



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 24 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2019

REVISTA Ingeniería

Volumen 24 · Número 3 · Año 2019 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 7 - Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo revista:
revista.ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Nelson L. Díaz, PhD.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort University,
Reino Unido

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication Technologies - Haute Ecole
d'Ingénierie et de Gestion du Canton
de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Paulo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Elvis Eduardo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez Giraldo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Francisco Santamaría Piedrahíta, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Julio Barón Velandía, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diagramación L^AT_EX

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Johann Alexander Hernández, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia

Andrés Felipe Panesso Hernández, MSc.
Universidad de la Salle. Colombia

Frey Alfonso santamaría Buitrago, MSc.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Lidice Amondaray Romero, MSc.
Universidad de Oriente. Cuba

Victor Julio Martínez, PhD.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Orlando Alexander González Vivas, MSc.
Universidad Nacional de Colombia.

Francisco Javier Ariza, PhD.
Universidad de Jaén. España.

Ricardo Timarán Pereira, PhD.
Universidad de Nariño. Colombia.

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endoso, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

INDIZADA EN



CARÁTULA

La portada está inspirada en la temática de los artículos de la presente edición, que presentan aportes orientados a la reducción de la intermitencia eléctrica de manera sustentable, el diseño de una red de sensores inalámbricos en el sector de cultivos y una comparación de la gestión de la demanda en política energética para el caso chileno y alemán.

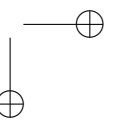
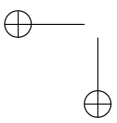
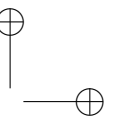
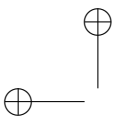


TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Firmness and Commitment to Continue Growing** 207
Firmeza y compromiso para seguir creciendo
Nelson Leonardo Diaz A. · Sergio A. Rojas

Electrical and Electronic Engineering

- A New Way to Reduce Electrical Intermittency in a Sustainable Way, Case Study: A Pumped Storage Reservoir-Solar Hybrid System in Mexico** 209
Una Nueva Forma de Reducir la Intermittencia Eléctrica de Manera Sustentable, Caso de Estudio: un Sistema Híbrido Tipo Rebombéo Solar en México
Leonardo de Jesús Ramos Gutiérrez · Manuel Montenegro Fragoso
- Wireless Sensor Network in the Acquisition of Data in Greenhouses** 224
Red de Sensores Inalámbricos para la Adquisición de Datos en Casas de Cultivo
Alexandra Madruga-Peláez · Abel Estevez-Pérez · Richar Sosa · Carlos M. García Algora · Iván Santana
- Demand Side Management on the Chile Industry: Learning From the German Case** 235
Gestión de la Demanda en la Industria de Chile: Aprendiendo del Caso Alemán
Axel BastiánPoque · Meyli Valín Fernández · Luis Ramirez · Javier Valdes · Yunesky Masip Macía
-
- Instructions for Authors** 252

Firmeza y compromiso para seguir creciendo

REVISTA Ingeniería

Ha finalizado un nuevo proceso de indexación en Publindex por parte de Colciencias y, en esta ocasión, la Revista Ingeniería ha sido merecedora de ser clasificada en categoría B. Recordemos que en el ejercicio anterior la Revista fue injustamente excluida de dicho índice; no obstante los sólidos reclamos realizados por el equipo editorial que conllevaron a la misma Colciencias a reconocer que a pesar del cumplimiento de los criterios de calidad de la categoría B no reversaría su dictamen oficial por considerarlo un caso particular (como lo ilustramos ampliamente en una nota editorial anterior [1]). Lo anterior afectó notablemente el flujo de envíos de artículos de autores nacionales durante el periodo transcurrido; sin embargo, la firmeza y solidez de los procesos editoriales se han mantenido, permitiendo casi dos años después lograr nuevamente este reconocimiento, que celebramos con la confianza de que revitalice el crecimiento de la Revista en el corto plazo. De allí que aprovecháramos este espacio para compartirlo con nuestros lectores.

Vale la pena observar que la reclasificación se produce de manera simultánea con la actualización de las métricas de impacto calculadas por la base de datos bibliográfica de Google Scholar. En ella, la Revista Ingeniería aparece en las mejores diez revistas hispanoamericanas de esta disciplina [2], obteniendo un índice h5 de 9. Dichas noticias refrescan y reflejan visiblemente el reconocimiento que la comunidad académica hace en relación con la dinámica que ha adquirido los procesos de publicación en la Revista, a la rigurosidad editorial, a la agilidad en la evaluación por pares, al acompañamiento a los autores y en general a la calidad del contenido que la misma difunde. Lo anterior es todavía más notorio al comprobar que en estos dos últimos años la mayoría de las contribuciones provienen de países como Chile, México, Ecuador, Perú, Cuba y Argentina, demostrando su incursión en la región latinoamericana.

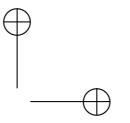
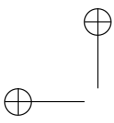
Consideramos que es un momento apropiado para mencionar las iniciativas que esperamos fortalecer en el futuro cercano, buscando continuar avanzando por el sendero del crecimiento y la consolidación como medio de divulgación científica en ingeniería:

- Transición gradual al idioma inglés, mediante el apoyo de correctores de estilo bilingües; esto sin restringir la posibilidad a nuestra comunidad hispanoamericana de lectores y autores de difundir resultados de investigación en su lengua natal.

Open access



Citación: S. Rojas and N. Díaz, "Firmeza y compromiso para seguir creciendo", Ingeniería, vol. 24, no. 3, pp. 207-208, Sep-Dec. 2019.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.15324>



- Fortalecimiento la proyección nacional y latinoamericana, a través de alianzas con eventos locales e internacionales para publicar versiones extendidas de mejores trabajos. De esta manera se pretende favorecer la visibilidad de los trabajos más destacados así como de la misma Revista en los grupos de investigación regionales.
- Publicación exclusivamente en línea para evitar retrasos de impresión, además de permitir una reorientación de recursos que agilicen los procesos de gestión editorial.
- Migración a modelo de publicación por secciones especializadas, coordinadas por editores de sección expertos con reconocida trayectoria en sus áreas.
- Seguimiento periódico de desempeño y núcleos de temáticas consolidadas y emergentes, mediante análisis bibliométricos.
- Activación y mantenimiento de redes sociales de la Revista, así como medición de indicadores alternativos de visibilidad (Altmetrics).
- Revisión de inclusión en Emerging Sources Citation Index y, en un mediano plazo, gestionar y posicionar la revista en otros índices bibliográficos citacionales como Web of Science y SCImago.

De esta manera queremos invitar a nuestra comunidad de lectores, autores y evaluadores a acompañarnos en estas iniciativas y participar en este proyecto colaborativo de construcción de un espacio idóneo para la divulgación de sus resultados de investigación, con criterios rigurosos, eficientes y efectivos en términos de amplia visibilidad e impacto. De nuestra parte, ofreceremos nuestro mejor esfuerzo y compromiso para lograrlo.

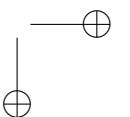
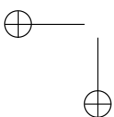
Bogotá D.C., 1 de septiembre de 2019

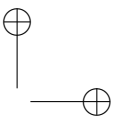
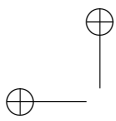
Nelson Leonardo Diaz A., PhD.
Editor Revista *INGENIERÍA*

Sergio A. Rojas, PhD.
Editor Honorario *INGENIERÍA*

Referencias

- [1] Rojas, S. A. “Excluidos sin justa causa”. *Ingeniería*, vol. 23, núm. 1, pp. 4-6, Ene. 2018. ↑207
- [2] Google Scholar, “20 publicaciones principales que coinciden con ingeniería”. [En línea] Disponible en: [https://scholar.google.com/citations?hl=es&view_op=search_venues&vq=ingenieria&btnG=\(ultimaconsulta:septiembre01de2019\)](https://scholar.google.com/citations?hl=es&view_op=search_venues&vq=ingenieria&btnG=(ultimaconsulta:septiembre01de2019)) ↑207





Research

A New Way to Reduce Electrical Intermittency in a Sustainable Way, Case Study: A Pumped Storage Reservoir-Solar Hybrid System in Mexico

Una Nueva Forma de Reducir la Intermittencia Eléctrica de Manera Sustentable, Caso de Estudio: un Sistema Híbrido Tipo Rebombear Solar en México

Leonardo de Jesús Ramos Gutiérrez^{*1}, Manuel Montenegro Fragoso^{**2}

¹ Comisión Federal de Electricidad, ²Universidad Panamericana, Campus Guadalajara
Correspondence e-mail: leonardo.ramosg@cfe.mx*, mmontene@up.edu.mx**

Received: 21/03/2019. Modified: 18/06/2019. Accepted: 30/07/2019

Abstract

Context: Mexico before 2013, had a unilateral government-like control of the electricity sector, a situation that was modified with the energy reform, where the operating policies changed, creating a new scheme based on a Wholesale Electricity Market (MEM) through an open market and where the sources with the greatest presence to date are intermittent power generation sources, such as; photovoltaic solar power plants and wind power plants. The intermittency of these sources arising in the electrical transmission network will cause a problem of energy security called the duck curve.

Method: This technical-administrative study makes a detailed panorama to structure a model through decision making with the Hierarchical Analysis Process (AHP, acronym in English) to repower the Mexican electric sector by making decisions with social criteria, environmental, economic, political and technical.

Results: A sensitivity analysis is presented as a result of the LINGO Software and Web Hipre that supports the criterion and sub-criterion that will benefit the most by including a new innovation called Re-pumping-solar to save-the public finances and decrease the electrical intermittency in Mexico.

Conclusions: Lead to decision making, technologies within energy policies without the need for a physical model, but yes; with an investigation of operations verifying the feasibility of said technologies.

Keywords: decision making, energy security, innovation, intermittent, pumped storage reservoir solar, sensitivity analysis.

Language: Spanish.

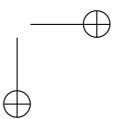
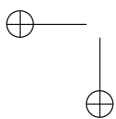
Open access



Cite this work as: L.Ramos and M. Montenegro., "A New Way to Reduce Electrical Intermittency in a Sustainable Way, Case Study: A Pumped Storage Reservoir-Solar Hybrid System in Mexico", Ingeniería, vol. 24, no.3, pp. 209-223, Sep-Dec. 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.14256>



Resumen

Contexto: México, antes de 2013, tenía un control unilateral tipo gubernamental del sector eléctrico, situación que fue modificada con la reforma energética donde las políticas de operación cambiaron, creando un nuevo esquema basado en un mercado eléctrico mayorista (MEM) a través de un mercado abierto; al mismo tiempo, las fuentes con mayor presencia a la fecha son las fuentes de generación eléctrica tipo intermitente, tales como las centrales solares fotovoltaicas y las centrales eólicas. La intermitencia que de estas fuentes surja en la red de transmisión eléctrica provocará un problema de seguridad energética denominado la curva de pato.

Método: Este estudio técnico-administrativo realiza un panorama pormenorizado para estructurar un modelo a través de la toma de decisiones con el proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), ello con el fin de repotenciar el sector eléctrico mexicano mediante la toma de decisiones con los criterios sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos.

Resultados: Se presenta un análisis de sensibilidad resultado del software Lingo y Web-Hipre, el cual sustenta el criterio y subcriterio que mayor beneficio tendrá al incluir una nueva innovación denominada rebombeo solar, ello para salvaguardar las finanzas públicas y disminuir la intermitencia eléctrica en México.

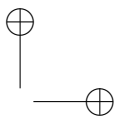
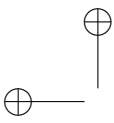
Conclusiones: Llevar a la toma de decisiones y tecnologías dentro de políticas energéticas sin necesidad de un modelo físico, pero sí con una investigación de operaciones, comprobando la factibilidad de estas.

Palabras clave: análisis de sensibilidad, innovación, intermitencia, rebombeo solar, seguridad energética toma de decisiones.

Idioma: Español

1. Introducción

En la búsqueda de un esquema práctico y sustentable para cumplir con los compromisos ambientales y disminuir la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) derivados del modo de producción eléctrico actual, México ha recurrido a la energía renovable, particularmente a la energía solar o a la fuente de energía eléctrica eólica. Sin embargo, considerando que ambas son fuentes de energía eléctrica denominadas limpias (no generan dióxido de carbono o CO₂), además de utilizar recursos renovables para su producción eléctrica, no alcanzan un grado de confiabilidad si no cuentan con el respaldo de una capacidad instalada de almacenamiento de energía eléctrica. Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio propone una tecnología híbrida en búsqueda de evitar un problema futuro de regulación y abasto eléctrico que provocaría la intermitencia de las fuentes solares y eólicas en el sistema eléctrico mexicano (SEN). El sistema que se propone es una central de almacenamiento de energía por bombeo, junto con la incorporación de un sistema de paneles solares flotantes sobre el embalse inferior, de ahí la denominación híbrida. Al ser una tecnología nueva para México y el mundo, primero se debe convencer a los expertos que toman decisiones en el Gobierno mexicano de que la propuesta funciona. Esta tecnología híbrida debe ser incluida en el parque eléctrico mexicano, ya que, como lo establecen en [1], se ha comprobado que las fuentes de energía solar y eólica acarrearán el fenómeno de la curva de pato en el mediano plazo, luego de alimentar las redes de transmisión eléctrica.



La curva de pato representa gráficamente un déficit de potencial eléctrico durante las horas de despacho, derivado de la intermitencia eléctrica proveniente de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, lo cual pone en riesgo la seguridad energética, como se indica en [2]. Este fenómeno en el SEN provocará sobrecostos provenientes de la alteración eléctrica en diversos sectores de consumo en momentos fluctuantes dentro de las líneas de transmisión y distribución eléctrica, ello para la regulación de estas y la estabilización de la red.

