIÓN

En 2014, las emisiones de Argentina fueron de 368 $MtCO_2e$. Lo anterior representó cerca del 0.7% de las emisiones totales a nivel mundial y posicionó a Argentina como el vigésimo noveno país que más GEI emite.

La contribución del sector energético en ese total es importante: desde 1990, duplicó sus emisiones, hasta llegar a emitir 193 $MtCO_2e$ en 2016, lo que representó el 53% de las emisiones totales de GEI del país. En ese mismo periodo, las emisiones totales de GEI han aumentado un 35%, lo que revela que el crecimiento de las emisiones de GEI derivado del sector energético ha aumentado a un ritmo más elevado que el crecimiento de las emisiones totales de GEI en el país.

Es natural entonces que los esfuerzos de mitigación de las emisiones se enfoquen en ese sector; si bien la INDC revisada de Argentina anuncia poco con el compromiso no condicionado de reducir un 18% sobre una línea base probablemente inflada, el Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático permitiría el cumplimiento del 70% de dicha meta de reducción al evitar la emisión de 77 $MtCO_2e$ para 2030 mediante la aplicación de diversas medidas en el sector energético.

Sin embargo, estos anuncios deben ser acompañados de una voluntad política real que implica, entre otros, la disminución de la exploración y extracción de los combustibles fósiles y, particularmente, el abandono de la explotación de recursos no convencionales con el fracturamiento hidráulico en Vaca Muerta, y su sustitución progresiva por energías renovables y más limpias.

A falta de voluntad política, la pandemia de Covid-19 iniciada a finales de 2019 provocó una disminución consecuente de GEI en el sector debido a una menor producción y traslados limitados; además, con la caída de la demanda de petrolíferos en el mundo y la disminución exacerbada del precio del barril de petróleo, la explotación de Vaca Muerta se ha vuelto inviable y las actividades en la región han sido detenidas temporalmente.

Pero ¿qué pasará cuando termine la pandemia? ¿Argentina regresará a explotar sin medida Vaca Muerta y sus reservorios de gas natural y de petróleo hasta que éstos se agoten? Como los demás países, Argentina se encuentra en un momento en el cual es indispensable reflexionar sobre el futuro que se desea; se tiene la oportunidad de planear adecuadamente una transición energética que sustituya los recursos fósiles por energías renovables, y que promueva la eficiencia energética, con la posibilidad de disminuir fuertemente sus emisiones de GEI. Esta pandemia de Covid-19, finalmente, tal vez es lo que necesitaba la humanidad para reflexionar acerca de un futuro más sostenible.

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energía. (2020). *Key energy statistics, 2018*. Total primary energy supply (TPES) by source, Argentina 1990-2017. Recuperado el 25/07/2020 en: https://www.iea.org/countries/argentina

Álvarez, J. M. (2017). *Emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de gas y petróleo en Argentina. Situación y Perspectivas* (Tesis de Maestría). Centro de Estudios de la Actividad Regulatoria Energética (CEARE). Argentina. Recuperado el 25/07/2020 en: https://www.ceare.org/tesis/2017/tes18.pdf

Bidegaray, M. (2020). *Coronavirus en Argentina: cae 23% el consumo de electricidad en la primera semana de cuarentena.* Clarín. 01/04/2020. Recuperado el 13/06/2020 en: https://www.clarin.com/economia/economia/coronavirus-argentina-cae-23-consumo-electricidad-primera-semana-cuarentena_0_968Atlwxi.html

Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (Sin fecha). *INDC Registry - Argentina.* Recuperado el 08/06/2020 en: https://www4.unfccc.int/sites/INDCStaging/Pages/All.aspx

Gabinete Nacional de Cambio Climático, Ministerio de Energía, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2017). *Plan de Acción Nacional de Energía y Cambio Climático*. Versión I - 2017.

Garrison, C. (2020). *Refinería de argentina YPF reduce personal por caída del consumo*. Infobae. 29 de abril de 2020. Recuperado el 13/06/2020 en: https://www.infobae.com/america/agencias/2020/04/29/refineria-de-argentina-ypf-reduce-personal-por-caida-del-consumo/

Honty, G. (2014). *Potenciales emisiones de la explotación de hidrocarburos no convencionales*. Centro Latino Americano de Ecología Social. Informe preparado especialmente para 350.org. Octubre, 2014.

Howarth, R. W., Santoro, R. and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic change, 106*(4), 679.

Joselow, M. (2020). *IEA chief Fatih Birol on trauma across the energy sector*. E&E News. 22 de mayo de 2020. Recuperado el 13/06/2020 en: https://www.eenews.net/stories/1063205029?stream=top

Le Bail, M. Zavala-Araiza, D. y Gómez Solares, A. M. (2019). *La mitigación de las emisiones de metano en el sector hidrocarburos: la medida ausente del Reporte del IPCC sobre las consecuencias de un aumento de la temperatura media global de 1.5°C*. En: José Clemente Rueda Abad (Ed.) 2019. ¿Aún estamos a tiempo para el 1.5°C? Voces y Visiones sobre el Reporte Especial del IPCC. Universidad Nacional Autónoma De México - Programa de Investigación en Cambio Climático. ISBN: 978-607-30-2099-2

Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W. et al. (2020). *Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the Covid-19 forced confinement*. Nat. Clim. Chang. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x

Moreira Muzio, M., Gaioli, F., y Galbusera, S. (2019). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero: Argentina, 2019.* Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Ourworldindata.org. (2020). *Argentina - Population, 1800 to 2100. Historical estimates of population combined with the projected population to 2100 based on the UN's medium variant scenario*. Recuperado el 07/06/2020 en: https://ourworldindata.org/grapher/projected-population-by-country?country=~ARG

Ourworldindata.org. (2020 bis). *Argentina -Gross Domestic Product, 1960 to 2017. Gross domestic product adjusted for price changes over time (inflation) and expressed in US-Dollars.* Recuperado el 07/06/2020 en: https://ourworldindata.org/grapher/gross-domestic-product?tab=chart&country=~ARG

República Argentina. (2015). *Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional.* 01 de octubre de 2015. Recuperado el 08/06/2020 en: https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published%20Documents/Argentina/1/INDC%20Argentina.pdf

República Argentina. (2016). *Primera Revisión de su Contribución Determinada a Nivel Nacional*. 17 de noviembre de 2016. Recuperado el 08/06/2020 en: https://www4.unfccc.int/sites/INDCstaging/PublishedDocuments/Argentina%20First/17112016%20INDC%20Revisada%202016.pdf

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. (2015). *Tercera comunicación nacional de la República argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC).

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2019). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático* (CMNUCC).

United Nations Environment Programme (UNEP). (2016). *The Emissions Gap Report 2016*. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.

Watts, J. (2020). *Polémico proyecto de fracking en Argentina amenazado por la pandemia de coronavirus*. The Guardian. 04/05/2020. Recuperado el 13/06/2020 en: https://www.theguardian.com/world/2020/may/04/polemico-proyecto-de-fracking-en-argentina-amenazado-por-la-pandemia-de-coronavirus

HACIA UNA JUSTICIA ENERGÉTICA EN MÉXICO. UN ANÁLISIS DEL RÉGIMEN TARIFARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO Y SU POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN LA REPÚBLICA MEXICANA

TOWARDS AN ENERGY JUSTICE IN MEXICO. AN ANALYSIS OF THE TARIFF REGIME OF THE COLOMBIAN ELECTRICITY SECTOR AND ITS POSSIBLE IMPLEMENTATION IN THE MEXICAN REPUBLIC

Ernesto Beltrán Nishizaki [1]

Recibido: 30/05/2020 y Aceptado: 14/10/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (146 - 159)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

Foto de Brian Scott de Unsplash.

1 Grupo de Asesores Legal y Técnicos de la Construcción (GALTEC). México.
ebeltrann@galtec.info
http://orcid.org/0000-0001-8292-233X

RESUMEN

El estudio tiene como objetivo analizar y comparar el régimen tarifario de la energía eléctrica en Colombia y México. El hecho de que en México exista una cobertura del (99%) de la población da pauta a buscar esquemas tarifarios en el que los recursos públicos destinados al subsidio universal sean destinados a otros rubros con el objetivo de dar un suministro de energía más confiable, continuo y sostenible en aras de lograr una mayor justicia energética.

El esquema de subsidios en los servicios públicos domésticos en Colombia es un modelo qué de implementarlo de forma similar, podría brindar una solución a los problemas actuales en México.

Palabras clave: Energía Eléctrica, Tarifas Eléctricas, Subsidio, Justicia Energética, México, Colombia.

ABSTRACT

The study aim is to compare and analyse the Colombian and Mexican electricity tariff regime. The current scenario in which ninety-nine percent (99%) of the population has access to electricity is the perfect scenario to review the electricity tariff and the subsidy schemes to redefine the public resources provided for that purpose to improve a more reliable, continuous, and sustainable energy supply to achieve an energy justice.

The subsidy scheme for domestic public services in Colombia is a model that, if it is similarly implemented in Mexico, it could provide a solution to the current lack of public resources for electricity infrastructure in Mexico.

Keywords: *Electric Power, Electric Tariff, Subsidy, Energy Justice, Mexico, Colombia.*

INTRODUCCIÓN

Ante el reto de mayor inversión en el sector eléctrico mexicano como detonante para el desarrollo y la falta de recursos públicos para lograrlo, existe una imperiosa necesidad de buscar nuevos esquemas que permitan refocalizar los recursos destinados al subsidio de energía eléctrica a través de un uso eficiente de los recursos sin dejar a un lado a las clases menos favorecidas.

Este artículo analizará, a través de una metodología hipotética-deductiva, el modelo tarifario eléctrico colombiano y su posible implementación en México con el objetivo de reducir el gasto público destinado al subsidio universal de la tarifa eléctrica en casa habitación, para que de esta forma se focalicen los recursos públicos en otros proyectos prioritarios que el Estado considere estratégicos para el desarrollo de la nación y un sistema energético más justo.

En la primera parte del artículo analizaremos el esquema de subsidio (directo y cruzado) en el servicio público de energía eléctrica, implementado en Colombia. Al mismo tiempo, se contrastarán las ventajas y desventajas del mecanismo utilizado para determinar la aplicabilidad del subsidio, las reglas bajo el cual opera dicho esquema y el posible cumplimento de los elementos que conforman el principio de justicia energética.

Posteriormente, se realizará un análisis jurídico del sistema eléctrico mexicano y el subsidio universal existente en la tarifa eléctrica residencial. El costo de mantener un sistema de subsidio que beneficia -en mayor medida- a los que más consumen, no incentivan el uso eficiente (Sánchez et al., 2018) y sostenible de los recursos.

Por último, se analiza si el cambio de mecanismo para el otorgamiento del subsidio en México a través de la implementación de un régimen tarifario tendría como consecuencia un sistema energético más justo.

Justicia energética

No existe una definición única aceptada por la academia sobre qué es justicia energética, sin embargo, este concepto se desarrolló con tres objetivos fundamentales que son el acceso universal a una energía segura, sostenible y un precio asequible (Sourav, 2018).

Para ello, la doctrina ha señalado 8 elementos que deben ser considerados para conseguirlo. Estos son: disponibilidad, asequibilidad, debido proceso, transparencia y rendición de cuentas, sostenibilidad, equidad intergeneracional, equidad social y, finalmente, responsabilidad (Sovacool y Dworkin, 2015). Entendidos estos cómo:

1. Disponibilidad. El garantizar un suministro seguro, confiable y suficiente.

2. Asequibilidad. El costo que permita el acceso universal a la energía eléctrica. Esto no quiere decir que para ello se requiera únicamente precios bajos sino también que la facturación no sea excesiva (Sovacool y Dworkin, 2015).

3. Debido proceso. Actualmente la regulación busca cumplir con esta condición ya que la regulación obliga a presentar una licencia de impacto social, consulta indígena y manifestación de impacto ambiental para los proyectos eléctricos[1]. Con ello se busca que los interesados puedan conocer las características del proyecto y, en su caso, oponerse a través de los mecanismos previstos en los ordenamientos jurídicos.

4. Transparencia y rendición de cuentas. La transparencia de la información contable y financiera que permita conocer el costo real que

1 Con excepción de aquellos que se encuentren exento de permiso por parte de la CRE. Como plantas de emergencia y generación por debajo del .5MW.