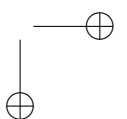
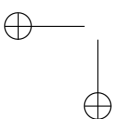
Con apego a [3], donde los autores de manera coordinada han sabido intercalar distintas fuentes de energía eléctrica de modo sustentable, se impulsó la idea de abatir la intermitencia eléctrica; así, en México, a mediano plazo, se puede desarrollar un modelo de sensibilidad con participación de quienes toman decisiones en el Gobierno para impulsar la creación del primer rebombero solar en este país. Para esto, se recurrió al método de [4], un estudio con base en procesos analíticos jerárquicos para la toma de decisiones, se realizó una encuesta que involucró la opinión de expertos dentro de los aspectos del desarrollo sustentable: aspecto social, ambiental, económico, político y, finalmente, el técnico. Mediante el *software* Lingo y Web-Hipre se busca representar gráficamente la toma de decisiones que consideraron pertinente los expertos. Con la opinión de expertos se busca determinar si procede construir un rebombero y paneles solares flotantes como solución para lograr una autosuficiencia energética, la estabilización de la red nacional mexicana y un equilibrio en el despacho eléctrico con un manejo asequible de tarifas.

2. Metodología

En primer lugar, se procedió a identificar el estado actual de los rebombero en México con base en el marco teórico, y particularmente con el Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018 es el más reciente convenio), donde se pudo identificar que en México no existe ningún rebombero y, mucho menos, una mezcla en uso con la energía solar fotovoltaica (paneles solares flotantes).

Derivado de lo anterior, se recurrió a los resultados de las últimas tres subastas del mercado eléctrico mayorista (MEM), además de identificar la participación actual de las energías renovables tipo solar y eólica en otros mercados eléctricos para conocer los impactos de estas tecnologías en ellos (Figura 1). Así, se encontró el fenómeno de la curva de pato que ha desestabilizado mercados eléctricos, se tomó como muestra el mercado eléctrico de los Estados Unidos de América, específicamente en el estado de California. Con estos datos se identificó la alerta futura para evitar que la intermitencia en el parque eléctrico mexicano presente sobre costos y problemas de despacho a largo y mediano plazo.

Posteriormente, se recurrió a la búsqueda del comportamiento evolutivo de la participación de forma aislada de las fuentes de energía solar fotovoltaica y la energía eólica en el SEN. La energía solar, en el periodo 2010-2018, experimentó un incremento de 4397 MW en cuanto a capacidad instalada se refiere, lo que podría traducirse en un promedio de 549 625 MW por año; sin embargo, en números reales el mayor incremento evolutivo de la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica ha sido de 3752 MW instalados, que comprendió el periodo 2017 y 2018 respectivamente.



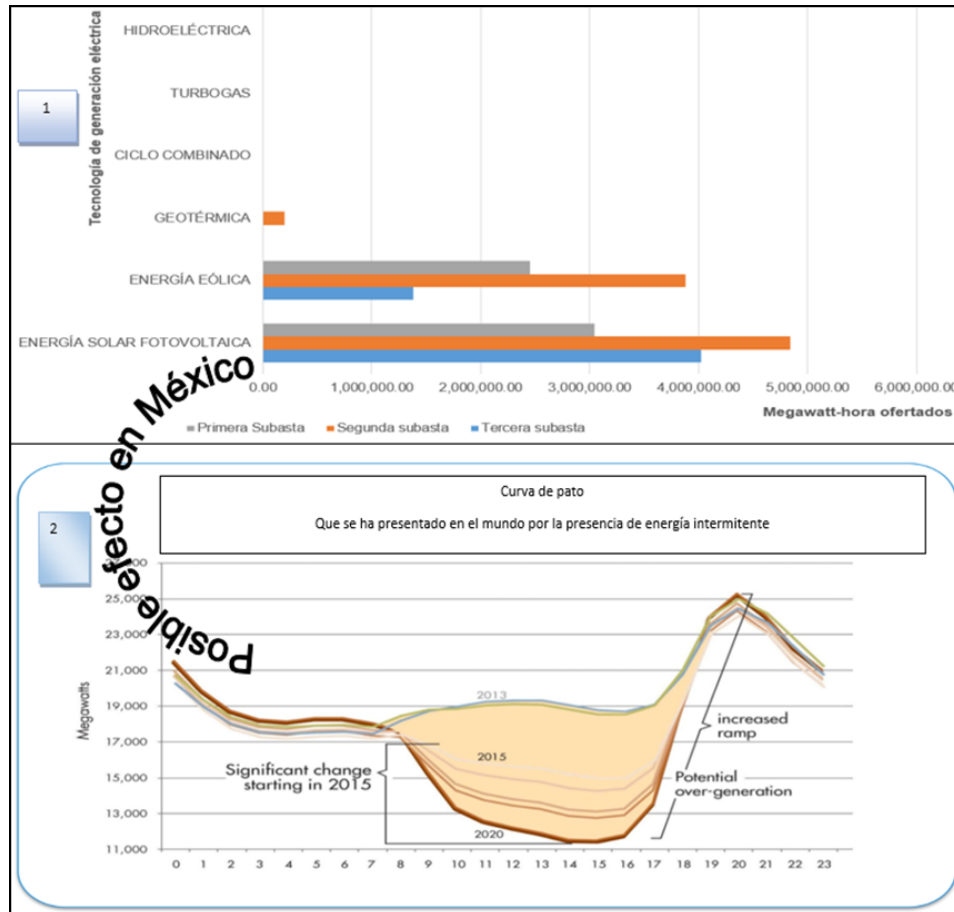


Figura 1. Resultados de las Subastas del MEM (1) y la curva de pato que se presentó en California, EUA (2) en el 2018.

La energía solar, en el periodo del 2010-2018, experimentó un incremento de 4397 MW en cuanto a capacidad instalada se refiere, lo que podría traducirse en un promedio de 549 625 MW por año; sin embargo, en números reales, el mayor incremento evolutivo de la capacidad instalada de la energía solar fotovoltaica ha sido de 3752 MW instalados, que comprendió el periodo entre 2017 y 2018.

Finalmente, se identificó la participación actual de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica en el SEN. Los resultados obtenidos hasta el mes de diciembre de 2018 presentan 6590.88 MW de capacidad instalada de energía eólica, lo que equivale al 8.09 % de la capacidad total del país en México, y una capacidad instalada de energía solar fotovoltaica de aproximadamente 4426.21 MW, es decir, 5.43 % de la capacidad instalada en el parque eléctrico mexicano (Figura 2).

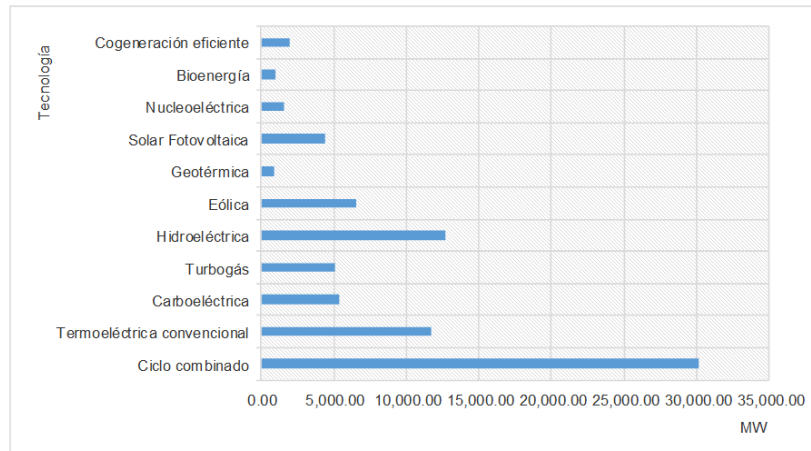


Figura 2. Capacidad instalada del sector eléctrico nacional mexicano hasta el diciembre de 2018.

El paso siguiente fue verificar en tiempo real los registros del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). En lo particular se indagó en los registros de generación eléctrica coincidente, el día 14 de diciembre del 2018, donde se pudo observar las manifestaciones de déficit y el sustento técnico para promover el abatimiento de la intermitencia eléctrica antes de que crezca la curva de pato en el SEN, como ocurrió en el mercado eléctrico de California, Estados Unidos (Figura 3)

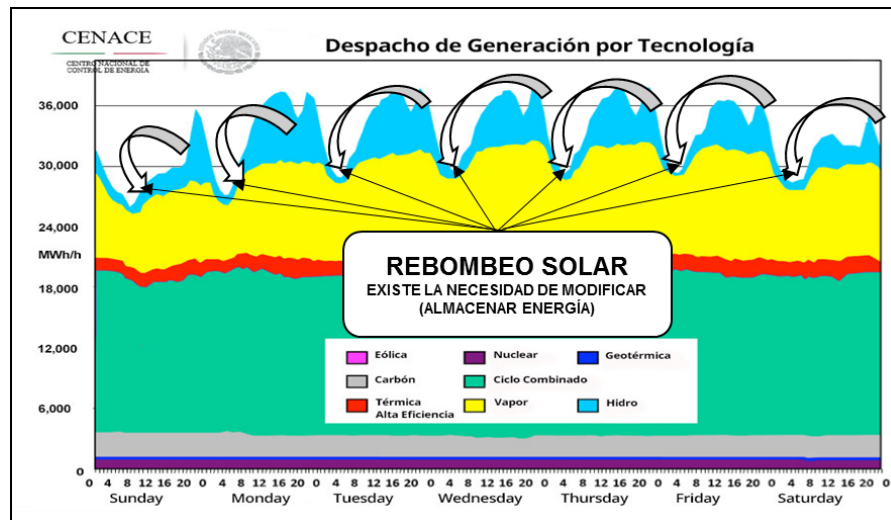


Figura 3. Generación eléctrica coincidente en tiempo real.

Fuente: CENACE, México 14 de diciembre 2018.

Finalmente, utilizando el *software* Plexus, que es el programa con que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realiza el programa de obras e inversiones del sector eléctrico (POISE), y con

el cual el CFE controla y regula su expansión de proyectos, se realizó una prueba de un rebombeo solar para vislumbrar cómo hubiera impactado en el sistema de Baja California para el 2017 (este año fue seleccionado al azar, así como la región), y contar con un soporte técnico del beneficio en tiempo real de esta tecnología (Figura 4).

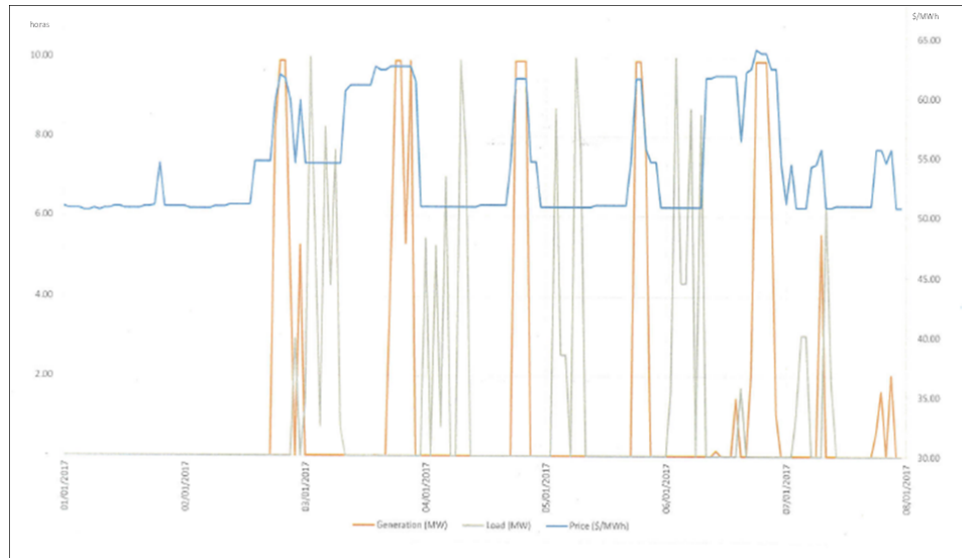


Figura 4. Resultado del impacto de un rebombeo solar en el sistema eléctrico Baja California Norte, en México (Plexus).

Este sistema no tiene déficit. No obstante, se necesitó demostrar de forma determinística el impacto de progreso económico, y con el nuevo acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (AEUAMC) resultaba interesante ver cómo minimizar costos y evitar pérdidas en cuanto a generación eléctrica se refiere para México, porque el sistema eléctrico de Baja California norte compra potencia a los Estados Unidos de América como medida de regulación de la red de transmisión eléctrica. Para tal fin, se valoró un rebombeo solar de 50 MW de capacidad instalada como rebombeo y 30 MW de capacidad instalada de paneles solares flotantes; entonces, con base en la Figura 4, se puede observar que al incluir este rebombeo solar el *software* Plexus (línea azul) minimiza los costos de generación, y cuando se presenta una fluctuante carga que se traduce en sobrecostos, la energía solar en horas base mitigaría esos impactos y garantizaría tarifas bajas.

Por otro lado, se tomó los ocho primeros días de 2017 para poder mediar en tiempo real la posibilidad de garantizar, en una semana, un control del costo de generación (línea naranja). En este sentido, la curva de la Figura 4 muestra que es posible cubrir demandas inesperadas de energía eléctrica que con el nuevo AEUAMC se convertirían en sobrecostos que el usuario tendría que cubrir. Es así como, al insertar un rebombeo solar con la capacidad nominal referida, se presentó una curva que minimiza en ciertos momentos un descontrol de abasto eléctrico entre la generación eléctrica y la carga (demanda), lo cual es un resultado positivo porque controlando estos dos factores se garantiza un servicio eléctrico asequible.

Con base en este resultado determinístico, se contó con la certeza para poder conformar una encuesta bajo parámetros medidos que le brindarían consistencia y coherencia al aspecto económico, de cómo se hubiera comportado un sistema eléctrico en México (en este caso el sistema eléctrico de Baja California en el 2017), particularmente en ahorros económicos, de haber contado con una tecnología como la que se propone.

Teniendo el soporte que haría a la encuesta consistente con la opinión de expertos, se procedió a elaborarla con un sustento basado en que el MEM no brinda participación a los sistemas híbridos, pero bajo el amparo del problema aún minúsculo en el comportamiento del CENACE en tiempo real y la curva de pato en otros mercados eléctricos internacionales, se piensa en el almacenamiento de energía eléctrica en México como una necesidad, teniendo, además, el impulso de las políticas y compromisos ambientales ante la Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU), y en particular con la expedición de la Ley General de Cambio Climático promulgada en el 2012. Esta última impulsa la creación de nuevas fuentes de energía limpia, entendiendo esto como aquellas tecnologías destinadas a la producción de energía eléctrica que no produzcan (CO_2).

Es así como la encuesta se estructuró haciendo del conocimiento a los expertos la inclinación excesiva del MEM hacia las energías solar y eólica, pero, además, las consecuencias que de esto puedan acarrear si el MEM no tiene un respaldo de almacenamiento eléctrico. Con apego a lo anterior, se tuvo certeza para poder hacer la encuesta utilizando el método AHP [4], pero aplicado a las energías renovables [5]. Luego, entonces, se seleccionó un universo de 50 expertos distribuidos en las especialidades que impulsan la sustentabilidad en México, porque era importante que la tecnología de rebombeo solar fuera considerada impulsora de desarrollo sustentable y cumplir con la normativa de ley ambiental vigente en México. Los expertos encuestados fueron especialistas en aspectos sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos para determinar el factor con mayor incidencia sustentable y presentarlo en el MEM con el fin de alcanzar la aprobación de esta nueva tecnología y, con ella, generar energía eléctrica en el SEN (Figura 5).

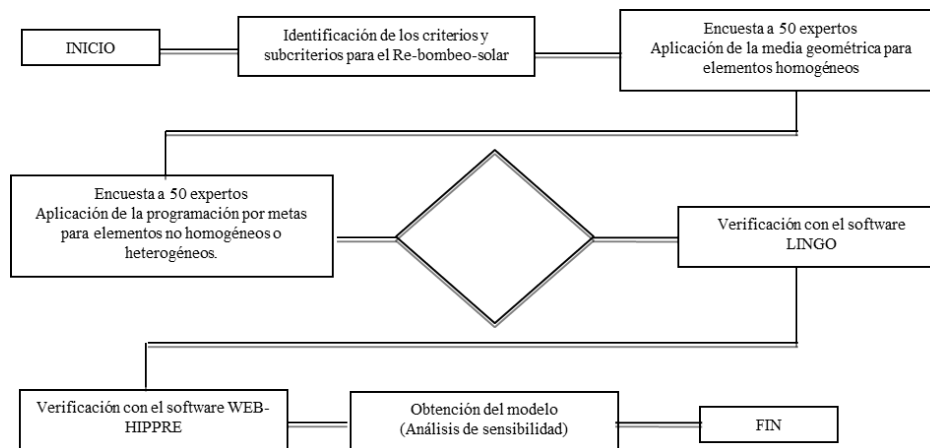


Figura 5. Procedimiento para la toma de decisiones de incluir en el MEM un rebombeo solar.

Una vez que se identificaron los criterios sociales, ambientales, económicos, políticos y técnicos, se establecieron los subcriterios de cada uno de ellos: (a) criterio social, recreación y turismo, venta de certificados de energía limpia, reasentamientos humanos, aceptación social, generación de empleos, comunidades y medios de sustento; (b) criterio ambiental, impacto en el ecosistema, emisiones de CO₂ por KWh, hectáreas ocupadas por KWh; (c) criterio económico, precio de energía, viabilidad económica, costo de operación y mantenimiento, costo de generación KWh, costo de construcción del KWh; (d) criterio técnico, confiabilidad, madurez tecnológica, eficiencia energética, tiempo de vida, tiempo de construcción, disponibilidad de recursos, recurso humano experto, disponibilidad para su transmisión, y (e) criterio político, seguridad energética y beneficios económicos.

Se siguieron los esquemas de [5] y, posteriormente, el método de consistencia [4] para desechar aquellas encuestas que no alcancen el orden que establezca el método de consistencia de matrices pareadas, donde:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

CI es el coeficiente de consistencia, una medida de desviación de la consistencia de la matriz derivado de la comparación de pares. Calculando el máximo valor propio de la matriz de comparaciones es como se obtiene dicho coeficiente. En casos donde pueda existir inconsistencia en los juicios el valor propio tiende a ser mayor que el rango de la matriz; para ello, λ es el máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares y n es el número de criterios. Para ejemplificar este cálculo, se presentan los folios 014 y 015 correspondientes al criterio técnico (Figura 6).

Folio:014														
	Confiabilidad	Madurez Tecnológica	Eficiencia energética	Tiempo de vida	Tiempo de construcción	Disponibilidad de recursos	Recurso humano experto	Disponibilidad para su transmisión			$(\lambda_{max}) / (n-1)$	λ_{max}	CI	CR-CIR
Confiabilidad	1	1	1/2	1/2	5	3	3	4	0.159	1.4165	8.9240			
Madurez Tecnológica	1	1	1/3	3	4	3	4	3	0.184	1.6405	8.9240			
Eficiencia energética	2	3	1	3	5	5	4	3	0.282	2.5189	8.9240			
Tiempo de vida	2	1/3	1/3	1	3	3	3	2	0.138	1.2305	8.9240			
Tiempo de construcción	1/5	1/4	1/5	1/3	1	1/3	1/4	1/4	0.030	0.2675	8.9240			
Disponibilidad de recursos	1/3	1/3	1/5	1/3	3	1	4	1/3	0.067	0.5974	8.9240			
Recurso humano experto	1/3	1/4	1/4	1/3	4	1/4	1	1/3	0.048	0.4310	8.9240			
Disponibilidad para su transmisión	1/4	1/3	1/3	1/2	4	3	3	1	0.052	0.5217	8.9240			0.0943
Folio:015														
	Confiabilidad	Madurez Tecnológica	Eficiencia energética	Tiempo de vida	Tiempo de construcción	Disponibilidad de recursos	Recurso humano experto	Disponibilidad para su transmisión			$(\lambda_{max}) / (n-1)$	λ_{max}	CI	CR-CIR
Confiabilidad	1	1/8	1/8	1/8	1/8	1/9	1/9	1/7	0.008	0.1295	16.0880			
Madurez Tecnológica	8	1	8	8	7	8	7	7	0.331	5.3384	16.0879			
Eficiencia energética	8	1/8	1	1/7	1/7	7	1/7	7	0.089	1.4256	16.0880			
Tiempo de vida	8	1/8	7	1	1/7	8	1	1/7	0.115	1.8484	16.0879			
Tiempo de construcción	8	1/7	7	7	1	1/6	1/7	7	0.134	2.1617	16.0880			
Disponibilidad de recursos	9	1/8	1/7	1/8	6	1	1	7	0.103	1.6578	16.0883			
Recurso humano experto	9	1/7	7	1	7	1	1	7	0.156	2.5057	16.0881			
Disponibilidad para su transmisión	7	1/7	1/7	7	1/7	1/7	1/7	1	0.065	1.0429	16.0880			0.0263

Figura 6. Consistencia de la encuesta para integrar en el MEM un rebombeo solar.

Por lo anterior, se puede apreciar cómo se realizó la simetría (importancia número entero, lo simétrico, es decir, menos importante es fracción) a través de una matriz diagonal en orden de importancia ante las respuestas de expertos. En el folio 014 se obtuvo un CI menor a 1, con lo que, de acuerdo con [4], se determina que tiene consistencia. En el caso del folio 015, se determinó un CI mayor a la unidad, por lo que se rechaza, no tiene consistencia al no tener una lógica establecida al responder la encuesta. De esta forma se analizaron las 50 encuestas.

Al combinar este estudio en un método técnico-administrativo, se entrevistaron expertos de diversas ramas a cada criterio (sociales, ambientales, económicas, políticas y técnicas); por tal motivo, se tuvo un procedimiento de evaluación [6] para analizar elementos homogéneos y no homogéneos (heterogéneos). Entonces, se necesita determinar un modelo de sensibilidad para la toma de decisiones con la finalidad de que, a través de la opinión de expertos, este estudio pueda ser un instrumento técnico-administrativo que impulse la viabilidad de un sistema híbrido tipo rebombeo solar que pueda impactar positivamente el SEN.

Existen varias formas de llegar a un modelo para el fin que se persigue [4], [6]; para ello, se procedió con la siguiente metodología para cada experto en su rama, es decir, elementos homogéneos (Figura 7).

Ejemplificando el procedimiento, se tomó el folio 001. Se considera la matriz de elementos pareados (orden de importancia, paso 1) de cada experto encuestado, se normaliza hasta encontrar el CI (coeficiente de consistencia, paso 5). Posteriormente, se determina el vector prioridad a través de un proceso iterativo (E1-E0), hasta tener un vector con elementos menores a la unidad, ese es el vector prioridad. Este procedimiento es para todos y cada una de las matrices de los expertos encuestados [6] (Figura 8).

Una vez que se obtuvo el vector propio, se afecta la matriz de cada encuestado con una media geométrica, ello en favor de tener el índice de consistencia [4] para elementos homogéneos y el valor de n con las características propias de la matriz de cada encuesta de expertos; para este caso, son cinco elementos homogéneos. Por tal motivo, al normalizar las matrices de los encuestados el parámetro 0.10 se considera una consistencia razonable.

Posterior a la conclusión del proceso de matrices pareadas para criterios homogéneos, se procede a la parte de análisis [4]. Cabe señalar que durante este análisis un subcriterio de desviación será no deseado cuando alcance su valor más pequeño, es decir, cero, ya que los expertos encuestados pasan de su área de dominio (homogéneo) al campo cualitativo de las otras especialidades al responder la parte de los subcriterios (heterogéneo o no homogéneo) y la desviación típica de estos (varianza) durante el proceso de análisis debe minimizarse.

De ahí se tomará la decisión, siguiendo la opinión de expertos, de qué subcriterio será el más útil. Esta técnica es necesaria como apoyo al método de análisis de jerarquías para la toma de decisiones (AHP, por sus siglas en inglés), porque este último no garantiza por sí mismo a través de la media geométrica el valor óptimo, por no tener un grupo de expertos no homogéneo en los datos base; este es el motivo por el cual la programación por metas debe minimizar la desviación de los datos base, la desviación provocada por la media geométrica del AHP, el subcriterio máximo y la varianza mínima [4].

Derivado de lo anterior, se recurrió al software Lingo [7], [8], y una vez obtenidas las ponderaciones [4], se procedió a comparar estas con los resultados mediante Web-Hipre para tener certeza. El software Web-Hipre es una herramienta necesaria para jerarquizar y generalizar de forma más rápida la toma de decisiones y crear el árbol de decisión [8], [9].

A NewWay to Reduce Electrical Intermittency in a SustainableWay, Case Study

Matriz No. 1

PASO 1.- Matriz de comparación por Pares - Criterios de energía limpia para una nueva infraestructura en el MEM

FOLIO 001	Criterio	Social	Ambiental	Económico	Político	Técnico
	Social	1	5	5	5	5
	Ambiental	1/5	1	4	5	3
	Económico	1/5	1/4	1	2	2
	Político	1/5	1/5	1/2	1	2
	Técnico	1/5	1/3	1/2	1/2	1

Matriz No. 2

PASO 2.- Elevando al cuadrado, la matriz de comparación por Pares (1ª iteración)

FOLIO 001	Criterio	Social	Ambiental	Económico	Político	Técnico
	Social	5.000	13.917	35.000	47.500	45.000
	Ambiental	2.800	5.000	13.000	20.500	25.000
	Económico	1.250	2.567	5.000	7.250	9.750
	Político	0.940	2.192	3.800	5.000	6.600
	Técnico	0.667	1.892	3.583	4.667	5.000

PASO 3.- Primer vector propio E0 (1ª iteración)

FOLIO 001 (Anexo 1)	Criterio	B (Suma horizontal)	B / A = E0 (División)
	Social	146.417	0.5365
	Ambiental	2.800	0.2429
	Económico	1.250	0.0946
	Político	0.940	0.0679
	Técnico	0.667	0.0579
	Total (A)	272.873	1.000

Matriz No. 3

PASO 4.- Elevando al cuadrado la matriz No. 2 de comparación por Pares (2da. iteración)

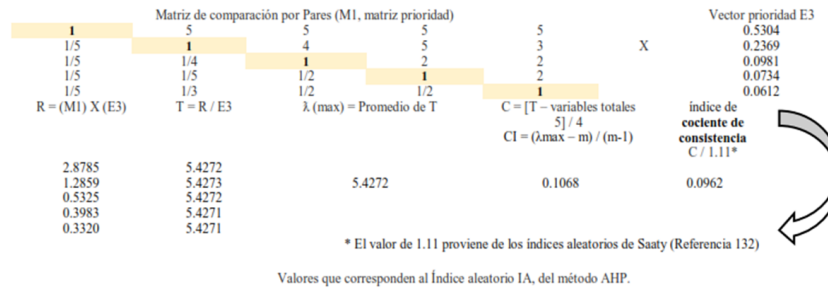
FOLIO 001	Criterio	Social	Ambiental	Económico	Político	Técnico
	Social	182.37	418.23	872.67	1224.04	1452.67
	Ambiental	80.19	189.55	395.48	548.92	638.05
	Económico	33.00	77.40	164.60	229.99	265.77
	Político	24.69	57.24	123.04	172.93	200.14
	Técnico	20.83	47.62	101.49	143.09	168.03

PASO 5.- Segundo vector propio E1 (2da. iteración)

FOLIO 001	Criterio	B (Suma horizontal)	B / A = E1 (División)	E1 - E0 (hasta llegar a cero)
	Social	4149.971	0.5299	-0.0067
	Ambiental	1852.191	0.2365	-0.0065
	Económico	770.760	0.0984	0.0038
	Político	578.036	0.0738	0.0059
	Técnico	481.061	0.0614	0.0035
	Total (A)	7832.019	1.000	

Figura 7. Metodología para la obtención del modelo de sensibilidad.