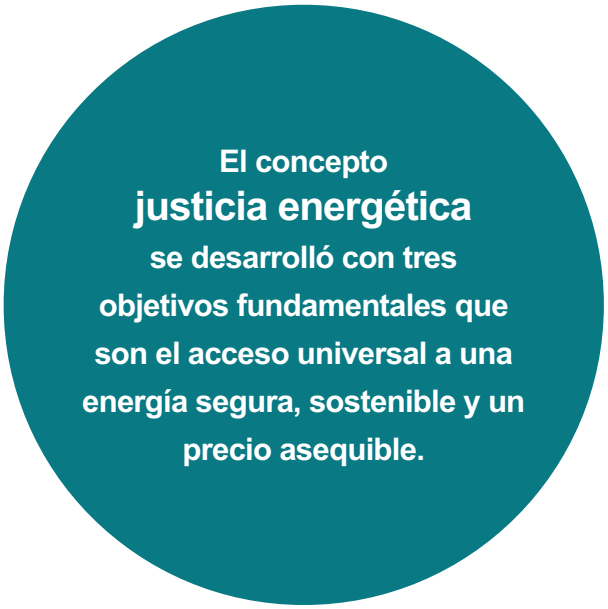
conlleva el suministro eléctrico en casa habitación y evitar actos de corrupción.

5. Sostenibilidad. La explotación de los recursos debe tener como limitante el no comprometer su disponibilidad para las futuras generaciones

6. Equidad intergeneracional. Para efecto de este documento se entiende bajo lo estipulado por Fernández Santos (2005) como aquella que hace referencia a la igualdad en el ámbito ambiental entre distintas generaciones. En otras palabras, es el derecho que tienen las generaciones futuras de desarrollarse o vivir en un lugar al menos con las mismas características ambientales a las actuales.

7. Equidad social. Se debe entender como un acceso imparcial a la energía eléctrica. El acceso universal a la energía eléctrica es un derecho humano, ya que sin ese insumo básico no se puede cubrir las necesidades básicas.

8. Responsabilidad. Es la corresponsabilidad que tiene el gobierno y ciudadanía de proteger el medio ambiente y reducir los impactos negativos derivado del suministro de energía eléctrica.



Los servicios públicos

En la dogmática jurídica no existe un concepto único de servicio público, ya que este ha sufrido cambios a lo largo de la historia. Actualmente, puede ser abordado desde dos perspectivas. Por un lado, existe un criterio denominado "orgánico", el cual caracteriza al servicio público en atención a la persona que lo satisface o realiza (Rojas López, 2017). El otro criterio es basado en la "funcionalidad u objeto", es decir, en satisfacer una necesidad pública (Gordillo, 2013).

De acuerdo con Rojas (2017), en ambos casos, al ser una necesidad colectiva, los servicios públicos deben de revestir de una normatividad que dote de medios exorbitantes para lograr la generalidad, uniformidad, regularidad y continuidad del mismo.

La generalidad significa que todo habitante tiene derecho a gozar el servicio; la igualdad se refiere que todo habitante tiene el derecho de exigir el servicio; la regularidad es que se lleve a cabo conforme a las reglas que el Estado haya fijado a través de su Poder Legislativo; y la continuidad quiere decir un servicio de forma ininterrumpida y oportuna. En términos de justicia energética, el servicio de suministro de energía eléctrica debe ser disponible, asequible y buscando una equidad social.

COLOMBIA

El sistema tarifario colombiano, como se analizará en los siguientes párrafos, busca un sector eléctrico más justo. La Constitución Política de la República de Colombia (CPRC) publicada en 1991, en los artículos 365, 366 y 367, impone la obligación del Estado de garantizar una prestación eficiente de los servicios públicos, ya sea por medio del mismo o a través el sector privado. Para ello establece la prerrogativa para que mediante las leyes establezcan el régimen tarifario tomando en consideración los criterios de costos, solidaridad y redistribución de ingresos. De igual forma, permite a la Nación, los

departamentos, los distritos, los municipios y las entidades descentralizadas conceder subsidios, en sus respectivos presupuestos, para lograr una mayor equidad social y las personas de menores ingresos puedan pagar las tarifas de suministro eléctrico que cubran sus necesidades básicas.

Incluso, a través de la sentencia número C-580/92 de su Corte Constitucional, la CPRC reconoce el principio fundamental de "solidaridad" aplicable al régimen tarifario, el cual considera que los servicios púbicos se prestarán en beneficio de la comunidad y elimina la posibilidad que se establezca la prestación de estos en condiciones favorables a un segmento de la sociedad. Al mismo tiempo, este principio impone la obligación de tomar en cuenta los distintos estratos sociales que participan como usuarios de los servicios públicos, su capacidad económica y como consecuencia el establecimiento de tarifas diferenciales para impedir que la mayoría de la población asuma el mayor costo de los servicios.

Aunado a lo anterior, el artículo 367 de la CPRC determina que en todo momento el esquema tarifario debe buscar cumplir con otro de los objetivos planteados: solucionar las necesidades básicas insatisfechas y el acceso a los servicios públicos domiciliados de las clases menos favorecidas. En otras palabras, que exista disponibilidad, asequibilidad y equidad social.

Con la finalidad de cumplir con el mandato constitucional, las autoridades colombianas crearon la normatividad para garantizar el equilibrio económico y financiero de las empresas, así como la cobertura futura de los servicios y el acceso universal al servicio de electricidad.

Regulación secundaria. La Ley 142 de 1994

La Ley 142 de 1994 publicada por el Congreso de la República de Colombia (CC), en sus artículos 2 y 3, inciso 2.9, regula la prestación de servicios públicos domiciliarios como el suministro de energía eléctrica, ya sea por el Estado o un particular, ambos bajo la tutela estatal para garantizar la calidad, eficiencia, libre competencia, acceso universal y solidaridad (siendo este último la *ratio legis* del ordenamiento jurídico).

Para su consecución, contempla el otorgamiento de subsidios para las personas de menores ingresos y en la obligación de realizar una contraprestación extraordinaria a los estratos más altos.

La energía eléctrica como servicio público

Mediante la Ley 143 de 1994, se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional. La ley prevé principios que regirán el servicio de energía eléctrica. Estos son eficiencia, calidad, continuidad, adaptabilidad, neutralidad, solidaridad y equidad, estipulados en el artículo 6 de la Ley 143 de 1994. Para efecto del artículo, únicamente haremos un análisis de los últimos dos.