Para el caso de elementos no homogéneos (heterogéneos) se generalizó la toma de decisiones con base en un árbol de decisión y metodologías probabilísticas (Web-Hipre), pero en este procedimiento se tendría un proceso largo y con un sesgo de error importante [10], ya que el árbol de decisión de criterios y subcriterios de la Figura 9 lleva respuestas cualitativas, es decir, un peso multiatributo de los vectores prioridad [4], y es coherente porque las respuestas con que se abastecería el Web-Hipre provienen de los expertos encuestados dentro y fuera de su especialidad. Este error puede desviar el aspecto prioritario para proponer el rebombeo solar ante el MEM.



"n" elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio de consistencia AI	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Nota: Los valores proviene de la Fórmula $IA = 1.98 \times (n - 2) / n$
 Donde,
 $CI / IA \leq 0.10$ se considera consistencia razonable
 $CI / IA > 0.10$ se considera una inconsistencia

Figura 8. Ejemplo del procedimiento.

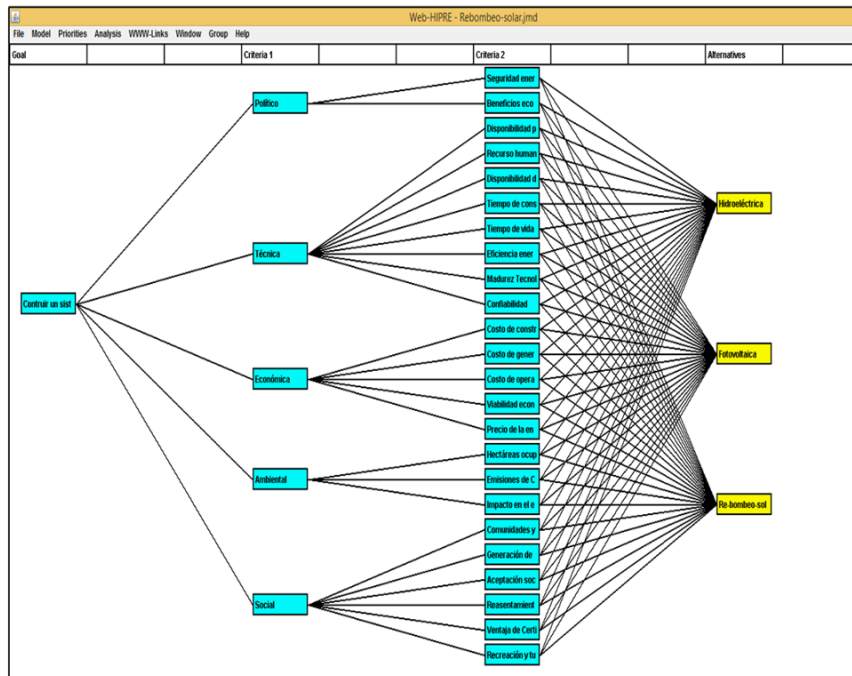


Figura 9. Árbol de decisión para determinar el aspecto prioridad de incluir en el MEM, un rebombeo solar.

Ahora bien, conociendo la limitante del Web-Hipre, se recurrió a la utilización del *software* Lingo (*Linear Generalize Optimizer*) [7]. Este *software* es una herramienta simple que formula problemas lineales y no lineales, los resuelve rápidamente y los analiza con una solución, es decir, optimiza el mejor resultado de un análisis de n variables, brinda la opción más alta y el dato más bajo (que para este estudio es lo que se busca lo más cercano a cero) con rangos de operación mínimos que debilitan la aparición de un error importante. Entonces, se procedió a vaciar los datos en el *software* Lingo y, en consecuencia, se comparó el modelo de sensibilidad del Web-Hipre para estar en condiciones de conocer el criterio de mayor impacto que produciría la tecnología de un rebombear solar en el MEM con apego a la opinión de expertos.

3. Resultados

Luego de alimentar el *software* Lingo con las matrices pareadas derivadas de la opinión de expertos, se obtuvieron los resultados de la consistencia de subcriterios para elementos no homogéneos (Figura 10).

$$\min=(1-1)*D+1*(n11+p11+n12+p12+n13+p13+n14+p14+n15+p15+n21+p21+n22+p22+n23+p23+n24+p24+n25+p25+n31+p31+n32+p32+n33+p33+n34+p34+n35+p35+n41+p41+n42+p42+n43+p43+n44+p44+n45+p45+n51+p51+n52+p52+n53+p53+n54+p54+n55+p55);$$

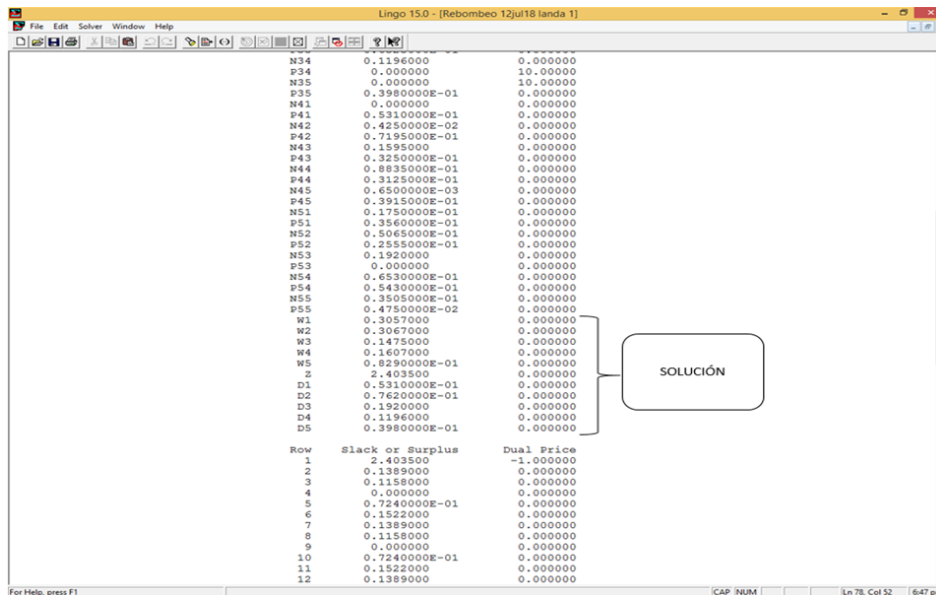


Figura 10. Ponderaciones de consistencia, obtenidas del *software* Lingo para elementos no homogéneos de este estudio.

Por su parte, el Web-Hipre proporciona una aproximación basada en la teoría de valor multiatributo (MAVT) como técnica de apoyo al método AHP para modelar las preferencias individuales de

los decisores y tener la agregación de modelos individuales en un modelo de grupo no homogéneo, lo que convierte a esta herramienta en favorable para utilizarse a lo largo de esta investigación para el fin que persigue [4], [10] (Figura 11).

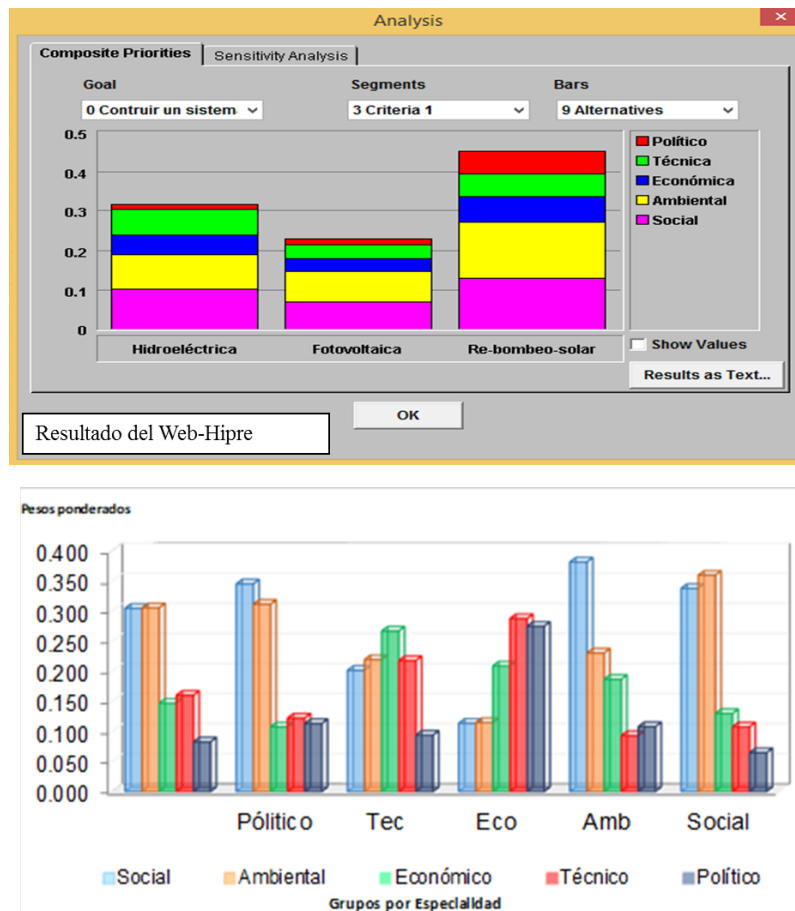
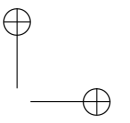
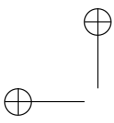


Figura 11. Ponderaciones de consistencia, obtenidas del software WebHipre para elementos homogéneos y heterogéneos de este estudio.

Con los datos normalizados provenientes de la opinión de expertos para elementos homogéneos (dentro de su especialidad respectiva), se obtuvo como resultado que, dentro de las tres opciones analizadas en el árbol de decisión, la tecnología propuesta es la mejor opción sustentable para el MEM.

Para la parte heterogénea de análisis, el *software* Lingo arroja un resultado de ponderación de 0.306 aproximadamente para la parte del criterio ambiental, ligeramente mayor en pesos de decisión con respecto a los del criterio social, que alcanzó un valor en ponderación de 0.305. Al



comparar estos valores con el modelo de sensibilidad del *software* Web-Hipre, los resultados alcanzan para la parte del criterio ambiental una ponderación de 0.452 dentro de sus subcriterios y una ponderación en peso de 0.387 del criterio social, teniendo un margen diminuto en diferencia.

4. Conclusiones

La curva de pato es un fenómeno que se ha presentado en la cobertura de energía eléctrica en México, se necesita construir infraestructura que respalde el SEN ante una fluctuante demanda de energía eléctrica y se eviten sobrecostos que los usuarios en el futuro estarán obligados a pagar. Con un rebombeo solar se regulan los altos disparos de los costos derivados de necesidad de generación eléctrica adicional en un momento determinado y la carga necesaria para garantizar un despacho eléctrico firme y constante. El *software* Lingo y Web-Hipre (para medir resultados con precisión de variables discretas y continuas) dieron como resultado que México, desde el punto de vista ambiental y social, necesita una nueva tecnología que respalde el MEM, y esa opción es un rebombeo solar.

Los expertos en materia social, ambiental, económica, técnica y política dentro del sector energético en México dictaminan, desde un punto de vista homogéneo (únicamente opinando desde el punto de vista de su especialidad), que un rebombeo solar es la mejor opción sustentable para el MEM. Además de ello, dictaminan (opinando en cada subcriterio de criterios distintos a su especialidad acerca de esta tecnología) que el mayor impacto positivo de un rebombeo solar en el MEM, será la parte ambiental, también que el segundo mayor impacto positivo será la parte social.

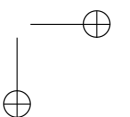
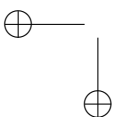
Se midió con el uso del *software* Plexus que un rebombeo solar impacta positivamente el SEN, y más con el crecimiento en participación de la energía intermitente como la energía solar y la energía eólica porque evitará la intermitencia eléctrica al controlar generación y carga.

El método AHP de Saaty [4] es un excelente instrumento para la toma de decisiones, pero debe ser optimizado con programas de mayor precisión ante subcriterios multivariantes para acotar el sesgo de error típico de la desviación estándar. La combinación de los programas Lingo y Web-Hipre son una combinación técnicoadministrativa que optimiza la toma de decisiones del método AHP, estos garantizan un sesgo de error diminuto.

Este estudio comprueba que es posible llevar a la toma de decisiones tecnologías dentro de políticas energéticas sin necesidad de un modelo físico, pero sí con una investigación de operaciones desde un punto de vista cualitativo (multiatributo) y posteriormente, un método cualitativo (media geométrica, programación por metas) con ayuda de programas como el Lingo y el Web-Hipre.

Referencias

- [1] A. Beltrán, H. Gracia-León, D. Rodríguez-Urrego, and L. Rodríguez-Urrego, "Design and calculation of a hybrid solar-hydraulic power station in Gran Canaria", *Dyna*, vol. 85, no. 206, pp. 250-257, 2018. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.70573> ↑210
- [2] A. Jain, A. Chakraborty, S. K. Gupta, K. K. Kandpal and N. Shukla, "Evaluating Pumped Hydro storage technology in the era of renewable generation and ancillary Markets", *Water and Energy International*, vol. 62, no. 1, pp. 33-38, 2019. ↑211



- [3] H. Zhang, Z. Lu, W. Hu, Y. Wang, L. Dong and J. Zhang, "Coordinated optimal operation of hydro-wind-solar integrated systems", *Applied Energy*, vol. 242, pp. 883-896, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.064> ↑211
- [4] T. Saaty, *Toma de decisiones para líderes: el proceso analítico jerárquico en la toma de decisiones en un mundo complejo*. Pittsburgh: RWS Publications, 1997. ↑211, 215, 216, 217, 218, 221, 222
- [5] F. Cavallaro, "Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 1678-1685, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.034> ↑215, 216
- [6] N. Gunantara, N. Putra, N and I. D. Nyoman, "The Characteristics of Metaheuristic Method in Selection of Path Pairs on Multicriteria", *Journal of Computer Networks and Communications*, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7983583> ↑217
- [7] I. Cahyadi and I. D. Anna, "A Multi-Criteria Model for Marketing Strategy Selection for Batik Fashion Creative Industry in Indonesia", *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, vol. 5, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33071> ↑217, 220
- [8] T. Kaya and C. Kahraman, "Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul" *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2517-2527, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.051> ↑217
- [9] J. Watróbski, J. Jankowski, P. Ziemia, A. Karczmarczyk and M. Zioto, "Generalised framework for multi-criteria method selection." *Omega*, vol. 86, pp. 107-124, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.07.004> ↑217
- [10] J. G. Pope, T. J. Hegland, M. Ballesteros, K. N. Nielsen and M. Rahikainen, "Steps to unlocking ecosystem based fisheries management: Towards displaying the N dimensional potato" *Fisheries research*, vol. 209, pp. 117-128, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.07.023> ↑218, 221

Leonardo de Jesús Ramos Gutiérrez

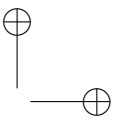
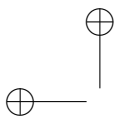
Jefe de Departamento en la Subgerencia de Anteproyectos Hidroeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, Funcionario Público) Candidato a Doctor en Ingeniería por la Universidad Anáhuac México, Maestro en Administración de la Construcción, por la Universidad Panamericana Campus Guadalajara, Ingeniero Civil por la Universidad Nacional Autónoma de México. Especialista en innovación eléctrica a base de recursos renovables, conferencista a nivel Nacional e Internacional y ganador de varios reconocimientos por trascendencia académica así como profesional en la rama de la hidráulica en México.

Correo electrónico: leonardo.ramosg@cfe.mx

Manuel Montenegro Frago

Ingeniero Civil por la UAG, Maestría en Ingeniería Hidráulica por la UNAM y Doctor en Ingeniería por la UNAM. Miembro de la IAHR, ASCE, AMH y CAA. Líneas de investigación: Hidroeléctricas, Agua, Crecimiento, Educación y Sostenibilidad. Actualmente Profesor Investigador de la Universidad Panamericana y Conferencista Internacional.

Correo electrónico: mmontene@up.edu.mx



Research

REVISTA
Ingeniería

Wireless Sensor Network in the Acquisition of Data in Greenhouses

Red de Sensores Inalámbricos para la Adquisición de Datos en Casas de Cultivo

Alexandra Madruga-Peláez^{*1}, Abel Estevez-Pérez², Richar Sosa², Carlos M. García Algora², Iván Santana²

¹ Instituto de Biotecnología de las Plantas (Villa Clara, Cuba), ² Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (Villa Clara, Cuba).

Correspondence e-mail: alexandra@ibp.co.cu*

Received: 12/02/2019. Modified: 06/05/2019. Accepted: 05/07/2019

Abstract

Context: The acquisition and storage of environmental parameters, through wireless sensor networks, makes it possible to analyze the growth and development of protected crops. This analysis in agriculture impose challenges because are living organisms and where it is not possible to control all the variables.

Method: A hardware and software architecture is designed using a wireless sensor network for acquisition of data in greenhouses. The simulations are carried out in the UEB of Various Crops “Valley of the Yabu” of Santa Clara for two hours with six measurement nodes, a coordinator and gateway. An energetic analysis of the proposal was made calculating the real life time of batteries.

Results: The experiments demonstrate the effectiveness of the design, storing all the measurements transmitted from different places inside the greenhouses. The energetic analysis guarantees high durability of the batteries of the measurement nodes.

Conclusions: With the acquisition system exposed, the values of the effective variables could be maintained or modified for reducing losses of resources and improving productive efficiency.

Keywords: Free hardware, precision agriculture, wireless sensor network.

Language: Spanish.

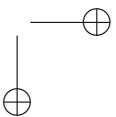
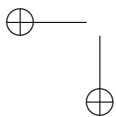
Open access



Cite this work as: A. Madruga, A. Estevez, R. Sosa, C. García, I. Santana, “Wireless Sensor Network in the Acquisition of Data in Greenhouses”, Ingeniería, vol. 24, no.3, pp. 224-234, Sep-Dec. 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.14437>



Resumen

Contexto: La adquisición y almacenamiento de parámetros ambientales, a través de redes de sensores inalámbricos, posibilita el análisis del crecimiento y desarrollo de cultivos protegidos. Dicho análisis en la agricultura presenta retos por tratarse de seres vivos, además de que no es posible controlar todas las variables.

Método: En este trabajo se diseñó una arquitectura de *hardware* y *software* utilizando una red de sensores inalámbricos para la adquisición de datos en casas de cultivo. Las simulaciones de la propuesta se realizaron en la unidad empresarial básica de cultivos varios Valle del Yabú de Santa Clara durante dos horas con seis nodos de medición, un coordinador y el *gateway*. Se realizó un análisis energético de la propuesta calculando el tiempo de vida real de las baterías.

Resultados: Los experimentos demostraron la efectividad del diseño, almacenando todas las mediciones transmitidas desde diferentes lugares dentro de las casas de cultivos protegidos. El análisis energético garantizó una alta durabilidad de las baterías de los nodos de medición.

Conclusiones: Con el sistema de adquisición expuesto se podrían mantener o modificar los valores de las variables efectivas para reducir pérdidas de recursos y mejorar la eficiencia productiva.

Palabras clave: Agricultura de precisión, hardware libre, red de sensores inalámbricos.

Idioma: Español

1. Introducción

La agricultura en el ámbito mundial está influida por los nuevos paradigmas tecnológicos; favorecida con los enormes avances en la informática y las comunicaciones. La agricultura de precisión surge con el desarrollo de nuevas tecnologías encaminadas hacia la agroindustria, definida como la utilización de un conjunto de tecnologías para la supervisión de condiciones físicas, químicas y climáticas del cultivo, con la finalidad de optimizar el uso de recursos en el proceso productivo y la calidad en los productos [1].

La recolección de información, supervisión y evaluación de un sistema de cultivo resulta determinante para una efectiva toma de decisiones [2]. Este enfoque es complejo, especialmente en entornos de procesamiento como es el caso de la agricultura debido al fuerte carácter estocástico que presenta [4], [5]. A su vez, la toma de decisiones relacionadas con el manejo de los recursos hídricos posibilita incrementos en la producción, aún más cuando se puede poner en peligro este propósito con un uso inadecuado [3].

Una de las tecnologías de mayor auge dentro de la agricultura de precisión en la adquisición de datos son las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*) por su capacidad de despliegue en condiciones inaccesibles. En los últimos años, se han desarrollado numerosas aplicaciones de esta tecnología como herramienta facilitadora [6]. En países como China [7], España [8] y la India [9] se han utilizado las redes de sensores inalámbricos en los sistemas de irrigación. Otras investigaciones utilizan dichos sistemas para la supervisión de los parámetros ambientales [10]–[12], esto se debe al bajo precio de su implementación y mínimo consumo de energía, así como a las prestaciones alcanzadas con su uso [13]. Además, se han referido propuestas para agricultura

de precisión en casas de cultivo; de arquitecturas para la red de sensores inalámbricos, *hardware* libre y módulos de radiofrecuencia para la comunicación con protocolo *Zigbee* [14]–[17].

En la agricultura cubana, se han desarrollado programas de inversiones para la fabricación y adquisición de equipamientos modernos que integran las nuevas tecnologías de automatización, control y comunicaciones, con el objetivo de desarrollar una agricultura sostenible y productiva [18]. Especialmente en las casas de cultivo protegido, el control de parámetros ambientales generalmente se realiza a través de la experiencia de sus trabajadores y por estimaciones empíricas. Contar con un sistema de supervisión automatizada que garantice un máximo de seguridad, ahorro de recursos y la toma de decisiones para optimizar el riego en el interior de las casas permitiría incrementar las producciones. Atendiendo a lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar la arquitectura de *hardware* y *software* de una red de sensores inalámbricos, la cual permita la adquisición de variables ambientales en casas de cultivo para la toma de decisiones con respecto al riego.

2. Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en la unidad empresarial de base (UEB) Cultivos protegidos y semiprotegidos de la Empresa de Cultivos Varios Valle del Yabú, principal polo productivo de la provincia de Villa Clara, Cuba. La UEB cuenta con un sistema de casas de cultivo destinadas a la producción de ají pimiento (*Capsicum annuum* L.), tomate (*Solanum lycopersicum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.), entre otros cultivos con sistema de riego por goteo y fertirriego automatizado.

Para el proceso de recolección de datos se diseñó la arquitectura de *hardware* y *software* de una red de sensores inalámbricos que se desplegó en condiciones de producción en instalaciones (casas de cultivo) modelo Granma 1 de la empresa cubano-española EMBA-MSA A-12, diseñado por la empresa CARISOMBRA, de 540 m² (12 m de ancho y 45 m de largo), con una altura a la cumbre de 4,4 m, cerramiento superior con rafia plastificada (Ginegar, 140 μ m, 80 % luz difusa), ventana cenital abierta y malla sombreadora (35 %) por los laterales y el frente.

Teniendo en cuenta las prácticas agrícolas que se desarrollan en la UEB se definieron como las variables para la toma de decisiones en la programación del riego: la humedad relativa (%), humedad del suelo (%), temperatura del ambiente (°C) e intensidad luminosa (lux).

2.1. Arquitectura de *hardware* propuesta

Se utilizaron seis nodos de medición para un módulo (tres casas de cultivo), los cuales se comunicaron de forma inalámbrica con el nodo coordinador y el *gateway*. Estos últimos, fueron ubicados a cinco metros del módulo, en la caseta de fertirriego. Se colocaron dos nodos de medición por cada casa de cultivo distanciados equitativamente diez metros uno de otro. El experimento se realizó durante dos horas. Los nodos de medición, en los primeros minutos de funcionamiento de la red, se situaron dentro de la caseta de fertirriego para visualizar la respuesta de los sensores ante diferentes condiciones climáticas.

La propuesta de sistema de adquisición de datos incluyó sensores de acuerdo con sus especificaciones técnicas [19], [20], la cuales se muestran en la Tabla I. Dichos sensores tienen bibliotecas en la comunidad de *software* libre que facilitan su uso, e interfaz de fácil conexión y comunicación.

Tabla I. Principales especificaciones técnicas de los sensores propuestos en la arquitectura de hardware para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.

Especificaciones técnicas	Sensor de temperatura y humedad relativa DHT22	Módulos de sensor de humedad del suelo YL-69 y YL-38	Módulo de sensor fotosensible digital y analógico LM393
Voltaje de entrada	3,3 a 6 VDC	3,3 a 5 VDC	3,3 a 5 VDC
Voltaje de salida	señal digital por un bus simple	0 a 4,2 V	Salida digital: 0 o 5V con nivel de disparo ajustable Salida analógica: 0 a 5V en dependencia de la intensidad luminosa que incide sobre la fotorresistencia
Rango de operación	0 a 100% para la humedad relativa-40 a 80 °C para la temperatura	-	-

Las placas microcontroladoras que se seleccionaron fueron de compañías como Raspberry Pi y Zolertia. Para controlar los nodos de medición y al coordinador se eligió el Zolertia RE-mote, ya que permite incorporar sensores analógicos y digitales. Además, posee soporte para el sistema operativo Contiki, diseñado especialmente para aplicaciones de WSN e IoT (*Internet of things*). Soporta el protocolo IPv6, 6LoWPAN (*IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Network*) y el protocolo de ruteo para redes de bajo consumo (RPL, *Remote Initial Program Load*) que lo hacen idóneo para aplicaciones de IoT a través de redes de bajo consumo. Este microcontrolador maneja la energía de forma eficiente, lo que resulta crucial para aplicaciones de WSN. Como *gateway* de la red se utilizó el Raspberry Pi 3 Modelo B por contar con un soporte para tarjetas microSD para almacenar la información generada. También, presenta un puerto Ethernet, conectividad inalámbrica 802.11 b/g/n y *Bluetooth*, que propicia varias opciones de conectividad a otras interfaces e integra un procesador con la velocidad 1.2 GHz para dicha función.

2.2. Arquitectura de software propuesta

En cuanto a la arquitectura de *software*, se seleccionó el sistema operativo Contiki ya que puede trabajar en tiempo real, posee un manejo eficiente de memoria, ahorro de energía y capacidad para el procesamiento multitarea.

La pila de protocolos utilizada implementa UDP (*User Datagram Protocol*) en la capa de transporte, en la capa de red el uso del protocolo 6LoWPAN como subcapa de adaptación para IPv6 y RPL. Dicha pila de protocolos está basada en la arquitectura 6TiSCH [21], a su vez esta definió la capa MAC (*media access control*) con TSCH [21] y la capa física (*PHY, Physical Layer*) con IEEE 802.15.4 PHY.

El proceso de almacenamiento de los datos inició posterior a que las mediciones precedentes de cada uno de los nodos llegan al coordinador, este los transmite al *gateway* IoT a través de conexión USB. Luego, se almacenan en una base de datos implementada en la Raspberry a través del sistema de gestión MariaDB² como se expone en la Figura 1, según un número de identificador (ID) que posee cada nodo. Dicho número es obtenido en la Raspberry luego de la descomposición de la

trama, y sirve para que el programa conozca de qué nodo llegó la información. De esta forma, es posible elegir la tabla correspondiente en la base de datos para que sean almacenados los parámetros ambientales.