El principio de solidaridad, bajo el contexto de la ley 143 de 1994, se debe entender como el mandato de diseñar un régimen tarifario que tome en consideración factores para que los sectores de consumo de mayores ingresos ayuden a que las personas de menos ingresos puedan pagar las tarifas de consumo eléctrico que cubra las necesidades básicas y con ello lograr cumplir con la asequibilidad del servicio. En cambio, el principio de equidad se refiere al objetivo de alcanzar una cobertura equilibrada y adecuada en todo el país que garantice la satisfacción de las necesidades básicas (Casas, Medina y Meléndez, 2005).

Como se ha mencionado anteriormente, el principio de solidaridad marca la pauta al Estado para generar los mecanismos que permitan cumplir con el mandato señalado, así como el cumplimiento de varios elementos reconocidos por la dogmática para lograr una justicia energética. Bajo esa tesitura, la propia ley establece dos elementos fundamentales.

El primero es que el monto de aportación extraordinaria no deberá exceder del 20 % del costo de prestación del servicio para subsidiar los consumos de subsistencia[2] de los usuarios residenciales de menores ingresos y el segundo es la estratificación social.

Aportación Extraordinaria

La aportación extraordinaria es un subsidio cruzado en el que los hogares con mayores recursos, la industria y el comercio aportan hasta un 20% más para subsidiar parte del consumo de subsistencia de los usuarios con menores recursos. En caso de existir un remanente a subsidiar, el Estado lo realiza con cargo al presupuesto anualmente aprobado para tales efectos de conformidad con artículo 47 de la Ley 143 de 1994. Ahora bien, de conformidad con la ley número 2008 del 27 de diciembre de 2019 se establece que podrán ser beneficiarios del subsidio a la energía eléctrica y que será a través de recursos de crédito, incluyendo la emisión de bonos y otros títulos de deuda pública, en condiciones de mercado. De igual forma establece que la emisión de los bonos o títulos de que trata el presente artículo no implica operación presupuestal y solo debe presupuestarse para efectos de su redención.

En un inicio este esquema fue utilizado como un mecanismo para sufragar el gasto requerido para desarrollar la infraestructura necesaria para lograr el acceso a la energía eléctrica a toda la población (Santa María et al., 2009). De acuerdo con la última información del Ministerio de Información y Tecnologías, durante los años 2013 al 2016, la cobertura de energía eléctrica en Colombia es del 98.6%, por lo que el esquema fue fructífero para coadyuvar a lograr una cobertura casi en su totalidad y con ello se cumple el elemento de la justicia energética denominado disponibilidad.

Actualmente, el esquema de aportaciones extraordinarias ha sido criticado por un sector al señalar que, al mantener el esquema de contribución extraordinaria a la industria y el comercio, afecta directamente la competitividad del sector manufacturero y, por ende, las exportaciones colombianas y el crecimiento industrial (Santa María et al, 2009). De igual forma, se señala que el sector de población con mayores ingresos busca o habite residencias en estratos más bajos con el objetivo de reducir el pago de la contribución extraordinaria.

La naturaleza jurídica de la aportación extraordinaria

La aportación extraordinaria realizada por los estratos 5 y 6, comercio e industria tiene una naturaleza jurídica de subsidio cruzado, entendido este como el precio que para algunos consumidores se encuentra por debajo del costo promedio y para otros por arriba del costo promedio (Beato, 1999). Existen diversas definiciones respecto de qué se debe entender como subsidio cruzado, sin embargo, considero que, para efecto del presente artículo, ésta es la más adecuada.

El subsidio cruzado se encuentra prohibido en ciertas regulaciones como parte de una política de precios que tiene como objetivo proteger la competencia en los mercados. Ejemplo de ello, es la regulación en materia de gas y electricidad emitida por el Parlamento Europeo denominada Directriz de Electricidad 2019/944. En ella se establece que, por regla general, los países miembros de la Unión Europea no pueden intervenir en los precios en los que los suministradores enajenen la electricidad a sus clientes con excepción caso de pobreza energética o vulnerable; sin embargo, no permite que sea mediante costos adicionales a los participantes del mercado, subvenciones cruzadas directas o precios por abajo del costo (Parlamento Europeo y del Consejo, 2012).

2 El nivel de subsistencia de Energía Eléctrica está fijado en 173 kWh para ciudades con alturas que no superen los 1.000 metros sobre el nivel del mar, y de 130 kWh para las ciudades por encima de los 1.000 metros sobre el nivel del mar.

En todo momento el esquema tarifario debe buscar cumplir con otro de los objetivos planteados: solucionar las necesidades básicas insatisfechas y el acceso a los servicios públicos domiciliados de las clases menos favorecidas.

Subsidio directo y/o cruzado

El sistema tarifario en Colombia reconoce dos tipos de subsidio. Por un lado, el subsidio directo por parte del Gobierno en caso de no cubrir los costos con las aportaciones extraordinarias. El prestado se financia con fondos externos proveídos por el Fondo de Solidaridad para Subsidios y Redistribución de Ingresos (FSSRI). Por otro lado, reconoce un esquema de subsidio cruzado por medio de la aportación extraordinaria enterada por los estratos 5 y 6, comercio e industria (Uribe-Mallarino, 2008).

Focalización o universalidad en el subsidio

Otra de las características que tiene el régimen de subsidios en el esquema tarifario colombiano es la focalización a diferencia del sistema mexicano, del cual ahondaré más adelante. El subsidio es focalizado ya que se encuentra plenamente identificado el grupo de usuarios con el objetivo de reducir las tarifas eléctricas (Uribe-Mallarino, 2008).

La focalización del subsidio existe al momento de identificar los tres primeros estratos sociales como sujetos de recibir ese beneficio, así como una disminución en el porcentaje dependiendo del estrato al que se pertenezca. Aunado a lo anterior, se subsidia un monto de consumo de los servicios públicos considerado el consumo de subsistencia, por encima del cual se paga una tarifa mayor, equivalente a la pagada por el estrato (Uribe-Mallarino, 2008). Con dicha medida permite que las clases menos favorecidas estén en condiciones de utilizar el servicio.

Estratificación social como el elemento objetivo

Ante la desigualdad de infraestructura existente en las ciudades colombianas durante las décadas de 1960 y 1970, las autoridades colombianas buscaron un mecanismo que les permitiera abatir de forma paulatina la problemática derivada de las ventajas de las clases más altas y las desventajas de las menos favorecidas para así lograr una equidad en los servicios públicos domiciliados (Yunda, 2019).