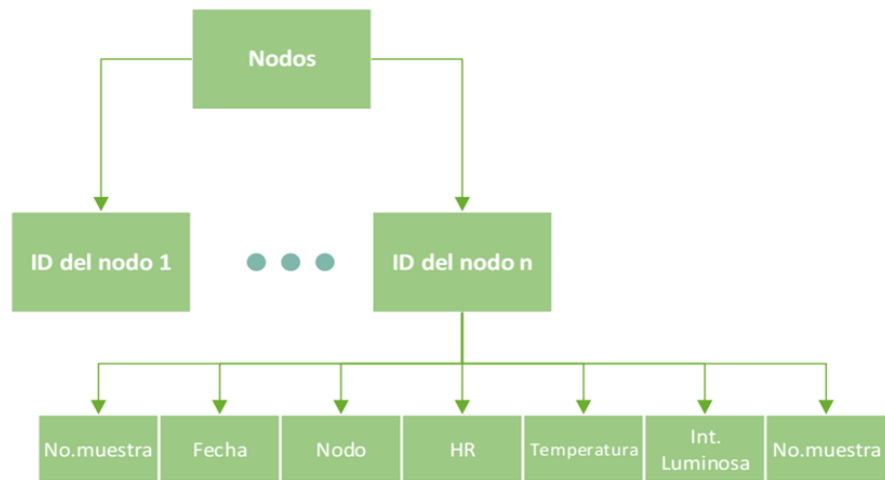


Figura 1. Distribución de las tablas en la base de datos de la arquitectura de *software* para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.

2.3. Análisis energético

Para el análisis energético de la propuesta, se calculó el tiempo de vida útil de dos baterías AA con 3000 mAh de capacidad cada una. Los valores de corriente utilizados en el análisis son valores nominales proporcionados por las hojas de datos de los fabricantes [19], [20]. El ciclo de vida útil de radio (RDC, *Radio Duty Cycle*) queda determinado por el protocolo TSCH (*Time Slotted Channel Hopping*). El RDC es la relación porcentual entre el tiempo total que el radio permanece encendido y el tiempo total de funcionamiento de cada nodo, y para este diseño tiende al 2%. Se considera despreciable para este cálculo el consumo generado por el tiempo que el radio permanece en sleep, ya que es del orden de los nanoamperes. La capacidad en conjunto de las dos baterías AA en serie según es $C_{bateria} = 6000$ mAh [22].

La expresión del tiempo de vida neta de las baterías para un RDC de un 100%:

$$I = \frac{C_{bateria}}{I_n} \quad (1)$$

Siendo:

$C_{bateria}$: capacidad energética de las baterías.

I_n : consumo de corriente del nodo.

3. Resultados

La arquitectura general de la red de sensores inalámbricos quedó definida en dos bloques fundamentales: nodos de medición, distribuidos dentro de las casas de cultivos; y un nodo coordinador conectado al *gateway*, ubicados en la caseta de fertirriego (Figura 2).

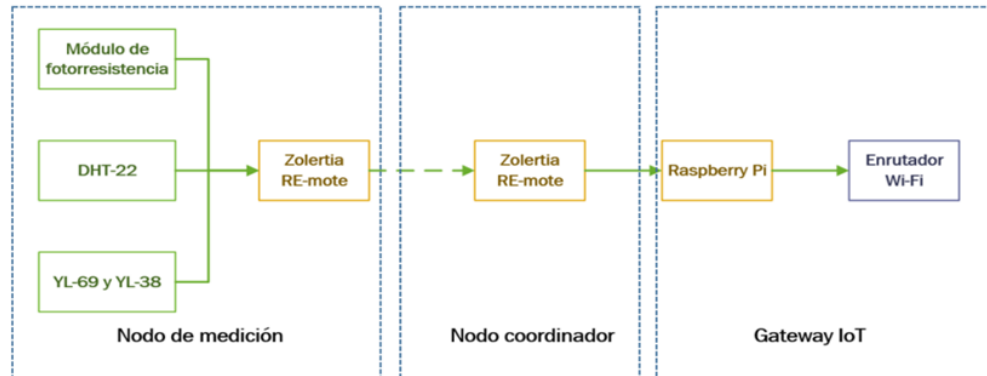


Figura 2. Arquitectura de hardware propuesto para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.

3.1. Resultados de la arquitectura de *hardware*

La arquitectura de *hardware* presentó la interconexión entre los componentes que integran el diseño. En los nodos de medición (Figura 3), los tres sensores se conectaron directamente al Zolertia RE-mote y se alimentan de este mismo dispositivo. El módulo de sensor fotosensible LM393 se acopló a un pin analógico, y envía un voltaje equivalente a la intensidad luminosa dentro de la casa de cultivo. El sensor DHT22 fue conectado a una entrada digital del RE-mote para enviar los valores de temperatura y humedad relativa. Por último, los módulos YL-69 y YL-38 se enlazaron a otra entrada analógica del Zolertia que brindó la información correspondiente a la humedad del suelo, luego de ser introducido el YL-69 bajo tierra en los canteros. En todos los nodos de medición, los Zolertia RE-mote son alimentados con dos baterías AA de 1,5 V.

El nodo coordinador de la red estuvo compuesto por un Zolertia RE-mote. Al coordinador llegó la información transmitida de un nodo a otro, en él se hacen configuraciones para el correcto funcionamiento de la red. El bloque *gateway* de la red estuvo compuesto por una Raspberry Pi 3 Model B conectada vía Ethernet a un enrutador Wi-Fi (Figura 4), que puede brindar servicios de conectividad a usuarios que mediante aplicaciones accedan a los datos. Implementada en esta computadora, se encuentra una base de datos que almacenó de forma ordenada los valores de las variables ambientales que envió hacia ella el nodo coordinador a través de una interfaz USB.

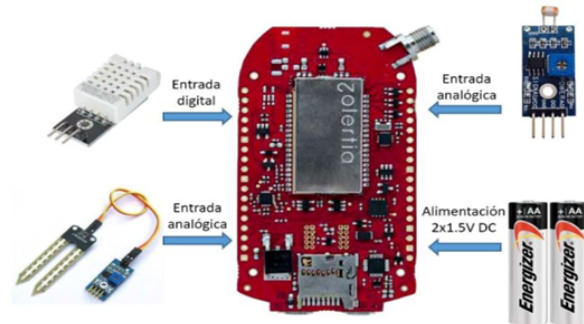


Figura 3. Arquitectura de los nodos de medición para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.



Figura 4. Arquitectura del nodo coordinador y el gateway para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.

La instalación de un nodo de medición se muestra en la Figura 5, funcionando dentro de las casas de cultivo en el momento del comienzo de la adquisición de datos. Se puede observar la carcasa protectora que contiene parte del *hardware* del diseño de cada uno de los nodos.



Figura 5. Arquitectura del nodo coordinador y el gateway para el despliegue de una red de sensores inalámbricos en casa de cultivo.

3.2. Resultados de la arquitectura de *software*

Los valores obtenidos del nodo 2 demostraron que la red se comunicó de forma correcta con el coordinador y la Raspberry, ejemplo de la prueba realizada se observan en la Figura 6 y la Figura 7. El cambio que experimentaron todas las gráficas a partir de las 12:32 am (hora de traslado de los nodos de la caseta a las casas de cultivo), evidenció la rápida respuesta de la arquitectura de *hardware* ante cambios bruscos. La arquitectura de *software* propuesta es funcional, ya que fueron almacenados en la base de datos del *gateway* los valores de las mediciones.

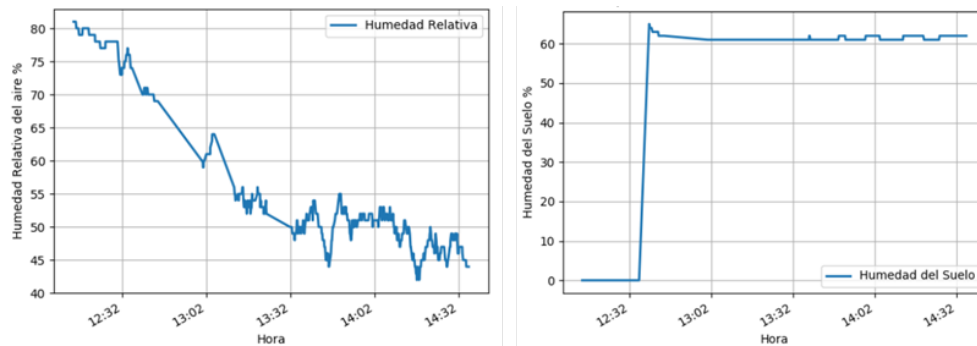


Figura 6. Valores de la humedad relativa y humedad del suelo del nodo 2 para la validación del despliegue de la red de sensores inalámbricos en una de las casas de cultivos.

El sensor de humedad del suelo exhibió valores congruentes de parámetros del ambiente, ya que permanece indicando 0 % de humedad del suelo en la caseta hasta que se coloca bajo tierra.

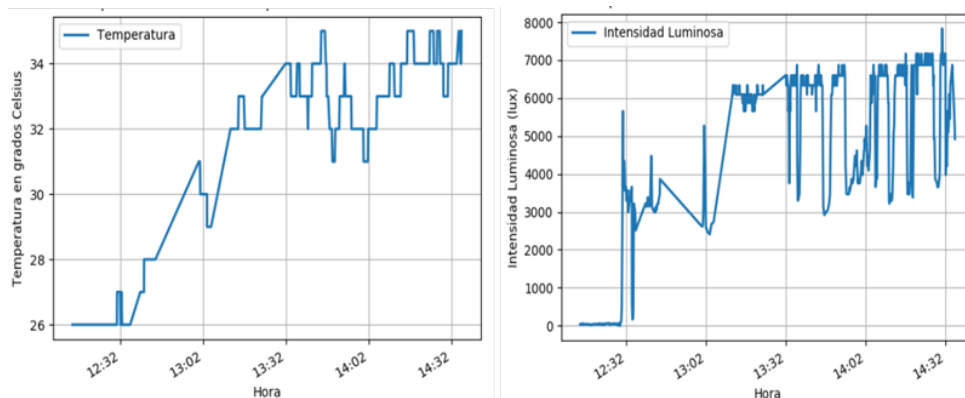


Figura 7. Valores de la temperatura del aire e intensidad luminosa del nodo 2 para la validación del despliegue de la red de sensores inalámbricos en una de las casas de cultivos.

Los valores de temperatura comienzan a aumentar de 26 °C en adelante al entrar en contacto con la luz solar hasta llegar a 36 °C. Este mismo comportamiento lo presentó la intensidad luminosa.

3.3. Análisis energético del diseño

En el diseño de WSN es de vital importancia maximizar la durabilidad de la fuente de alimentación de los dispositivos, con el objetivo de reducir las sustituciones y, por tanto, de ahorrar recursos. Para el análisis energético de la propuesta se muestra en la Tabla II, el consumo total de cada nodo de medición en el momento que el radio estuvo encendido.

Tabla II. Consumo de los componentes que integran un nodo de medición con la radio encendida para el análisis energético.

Elemento de consumo	Corriente de consumo
Módulo de intensidad luminosa	0,1 mA
Sensor DHT-22	1,5 mA
Módulo de humedad del suelo	0,05 mA
Radio	24 mA
Consumo total	25,65 mA

Para obtener el tiempo de vida real de las baterías se debe multiplicar la ecuación (1) por el $RDC = 2\%$.

$$t_{bateria} = \frac{6000mAh * 100}{25,65mA * 2} \approx 487 \text{ dias} \quad (2)$$

Se puede concluir que la arquitectura de *software* que estableció este valor de RDC es muy eficiente energéticamente, proporcionando a cada nodo, con dos baterías AA de 3000 mAh de capacidad, un tiempo de funcionamiento de 487 días aproximadamente, sin reemplazo de baterías.

4. Conclusiones

La arquitectura de *hardware* propuesta aseguró la recolección y transmisión de las variables medidas, ello permitió conocer el estado actual de las variables efectivas de la producción.

La arquitectura de *software* implementada sobre el sistema operativo Contiki permitió cumplir con los requisitos operacionales propuestos. El despliegue demostró la comunicación con el coordinador y el *gateway* IoT asegurando el almacenamiento de los valores medidos de cada uno de los nodos.

El análisis energético de los nodos demostró que con un ciclo útil del radio del 2%, se garantiza una alta durabilidad de las baterías de los nodos de medición, extendiendo la vida útil de estos.

Con el sistema de adquisición de datos implementado sería posible el modelado del riego para lograr una correcta toma de decisiones que asegure una producción con menos gastos de recursos y mayor eficiencia.

Los trabajos futuros se deberán dirigir hacia la evaluación del desempeño de la red después de varios ciclos de cosecha y el modelado del sistema de irrigación.