El esquema elegido por las autoridades colombianas, vigente en la actualidad, fue mediante contribuciones extraordinarias por parte de las clases con mayores recursos con el objetivo de subsidiar el costo de la infraestructura. Dichas medidas fueron contempladas en el Decreto 3069, el cual imponía la obligación a las empresas prestadoras de servicios públicos a establecer tarifas diferenciadas según el nivel socioeconómico. Yunda (2019) afirma que, en consecuencia, las empresas prestadoras de servicios públicos y municipios crearon sistemas de estratificación diferentes, sin que coincidieran -en muchos casos- entre sí.

Ante dicha problemática en 1994, el gobierno colombiano, a través del Departamento Nacional de Planeación, desarrolló una nueva metodología unificada para todo el país, la cual fue publicada en la Ley 142 de 1994. La metodología propuesta toma en consideración la problemática existente en ese momento en la información catastral, por lo que establecía que la estratificación socioeconómica fuera determinada por las condiciones físicas y urbanísticas de los predios (Yunda, 2019).

La clasificación consiste en 6 diferentes “estratos” siendo el número 1 el más bajo y el 6 el más alto. Para determinarlo se utiliza una combinación de variables dividida en dos grupos, el primero relacionado con las características de la vivienda y su entorno inmediato, y el segundo con las características de su contexto urbanístico (Yunda,

2019). El contar con una metodología para el cobro de las contraprestaciones cumple en todo momento con el principio de transparencia y rendición de cuentas consagrado como otro elemento fundamental para lograr una justicia energética.

LA INDUSTRIA ELÉCTRICA MEXICANA

En el año 2013, en México, se llevó a cabo la reforma energética más importante en los últimos 50 años del sector: la liberalización del mercado eléctrico en el suministro y generación. Este proceso tenía como finalidad mejorar la calidad y disminuir las tarifas de suministro eléctrico (Senado de la República, 2013).

El suministro de energía eléctrica se dividió en dos grandes grupos. Primero, el suministrador básico y segundo, el suministrador calificado. El suministrador básico es aquel que proporcione el servicio de suministro a centros de carga de menos de 1MW mientras que el suministrador calificado requiere un consumo mayor al 1MW y ser usuario calificado[3]. Para efecto del artículo solo nos referiremos al suministro básico, ya que la tarifa residencial, por su patrón de consumo debe ser considerada como tal.

La tarifa eléctrica en México

La tarifa eléctrica en México fue uno de los elementos que fueron modificados en su totalidad. Previo a la reforma, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público era la facultada de establecer la tarifa eléctrica sin metodología clara y transparente. Dicho esquema iba en contra de las mejores prácticas internacionales y de uno de los elementos fundamentales para lograr una justicia energética, por lo que con la reforma se adecuó. En ese sentido, las principales modificaciones fueron:

a) La aprobación de la tarifa por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), órgano regulador coordinado con autonomía técnica operativa y de gestión.

b) Existen 12 tarifas[4] regionalizadas[5].

c) El cálculo de la tarifa es conforme a la aplicación de una metodología previamente aprobada y pública.

Para el caso de la tarifa residencial desde el año 2002, se creó un régimen de excepción que contempla la tarifa "Doméstica de Alto Consumo". La cual establece un límite de consumo, en caso de rebasarse, se cobra una tarifa mayor con el objetivo de ir reduciendo el monto de recursos públicos destinados al subsidio de electricidad; no obstante, como consecuencia de diversas exenciones a esta tarifa en zona de mayor consumo en virtud del clima, se redujo el impacto de esta política.

Con la finalidad de generar mayor transparencia en la tarifa residencial se estableció una diferenciación basada en la temperatura media mensual para una localidad (CONUEE-SENER, 2020). En caso de exceder el límite se deberá cobrar una tarifa Doméstica de Alto Consumo.

3 Para efecto del presente artículo no haremos mayor referencia de las reglas existentes entre usuario y suministrador en sus diversas modalidades.

4 *1. DB1 Doméstico baja tensión hasta 150 kWh-mes; 2. DB2 Doméstico baja tensión mayor a 150 kWh-mes; 3. PDBT Pequeña demanda baja tensión hasta 25 kW-mes; 4. GDBT Gran demanda baja tensión mayor a 25 kW-mes; 5. RABT Riego agrícola en baja tensión; 6. RAMT Riego agrícola en media tensión; 7. APBT Alumbrado público en baja tensión; 8. APMT Alumbrado público en media tensión; 9. GDMTO Gran demanda en media tensión ordinaria 10. GDMTH Gran demanda en media tensión horaria; 11. DIST Demanda industrial en subtransmisión 12. DIT Demanda industrial en transmisión

5 Las 17 regiones en las que se dividió el territorio nacional para efecto de la tarifa eléctrica son: Baja California, Baja California Sur, Bajío, Centro Occidente, Centro Oriente, Centro Sur, Golfo Centro, Golfo Norte, Jalisco, Noreste, Norte, Peninsular, Sureste, Valle de México Centro, Valle de México Sur y Valle de México Norte.

La siguiente tabla permite explicar de manera más clara lo establecido previamente.

TARIFA RESIDENCIAL	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL EN VERANO (grados centígrados)	CONSUMO LÍMITE (kWh/mes)
1	No definido	250
1A	25 ^{O}C	300
1B	28 ^{O}C	400
1C	30 ^{O}C	850
1D	31 ^{O}C	1,000
1E	32 ^{O}C	2,000
1F	33 ^{O}C	2,500
DAC	Al momento de rebasar los límites de consumo establecidos en las otras tarifas	

Fuente: Elaboración propia.

Subsidio en la energía eléctrica

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su artículo 28, párrafo décimo cuarto[6], facultan al Estado a otorgar subsidios en áreas prioritarias siempre y cuando no afecte las finanzas públicas y sean de carácter temporal. El subsidio que actualmente el Estado otorga al suministro de energía eléctrica es universal, es decir, sin distingo del usuario final.[7]

En cumplimiento de la prerrogativa constitucional, el monto establecido en el Presupuesto de Egresos de la Federación para el año 2020 para subsidio al suministro de energía eléctrica es de $70,000,000,000.00 (setenta mil millones de pesos). De los cuales, el 78% aproximadamente es destinado para el subsidio al suministro de energía eléctrica residencial (Sánchez et al., 2018).