Referencias

- [1] L. Romero, F.M. Piña y M.M Goire. “Red de sensores inalámbricos para las casas de cultivos protegidos San José”, *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, no. 1, pp. 16-26, 2018. ↑225
- [2] I. Mohanraj, K. Ashokumar and J. Naren, “Field monitoring and automation using IOT in agriculture domain”, *Procedia Computer Science*, vol. 93, pp. 931-939, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.275> ↑225
- [3] A. Anaya-Isaza, D.H. Peluffo-Ordoñez, J. Ivan-Rios, J.A. Castro-Silva, D.A.C. Ruiz y L.H.E. Llanos, “Sistema de Riego Basado En La Internet De Las Cosas (IoT)”, 2016. ↑225
- [4] J. Arriaga, “Modelado, simulación y control del uso del agua en la agricultura, PhD thesis, Universidad de Sevilla: *Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla*, 2015. ↑225
- [5] E.G. Leijja-Loredo, H. Reyes-Hernández, O. Reyes-Pérez, J.L. Flores-Flores y F.S. Sahagún-Sánchez, “Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México”, *Madera y bosques*, vol. 22, no. 1, pp. 125-140, 2016. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221481> ↑225
- [6] A.Z. Abbasi, N. Islam, Z.A. Shaikh, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture”, *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263-270, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004> ↑225
- [7] X. Zhang, Q. Wen, D. Tian and J. Hu, “PVIDSS: Developing a WSN-based Irrigation Decision Support System (IDSS) for Viticulture in Protected Area”, *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 669, 2015. ↑225
- [8] H. Navarro-Hellín, R. Torres-Sánchez, F. Soto-Valles, C. Albaladejo-Pérez, J.A López-Riquelme and R. Domingo-Miguel, “A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management”, *Agricultural Water Management*, vol. 151, pp. 64-74, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.022> ↑225
- [9] K. Taneja and S. Bhatia, “Automatic irrigation system using Arduino UNO”. In *Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 2017 International Conference on*, june 2017. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2017.8250693> ↑225
- [10] A.K. Meeradevi and M.R. Mundada, “ZigBee Based Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture-The Survey”, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IIAEM)*, vol. 4, no. 5, 2015. ↑225
- [11] G. Deepika and P. Rajapirian. “Wireless sensor network in precision agriculture: A survey”. In *Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), International Conference on*, february 2016. <https://doi.org/10.1109/ICETETS.2016.7603070> ↑225
- [12] M.S. Pujari and M.N. Bogiri, “A Survey on Wireless Sensor Network For Agriculture”, *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, vol. 5, no. 7, pp. 269-272, 2017. ↑225
- [13] J. Carranza, “Soluciones de automatización para sistemas de regadío en caña de azúcar”, Tesis, *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara*, 2016. ↑225
- [14] D.D. Chaudhary, S.P. Nayse and L.M. Waghmare. “Application of wireless sensor networks for greenhouse parameter control in precision agriculture”, *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, vol. 3, no. 1, pp. 140-149, 2011. <https://doi.org/10.5121/ijwmn.2011.3113> ↑226
- [15] S. Angal, “Raspberry pi and Arduino Based Automated Irrigation System”, *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 5, no. 7, 2016. <https://doi.org/10.21275/v5i6.NOV164836> ↑226
- [16] J. Baviskar, A. Mulla, A. Baviskar, S. Ashtekar and A. Chintawar. “Real time monitoring and control system for green house based on 802.15. 4 wireless sensor network”. In *Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2014 Fourth International Conference on*, pp. 98-103, april 2014. <https://doi.org/10.1109/CSNT.2014.28> ↑226
- [17] Z.A.S. Rhman, “Wirelessly Controlled Irrigation System”, *Iraqi Journal for Electrical And Electronic Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 89-99, 2014. <https://doi.org/10.33762/eej.2014.95596> ↑226
- [18] E.R.J. Espinosa, “Parámetros de explotación y uniformidad de riego en la máquina de pivote central OTECH-IRRIMEC”, *Revista Ingeniería Agrícola*, vol.1, no. 1, pp. 7-12, 2017. ↑226
- [19] Aosong Electronics, “Temperature and humidity module DHT11 Product Manual”, Guangzhou, 2016. ↑226, 228
- [20] Sunrom Co, Disponible en: www.sunrom.com/p/light-sensing-module-ldr. ↑226, 228
- [21] P. Thubert and T. Watteyne, “An Architecture for IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15. 4”. *Working Draft*,

- IETF Secretariat, Internet- Draft draft-ietf-6tisch-architecture-08*, 2015. ↑227
- [22] C. M. García Algora, V. A. Reguera, N. Deligiannis and K. Steenhaut. "Review and Classification of Multichannel MAC Protocols for Low-Power and Lossy Networks". *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19536-19561, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2748178> ↑228

Alexandra Madrugá Peláez

Ingeniera en Automática de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas [UCLV] (Cuba, 2016), reserva científica del Instituto de Biotecnología de las Plantas y miembro del proyecto de investigación "Ampliación de la automatización de las casas de cultivo de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú".
Correo electrónico: alexandra@ibp.co.cu

Abel Alejandro Estevez Pérez

Ingeniero en Automática de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas [UCLV] (Cuba, 2018) y miembro del proyecto de investigación "Ampliación de la automatización de las casas de cultivo de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú".
Correo electrónico: aeperez@uclv.cu

Richar Sosa López

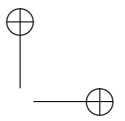
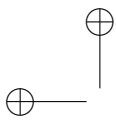
Máster en Automática (2017). Profesor asistente del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Cuenta con siete años de experiencia laboral como docente en la UCLV. Es miembro del Grupo de Investigación de Internet de las cosas e Inteligencia Artificial para la Automatización (GIoTAAI) y del proyecto de investigación "Ampliación de la automatización de las casas de cultivo de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú".
Correo electrónico: rslopez@uclv.edu.cu

Carlos M. García Algora

Ing. Telecomunicaciones y Electrónica (UCLV, 2011), Máster en Telemática (UCLV, 2014) y Doctor en Ciencias (Vrije Universiteit Brussel, VUB; UCLV, 2018). Profesor del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Es miembro del Grupo de Investigación de Internet de las cosas e Inteligencia Artificial para la Automatización (GIoTAAI) y del proyecto de investigación "Ampliación de la automatización de las casas de cultivo de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú".
Correo electrónico: cgalgora@uclv.edu.cu

Iván Santana Ching

Doctor en Ciencias (2012) y Máster en Automática (2004). Profesor titular del Departamento de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UCLV. Cuenta con diecinueve años de experiencia laboral como docente en la UCLV. Dirige el Grupo de Investigación de Internet de las cosas e Inteligencia Artificial para la Automatización (GIoTAAI) y del proyecto de investigación "Ampliación de la automatización de las casas de cultivo de la Empresa Agropecuaria Valle del Yabú".
Correo electrónico: ching@uclv.edu.cu



Review

Demand Side Management on the Chile Industry: Learning From the German Case

*Gestión de la Demanda en la Industria de Chile: Aprendiendo del
Caso Alemán*

Y. Masip*¹, A. Poque¹, M. Valín¹, L. Ramírez², J. Valdés¹

¹Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Valparaíso-Chile), ²Technische Hochschule Deggendorf (Freyung-Alemania).

*Correspondence e-mail: yunesky.masip@pucv.cl

Received: 29/06/2019. Modified: 18/09/2019. Accepted: 09/10/2019

Abstract

Context: Both pioneer countries and those that have recently begun an energy transition towards renewable energy require high levels of flexibility in their electrical systems. This article reviews the Demand Side Management (DSM) application as a tool to provide flexibility, and then, to achieve renewable energy penetration objectives.

Method: A systematic mini-review of the literature has been done to review the origin and evolution of the concept of DSM in German and Chilean industry, at the same time, to make a parallel and comparison between them.

Results: Both countries have difficulties in taking advantage of the demand management potential in the industry, the lack of promoting policies and the lack of specific regulatory frameworks are some of the causes.

Conclusions: It is necessary to speed up attention to the management of demand, it is important that the academy contributes with estimates of potential, it also needs public policies that encourage the use of this tool.

Keywords: Demand side management, renewable sources of energy, flexibility of the electrical system, international cooperation, energy policy.

Acknowledgments: The authors wish to thank the National Commission for Scientific and Technological Research of Chile (CONICYT) and the German Ministry of Education and Research (BMBF) for their support, which, in the framework of project BMBF150075: "Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized CHP energy dispatch scheduling and demand side management", have made possible the development of this article. In addition, to the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, for all the support provided through the Energy Program in Chile.

Language: Spanish.

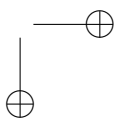
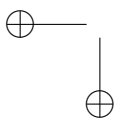
Open access



Cite this work as: Y Masip, A. Poque, M. Valín, L. Ramírez and J. Valdés., "Demand Side Management on the Chile Industry: learning from the German case", Ingeniería, vol. 24, no.3, pp. 235-251, Sep-Dec. 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.14709>



Resumen

Contexto: Tanto países pioneros como aquellos que recientemente han comenzado una transición energética hacia las energías renovables requieren altos niveles de flexibilidad en sus sistemas eléctricos. Este artículo revisa la aplicación de la gestión de la demanda (DSM, por sus siglas en inglés) como herramienta para proveer flexibilidad y lograr objetivos de penetración de fuentes renovables de energía.

Método: Se ha hecho una revisión sistemática de la literatura para revisar el origen y evolución del concepto de DSM en la industria alemana y chilena, realizando al mismo tiempo un paralelo y comparación entre ambas experiencias.

Resultados: Ambos países registran dificultades a la hora de aprovechar el potencial de gestión de la demanda en la industria, la falta de políticas promotoras y la carencia de marcos regulatorios específicos son algunas de las causas.

Conclusiones: Se requiere agilizar la atención a la gestión de la demanda; además, es importante que la academia contribuya con estimaciones de potencial en tanto se precisan políticas públicas que fomenten el aprovechamiento de esta herramienta.

Palabras clave: Cooperación internacional, flexibilidad del sistema eléctrico, fuentes renovables de energía, gestión de la demanda, política energética.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer el apoyo de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) y al Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF), los cuales, en el marco del proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized CHP energy dispatch scheduling and demand side management”, han hecho posible el desarrollo de este artículo. Asimismo, a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, por todo el apoyo brindado a través del Programa de Energía en Chile.

Idioma: Español

1. Introducción

En los últimos años, Chile ha experimentado una notable transformación en su matriz energética dada la potente incorporación de fuentes renovables de energía. De acuerdo con el informe “Tendencias globales en la inversión en energías renovables 2019”, publicado antes de la Cumbre sobre la Acción Climática de la ONU, Chile se coloca en el puesto diecinueve en inversiones en capacidad de energías renovables durante esta década, ello con un balance de US 14 000 millones entre 2010 y la primera mitad de 2019, lo cual lo deja, además, en el tercer lugar a nivel de Sudamérica en este sentido. Asimismo, la intermitencia de la energía solar y eólica plantea nuevos retos relacionados con la estabilidad y la confiabilidad del sistema [1], ya que la estocasticidad del recurso viento y sol dificultan a los operadores del sistema la tarea de mantener el equilibrio entre oferta y demanda de energía [2].

Una forma de proveer la estabilidad y flexibilidad es a través de gestión de la demanda (DSM, por sus siglas en inglés) [3]. DSM se refiere en general a tecnologías, acciones y programas que buscan administrar o disminuir el consumo de energía desde el lado de la demanda a fin de reducir los desembolsos totales del sistema o contribuir al logro de objetivos de política tales como la reducción de emisiones o equilibrar la oferta y demanda [4]. El concepto de DSM se basa en un nuevo

modo de realizar la gestión de la demanda, permitiendo al cliente ser responsable de esta. La idea de utilizar DSM en la industria para ofrecer flexibilidad a sistemas eléctricos con alta penetración de energías renovables no convencionales (ERNC) no es nueva, incluso Alemania, país pionero de la transición energética, tiene trabajo por hacer para aprovechar sus potenciales de DSM [5].

Este artículo muestra los principales avances relativos a DSM en materia de política energética para el caso chileno, al tiempo que desarrolla un análisis comparativo con la experiencia alemana. El objetivo es proponer recomendaciones para enfrentar los próximos desafíos del sector, específicamente aquellos relacionados con DSM en la industria, teniendo en cuenta los aciertos y desaciertos del caso alemán. El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: en sección 2 se describe la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo, en 3.1 se hace una revisión del desarrollo histórico y conceptos básicos de DSM, mientras que en las secciones 3.2 y 3.3 se presentan los avances respecto de DSM en Alemania y Chile. En la sección 4 se discuten los retos para la integración de DSM en la industria y en sección 5 se aúnan conclusiones.

2. Metodología

Con el objeto de revisar el origen y evolución del concepto de DSM en la industria alemana y chilena, realizando al mismo tiempo un paralelo entre ellas, se ha hecho una revisión sistemática de la literatura para desarrollar discusión al respecto. El desarrollo metodológico consiste en una búsqueda de documentos relativos a DSM en Alemania y Chile, seleccionando aquellos que refieren a la aplicación industrial, y luego, otorgando mayor valoración a los artículos y literatura de política energética. Posteriormente, la información extraída para la elaboración de esta revisión se usará en procura de capturar los principales hitos que han permitido el avance de DSM en ambos países. Finalmente, se desarrolla una breve discusión en torno a los retos para la explotación del potencial de DSM y, asimismo, se propone recomendaciones para el caso chileno, teniendo en cuenta el avance de Alemania, éxitos y desaciertos de su experiencia. En la Figura 1, se muestra una categorización de las temáticas abordadas en la revisión bibliográfica.

3. Desarrollo

3.1. Desarrollo histórico y conceptos básicos acerca de gestión de la demanda

Las primeras nociones de DSM datan de 1960 en Nueva Zelanda y Europa, donde se gestionaba la carga en empresas; sin embargo, el término DSM fue acuñado por primera vez por Clark Gellings [6] e introducido formalmente en política energética en 1978 por la National Energy Conservation Policy Act y la Public Utility Regulatory Policy Act de los Estados Unidos. Luego, durante la década de 1980 y 1990 los programas de DSM crecieron, llegando a ahorrar 260 000 GWh entre 1989 y 1995 en Estados Unidos; no obstante, desde 1995 declinaron y solo volvieron a reactivarse entre 2000 y 2010 a partir del interés por enfrentar el cambio climático y garantizar la seguridad energética [7]. En Europa, los programas de DSM recién comenzaron a cobrar interés en 1990, principalmente motivados por el cambio climático [7]; en China, el concepto de DSM ya se discute también desde esa década [8].

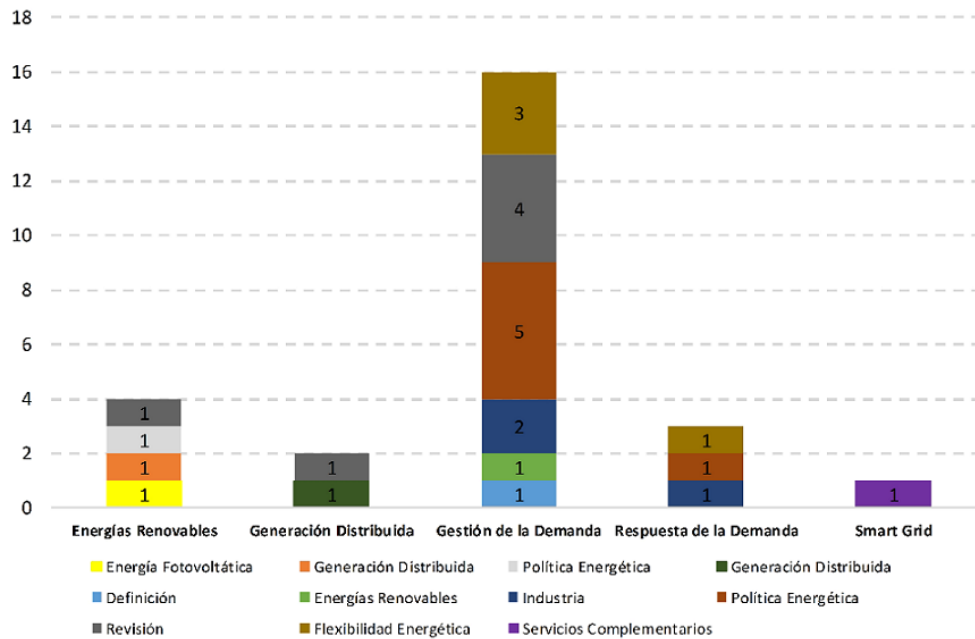


Figura 1. Revisión de la literatura.