Para ejemplificar, el programa de once hospitales estatales de alta especialidad[8], de acuerdo con la Presidencia de la República en el proyecto de presupuesto de egresos de la Federación para el ejercicio fiscal 2020, tiene como presupuesto anual el total de $2,875,467,195 (dos mil ochocientos setenta y cinco millones cuatrocientos sesenta y siete mil ciento noventa y cinco pesos mexicanos). Lo anterior, evidencia la imperante necesidad de revisar y modificar el régimen de subsidios en México.

Asimismo, demuestra que el régimen de subsidio universal existente en México para el suministro de energía eléctrica conlleva un costo de oportunidad de no destinar los recursos a otras áreas prioritarias para el desarrollo del país

6 Artículo 28. Se podrán otorgar subsidios a actividades prioritarias, cuando sean generales, de carácter temporal y no afecten sustancialmente las finanzas de la Nación. El Estado vigilará su aplicación y evaluará los resultados de ésta.

7 Para efecto del presente artículo, nos concentraremos en el sector residencial aun cuando otros sectores son sujetos de los mismos beneficios

8 Instituto Nacional de Cancerología; Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez; Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas; Instituto Nacional de Geriatría; Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán; Instituto Nacional de Medicina Genómica; Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía Manuel Velasco Suárez; Instituto Nacional de Pediatría; Instituto Nacional de Perinatología Isidro Espinosa de los Reyes; Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra e Instituto Nacional de Salud Pública.

(Sánchez et al., 2018). De igual forma, prueba que beneficia a las clases con mayores recursos y no a las menos favorecidas, ya que las primeras de ellas consumen mayor cantidad de energía eléctrica.

Un cambio de régimen de subsidio por un principio de justicia energética

Como se ha mencionado, el régimen de subsidio a la tarifa eléctrica en México se rige bajo el principio de universalidad el cual tiene como objetivo incentivar el acceso y uso de la energía eléctrica a la población en general; sin embargo, en el escenario actual en el que la cobertura eléctrica es de 99% (INEGI, 2018), los efectos de mantener una política de subsidio similar generan un sistema menos justo. Por un lado, un uso indiscriminado e irresponsable de los recursos y, por otro, una infraestructura cada vez más vieja que pone entredicho la prestación de un servicio continuo, eficiente y sostenible.

Cambio en el régimen de subsidio

El 78% del total de los recursos destinados al subsidio de energía eléctrica es para la tarifa residencial. Ante un escenario constante de menores recursos estatales y un crecimiento sostenido en la demanda de energía eléctrica, es necesario modificar el subsidio universal a uno focalizado y a su vez un subsidio cruzado, por medio de una cuota extraordinaria para aquellos usuarios que rebasen los límites establecidos. La focalización debe radicar en el sector poblacional que tiene un consumo mínimo para lograr satisfacer sus necesidades básicas. Este deberá depender de la zona o localidad en la que se ubiquen, ya que las necesidades podrán variar.

De igual forma, se requiere una focalización para el subsidio cruzado para evitar limitantes a la competitividad del sector industrial y comercial. En ese sentido, se propone que sea aplicable exclusivamente para consumo residencial y escalonado dependiendo el nivel de consumo de energía eléctrica del usuario final con el objetivo de cumplir con el principio de proporcionalidad.

A diferencia de Colombia en donde el pago de la cuota extraordinaria depende del estrato social al que se forme parte, en México se busca que sea a través del monto de consumo mensual total, ya que no existe una regulación que permita una estratificación uniforme, no refleja -en general- la capacidad de pago de los usuarios finales y no incentiva un consumo racional de los recursos.

En ese sentido, se propone que la estructura para el cobro de la cuota extraordinaria sea similar a la actual, es decir, que la tarifa residencial autorizada para el suministro de energía eléctrica en casa habitación sea segmentada conforme a los límites de consumo dependiendo la región en la que se encuentre la localidad y tomando en consideración un consumo mínimo para cubrir las necesidades básicas. Todo consumo mayor deberá ser tomado como base para el pago de la contraprestación extraordinaria.

Justicia energética como mecanismo para la toma de decisiones

El cambio en el mecanismo de otorgamiento del subsidio existente en México lograría transitar a un sector más justo. Para lograr una justicia energética, tal y como se mencionó en el apartado sobre “Los servicios públicos” del presente artículo, la doctrina ha señalado ocho elementos esenciales que se deben cumplir para conseguirlo. En ese sentido, la presente propuesta cumple dichos elementos, de la siguiente manera:

I. Disponibilidad. El destinar recursos para el subsidio universal al suministro de energía eléctrica tiene como consecuencia dejar de focalizar recursos para infraestructura necesaria para garantizar un suministro seguro, confiable y suficiente. Por ejemplo, se requieren inversiones importantes en sectores como la transmisión que en muchos casos se encuentran congestionadas, lo que afecta la confiabilidad del sistema (PRODESEN - Centro Nacional de Control de Energía, 2019).

II. Asequibilidad. Con un subsidio focalizado se lograría el apoyo real y directo al sector con menores ingresos y evitar el pago de una contraprestación desproporcional o destinar gran parte de su presupuesto para ello.

III. Debido proceso. Actualmente la regulación cumple con esta condición ya que la regulación obliga a presentar una licencia de impacto social, consulta indígena y manifestación de impacto ambiental para los proyectos eléctricos[9]. Con ello se busca que los interesados puedan conocer las características del proyecto y, en su caso, oponerse a través de los mecanismos previstos en los ordenamientos jurídicos.

IV. Transparencia y rendición de cuentas. El cambio en el mecanismo de subsidio debe aparejar mayor transparencia en los recursos públicos y la aportación extraordinaria realizada por aquellos consumidores con mayor consumo y capacidad de pago que sean destinados para apoyar al sector población con menos ingresos. Actualmente se conoce el monto total destinado a subsidiar el suministro eléctrico, pero no hay claridad ni información de fácil acceso para conocer los montos efectivamente erogados.

V. Sostenibilidad. La explotación de los recursos debe tener como limitante el no comprometer su disponibilidad para las futuras generaciones. La aportación extraordinaria propuesta sería un aliciente para reducir el consumo excesivo de los recursos. El hecho de no recibir apoyo gubernamental para el consumo aunado a una aportación extraordinaria lograría desincentivar prácticas que generen mayor consumo.

En un país como México en el que su matriz energética tiene mayor dependencia a los hidrocarburos podría significar una contribución importante al medio ambiente (PRODESEN - Centro Nacional de Control de Energía, 2019).

VI. Equidad intergeneracional. Para efecto de este documento se entiende bajo lo estipulado por Fernández Santos (2005) como aquella que hace referencia a la igualdad en el ámbito ambiental entre distintas generaciones. En otras palabras, es el derecho que tienen las generaciones futuras de desarrollarse o vivir en un lugar al menos con las mismas características ambientales a las actuales.

VII. Equidad social. Se debe entender como un acceso imparcial a la energía eléctrica. El acceso universal a la energía eléctrica es un derecho humano, ya que sin ese insumo básico no se puede cubrir las necesidades básicas. El focalizar los subsidios a grupos vulnerables permitiría redireccionar recursos públicos para mejor acceso a una energía segura y confiable, así como programas sociales para mejorar la calidad de vida (como podría ser el uso de estufas eléctricas que permitan reducir el consumo de leña o carbón para calentar o cocinar alimentos). De acuerdo con cifras oficiales, el 11% de la población sigue utilizando como principal combustible la leña (INEGI – ENIGH, 2018).

VIII. Responsabilidad. Es la corresponsabilidad que tiene el gobierno y ciudadanía de proteger el medio ambiente y reducir los impactos negativos derivado del suministro de energía eléctrica. Al igual que en los otros casos, el focalizar los subsidios permitirá destinar recursos públicos para el desarrollo de infraestructura eléctrica que mitigue el impacto ambiental como líneas de distribución y transmisión que han registrado hasta un 21.2% de pérdidas de energía en el país (CEPAL, 2018), sustitución de equipos obsoletos para reducir la pérdida de energía eléctrica.

Al mismo tiempo, la aportación extraordinaria a aquellos que consuman más permitirá incentivar medidas de ahorro, de eficiencia energética en casa habitación, así como el uso de energías renovables para abasto aislado. Por ejemplo, en la actualidad, el promedio es el 15% de la totalidad de los consumidores de energía eléctrica que utilizan fuentes distintas a la red pública (INEGI – ENIGH, 2018).

9 Con excepción de aquellos que se encuentren exentos de permiso por parte de la CRE. Como plantas de emergencia y generación por debajo del 5MW.

CONCLUSIONES

Como se señaló a lo largo del documento, el subsidio universal en México ha generado un costo de oportunidad importante, ya que ante la falta de recursos públicos para proyectos ha ocasionado que la infraestructura eléctrica no cumpla con las necesidades propias de la demanda en México.

Asimismo, el subsidio directo beneficia a quien más consume y no necesariamente a quién realmente lo necesita. Es por ello que se debe buscar un mecanismo distinto en el que: a) se focalice el apoyo a los grupos más vulnerables y b) los que tengan mayores recursos contribuyan a reducir los subsidios gubernamentales.

A diferencia del sistema colombiano, en México se propone realizarlo a través del volumen de consumo y no mediante un esquema de estratificación social ya que, como se comentó, dicho esquema no necesariamente beneficia a quien consume menos o refleja quien tiene mayores recursos económicos; aunado a que la extensión territorial, la población habitante en México y la administración en 32 entidades federativas constituyen una problemática difícil de superar.

La contribución extraordinaria planteada por aquellos que consumen más tiene 2 finalidades. La primera es, como se ha dicho en varias ocasiones, reducir los recursos públicos destinados al subsidio directo y la segunda es incentivar el uso racional de los recursos, así como impulsar mecanismos de eficiencia energética.

Por un principio de justicia energética, el Gobierno de México y la población deben buscar mecanismos que permitan desarrollar infraestructura eléctrica con tecnología actual que logre un servicio continuo, confiable, equitativo y confiable para la población y las próximas generaciones. El acceso universal es uno de los elementos de una justicia energética; sin embargo, existen otros que no han sido cumplidos y resulta muy complicado bajo el esquema actual.

REFERENCIAS

Beato, P. (1999). *Cross subsidies in public services: Some issues*. Estados Unidos: Inter- American Development Bank.

Casas L., C., Medina F., P., Meléndez A., M. (2005). *Subsidios al consumo de los servicios públicos en Colombia: ¿hacia dónde nos movemos?* Disponible en: https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/1085/Co_So_Diciembre_2005_Melendez.pdf;jsessionid=E0DCA0908A0F963954E0548CC0AF7E5E?sequence=2

CEPAL (2018). *Informe nacional de monitoreo de eficiencia energética de México 2018*. México: Naciones Unidas. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43612/1/S1800496_es.pdf

Constitución Política de la República de Colombia. *Artículos 365, 366 y 367*. Colombia. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html

CONUEE-SENER (2020). *Clasificación de climas y su aplicación a la norma para envolvente de viviendas: notas para discusión*. México: Cuadernos de la CONUEE. No. 6/ Nuevo Ciclo. Disponible en https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno6NvoCiclo.pdf

Corte Constitucional de la República de Colombia. *Sentencia número C. -580/92*. Colombia. 5 de noviembre de 1992. Disponible en: https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/1992/C-580-92.htm

Fernández Santos, Y. (2005). *Evaluación de la equidad intrageneracional e intergeneracional en una entidad pública local a través de indicadores de gestión*. IX Congresso Internacional de Custos – Florianópolis, SC. Brasil, 28 a 30 de noviembre de 2005. Disponible en: https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/viewFile/1944/1944

Gordillo, A. (2013). *Tratado de derecho administrativo y obras selectas*. Teoría general del derecho administrativo, tomo 8. Buenos Aires: FDA. Disponible en: http://gordillo.com/tomo8.php

INEGI (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (encevi)*. 7 de noviembre de 2018. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf

INEGI – ENIGH (2018). *Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares*. México: ENIGH. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/nc/2018/doc/enigh2018_ns_presentacion_resultados.pdf

Ley 142 de 1994. Artículo 2. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. 11 de julio de 1994. Colombia: Diario Oficial No. 41.433, de 12 de julio de 1994. Disponible en: http://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2752

Ley 142 de 1994. Artículo 3, Inciso 3.9. Colombia: Diario Oficial No. 41.433, de 12 de julio de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. 11 de julio de 1994. Disponible en: http://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2752

Ley 143 de 1994. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. 12 de julio de 1994. Colombia: Diario Oficial No. 41.434. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0143_1994.html

Ley 143 de 1994. Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. 12 de julio de 1994. Colombia: Diario Oficial No. 41.434. Disponible en: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0143_1994.html

Ministerio de la Información y Tecnologías (2013 al 2016). *Cobertura del servicio de energía eléctrica por municipio. Colombia*. Disponible en: https://www.datos.gov.co/Minas-y-Energ-a/Cobertura-del-servicio-de-energia-electrica-por-mu/fuk9-m94c/data

PRODESEN - Centro Nacional de Control de Energía (2019). *Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista PRODESEN 2019-2033, Centro Nacional de Control de Energía*. Disponible en: https://www.cenace.gob.mx/Docs/Planeacion/ProgramaRNT/Programa%20de%20Ampliaci%C3%B3n%20y%20Modernizaci%C3%B3n%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202019%20-%202033.pdf

Rojas López, J.G. (2017). *El régimen de contratación de las empresas de servicios públicos, domiciliarios de carácter oficial*. Ratio Juris, Vol. 1 Núm. 2 (2005): Enero – Junio, 23-24. Disponible en: https://publicaciones.unaula.edu.co/index.php/ratiojuris/article/view/294

Sánchez, L., Echeverría, D., Wooders, P., Kuehne, K., Lean, T., Beaton, C., Shama, S., Oharenko, Y. (2018). *Mejorando y refocalizando los subsidios a la electricidad. Opciones para su optimización. México - Alemania*: International Institute for Sustainable Development (ISSD) Disponible en: https://www.energypartnership.mx/fileadmin/user_upload/mexico/media_elements/reports/Subsidios Electricos-MEX.pdf

Santa María, M., Von Der Fehr, N.H., Millán, J., Benavides, J., Gracia, O., Schutt, E. (2009). *El mercado de la energía eléctrica en Colombia: características, evolución e impacto sobre otros sectores*. Cuaderno de Fedesarrollo No. 30. Colombia: Fedesarrollo.

Senado de la República (2013). *Proyecto de Dictamen en las Comisiones Unidas de Energía y de Estudios Legislativos, primera con proyecto de Decreto por el que se expiden la Ley de la Industria Eléctrica, Ley de Energía Geotérmica y se adiciona y reforman diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales*. México. Disponible en: https://www.senado.gob.mx/comisiones/energia/docs/reforma_energetica/dictamen2.pdf

Sourav, R. (2018). *In quest of an energy justice framework for Bangladesh*. UNCHRONICLE. Disponible en: https://unchronicle.un.org/article/quest-energy-justice-framework-bangladesh

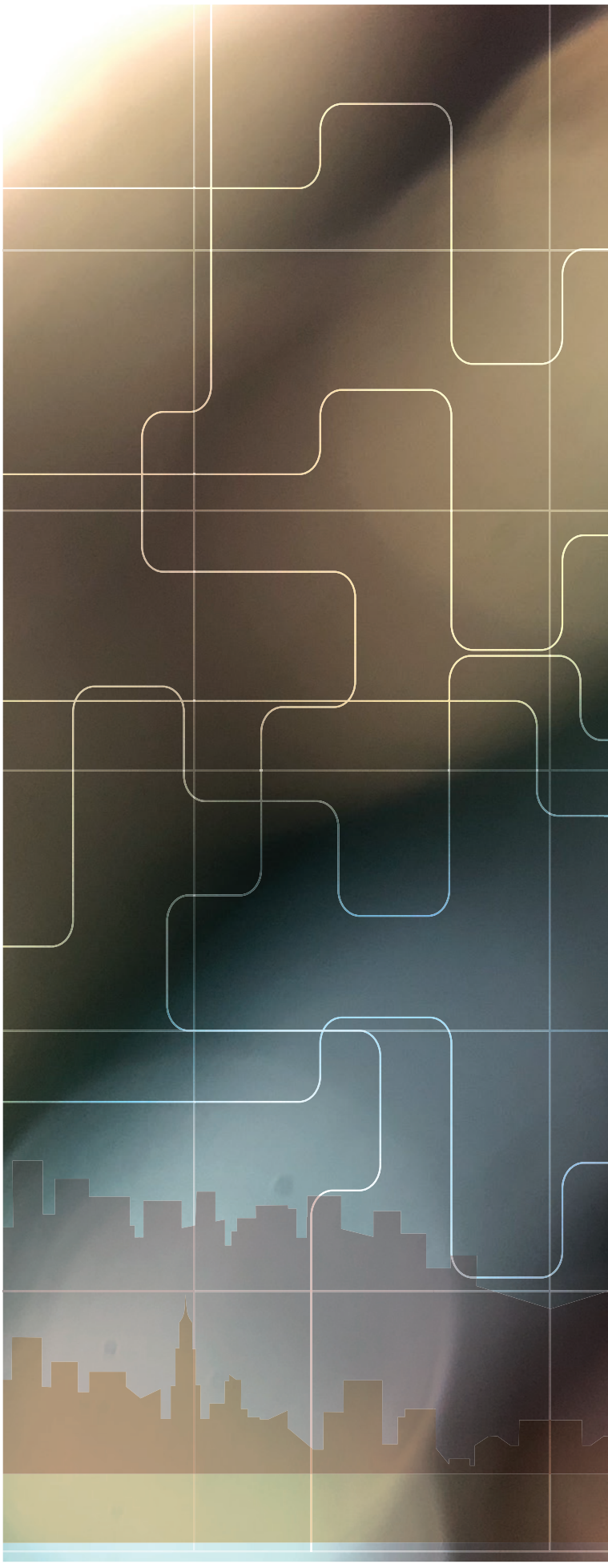
Sovacool, B. K., Dworkin, M. (2015). Energy justice: Conceptual insights and practical applications. *Applied Energy, 142* (2015) 435-444. SSRN. Disponible en https://ssrn.com/abstract=3447328

Uribe-Mallarino, C. (2008). *Estratificación social en Bogotá: de la política pública a la dinámica de la segregación social*. Universitas Humanística, 65(65). Recuperado a partir de https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/univhumanistica/article/view/2245

Yunda, Juan G. (2019). *Densificación y estratificación social en Bogotá: distribución sesgada de la inversión privada*. EURE (Santiago), 45(134), 237-257. https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000100237

olade
ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA
LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION
ORGANIZAÇÃO LATINO-AMERICANA DE ENERGIA
ORGANISATION LATINO-AMERICAINE D'ENERGIE

Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



Av. Mariscal Antonio José de Sucre
N58-63 y Fernandez Salvador
Quito - Ecuador

Tel. (+593 2) 2598-122 / 2598-280
/ 2597-995

enerlac@olade.org