DSM es un concepto amplio estudiado por múltiples autores [7], [9]–[13]. En la Figura 2, se puede observar un esquema de dicha complejidad en su concepto fundamental y más amplio, tal como lo propone [7]. La complejidad inicia con la categorización de las diferentes opciones de DSM que, por lo menos, incluye la eficiencia energética, el respaldo de generación *in situ* y la respuesta de la demanda; estas categorías se subdividen nuevamente en subcategorías que abarcan un amplio campo de acción, el cual no puede ser afrontado de manera unidireccional, sino que depende de múltiples actores. El desarrollo histórico ha mostrado que son variadas las políticas que permiten aplicar las distintas categorías de DSM, estas incluyen desde medidas regulatorias que obligan a las empresas distribuidoras a cumplir con ciertos niveles de conservación energética, hasta campañas informativas para usuarios acerca de generación en sitio y eficiencia energética.

Las medidas que pueden contribuir a que la industria productiva haga DSM se encuentran distribuidas en cuatro tipos de políticas, estas incluyen: la implementación de estándares de manejo de energía (como ISO 50001), la difusión de buenas prácticas, el financiamiento directo para programas en investigación y desarrollo, la simplificación de las condiciones para la participación de las industrias en los mercados energéticos y la implementación de esquemas tarifarios como la definición de precios de la electricidad en tiempo real [14].

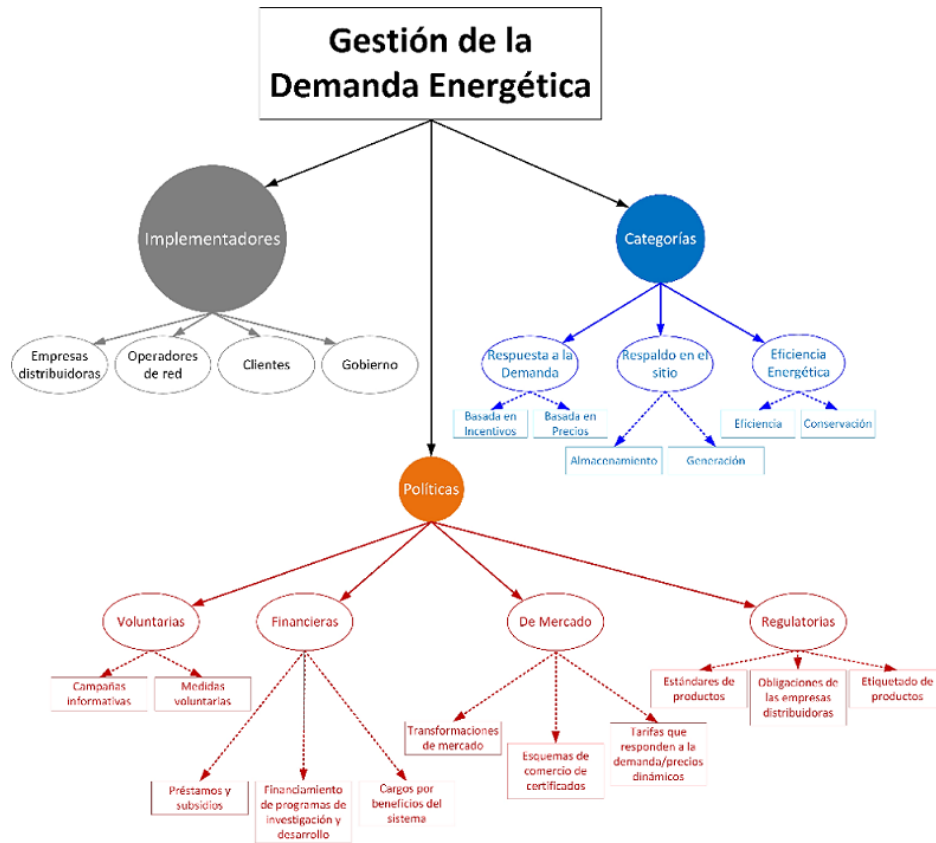


Figura 2. Gestión de la demanda energética y sus componentes bajo los principios de la gestión desde el lado de la demanda.

Fuente: elaboración propia basada en [9].

3.2. Gestión de la demanda en Alemania

Alemania es reconocida por ser una de las primeras naciones que adoptó una política de energía limpia con alto porcentaje de ERNC en la matriz energética [15]. Este país ha seguido un largo camino donde las tecnologías, las regulaciones y las prioridades han cambiado considerablemente desde 1991, cuando apareció la primera ley que permitía el suministro descentralizado de ERNC, hasta hoy, donde más del 30 % de la demanda de electricidad es suministrada por fuentes renovables [16]. El principal instrumento para promover la adopción de ERNC, la ley de fuentes renovables de energía (*Erneuerbaren Energien Gesetz* o EEG, por sus siglas en alemán), apareció en 2000 y hasta ahora ha recibido cuatro enmiendas [17]. EEG comenzó siendo altamente subsidiaria y protectora para los adoptantes de las ERNC, mientras que en su última versión los generadores de ERNC se han dejado libres para encontrar su propio lugar en el mercado. Al principio, era

importante brindar garantías para la adopción de nuevas tecnologías no convencionales; actualmente, los esfuerzos se concentran en hacer que el mercado se ajuste a las altas penetraciones de ERNC.

A medida que aumenta la proporción de fuentes de energía renovables intermitentes será necesario aumentar el volumen de las reservas de regulación de frecuencia. Se pueden encontrar nuevas fuentes de reservas en los recursos energéticos distribuidos: cargas controlables, vehículos eléctricos (EV), unidades de generación distribuida, etc. Sin embargo, es necesario adaptar el diseño del mercado de reserva de regulación de frecuencia para permitir que estos recursos participen a través de nuevos actores del mercado conocidos como “agregadores”. De esta manera, se deben analizar los mercados o mecanismos de regulación de frecuencia para: identificar barreras de entrada para los agregadores e identificar algunas opciones con el fin superar estas barreras. En este sentido, Borne realiza un estudio de caso de la situación de los cuatro principales mercados europeos de regulación de frecuencia para mostrar cómo este marco podría ser utilizado por los agregadores o los responsables políticos [18].

Actualmente, según ENSO-E (Red Europea de Operadores de Sistemas de Transmisión), la potencia renovable ya supone más de la mitad del parque productor alemán con el 56 % de la potencia total instalada. La tecnología más extendida es la eólica con 59 GW que representa el 27 % de la potencia total del país; también es la tecnología con mayor crecimiento de los últimos años pasando del 20 % en 2015 a un 27 % en la actualidad. La potencia solar fotovoltaica instalada actualmente asciende a 43 GW, el 20 % de la potencia nacional. Si bien la potencia fotovoltaica ha aumentado un 16 % en los últimos cinco años, su cuota en el parque de producción global se ha quedado estancada justo por debajo del 20 % [19].

Lund y Müller diferencian entre cuatro tipos de flexibilidad en el sistema eléctrico que garantizan la seguridad del suministro: expansión de la red, almacenamiento de energía, flexibilidad en el lado de la oferta y flexibilidad en el lado de la demanda. La flexibilidad en el lado de la demanda se refiere a la posibilidad de desviarse del perfil de carga planificado. Tales desviaciones están económicamente motivadas por las señales de precios, si un tercero envía una señal a un consumidor flexible, esto se llama respuesta a la demanda (DR). Debido a los altos costos para los sistemas de almacenamiento y la expansión de la red, la flexibilidad en el lado de la demanda jugará un papel importante, ya que ofrece flexibilidad a costos marginales relativamente bajos [19], [20].

Alemania ha avanzado bastante en la implantación de medidas para incrementar la eficiencia energética, sobre todo en lo relativo al respaldo de generación en el sitio. Los resultados se visualizan en el auge de las ERNC y el próspero desarrollo en la instalación de sistemas de almacenamiento que no solo se ve fundamentado en las nuevas reglas de juego para generadores distribuidos, sino a incentivos financieros directos para promocionar el autoconsumo que están en vigencia desde 2013 (“KfW *programm 275*”, banco alemán gubernamental de desarrollo) [21], [22].

La categoría de DSM “respuesta de la demanda” es en la que menos se ha progresado en Alemania [5]. Se señala que hacen falta acciones del Gobierno y que hay una desconexión con la estrategia nacional de adopción de ERNC. Sin embargo, los avances de la Agencia Nacional de Energía Alemana (DENA, por sus siglas en alemán) muestra que se ha trabajado para que DSM y ERNC puedan competir con los suministradores tradicionales de servicios complementarios (SSCC) o *An-*

cillary Services (AS), mas no con los resultados esperados. Alemania es el único país europeo que ha abierto todos los mercados a DSM, pero la normativa dificulta la participación incluso para las industrias intensivas en energía [23].

El sector de servicios es uno de los grupos objetivo para utilizar la demanda flexible, el cual puede tener un alto impacto en tanto se pueden encontrar supermercados, hoteles y edificios de oficinas en regiones de toda Alemania. Lo anterior podría ser una ventaja con respecto a la compensación de la inestabilidad de la red en cualquier región en comparación con las empresas industriales más enfocadas localmente. Las primeras estimaciones señalan potenciales considerables de DR no utilizados para el sector de servicios; sin embargo, actualmente, hay menos conocimiento sobre las opciones de flexibilidad en el sector de servicios que en la industria, además, las barreras del mercado como la falta de un marco regulatorio adecuado que ofrezca incentivos atractivos evitan que se aprovechen los potenciales [24]. Un estudio realizado en 1000 empresas del sector de servicios en Alemania refleja condiciones marco normativas aún no aptas o faltantes, la baja rentabilidad y la falta de conocimiento sobre los potenciales de flexibilidad y los mecanismos de comercialización parecen ser las principales barreras; no obstante, las condiciones marco que promueven las medidas de respuesta a la demanda están mejorando, por ejemplo, las normas técnicas y las últimas revisiones regulatorias. Lo anterior indica que para aprovechar los potenciales de respuesta a la demanda existentes en el sector de servicios se debe apreciar el valor de la flexibilidad en la demanda, por ejemplo, facilitando la participación en el mercado o creando ofertas resp premiando la flexibilidad de demanda de las empresas [24].

Los sistemas de energía distribuida (DES) a escala local constituyen un nicho prometedor para aprovechar la provisión de energía renovable. Estos DES (microgeneración, centros multienergéticos) integran fuentes renovables, producción combinada de calor y energía, varios métodos de conversión y almacenamiento de energía y gestión activa del lado de la demanda. Dado su potencial para contribuir a las transiciones de energía, es relevante obtener una mejor comprensión de las condiciones bajo las cuales estos sistemas se difunden. Un estudio realizado sobre las responsabilidades percibidas y la absorción tecnológica prevista de los DES entre diferentes grupos sociales en Suiza, Alemania y Austria, atribuye la responsabilidad de las transiciones del sistema energético al Gobierno nacional y a las grandes empresas de suministro de energía. Los municipios y hogares aún no se consideran relevantes; además, se percibe que el apoyo de los DES es independiente de enmarcar su implementación en relación con diferentes escalas de justificación (cambio climático global, independencia energética nacional o autarquía local) [25].

En el caso del sector residencial, se estima que la utilización de respuesta de la demanda por parte de usuarios residenciales tiene potencial, costos relativamente altos, requiere medidores inteligentes y cambios culturales. La respuesta de la demanda por parte de consumidores residenciales debería tener un rol subordinado con respecto a la respuesta de demanda en la industria. Para esta última, se asume que la adaptación de la infraestructura requerida es más barata en comparación con los volúmenes de energía que se manejan; además, las modificaciones en los procesos productivos se pueden lograr si existen incentivos económicos [26]. De hecho, los requisitos básicos para hacer uso de la respuesta de la demanda que incluyen la instalación de medidores y el levantamiento de datos con respecto a consumos energéticos de subprocesos se llevan ya a cabo mediante certificaciones ISO 50001 y EMAS (Reglamento Comunitario de Ecogestión y Ecoauditoría). En el caso

de ISO 50001, Alemania contaba en 2016 con más de 90 000 empresas certificadas [27]; adicionalmente, empresas con altos consumos energéticos usualmente cuentan con unidades controlables de generación de energía (como plantas de generación combinada de calor y electricidad) que en caso de estar conectadas a la red otorgarían más flexibilidad.

Un trabajo realizado con 185 pilotos para el análisis de capacidades técnicas presentó un sistema de gestión de flexibilidad diseñado con el fin de proporcionar una solución de bajo costo para consumidores residenciales, deseando participar en el equilibrio de la red eléctrica. El sistema pronosticaba continuamente la necesidad de flexibilidad en una red eléctrica e informaba a los consumidores sobre los periodos de gestión de la flexibilidad. Los consumidores podían proporcionar su flexibilidad a un agregador a cambio de una recompensa que dependía del esquema de incentivos seleccionado. La automatización de los eventos de gestión de flexibilidad se proporcionaba mediante la interfaz con los dispositivos y el sistema, ello a través de las tecnologías utilizadas y la arquitectura unificada de comunicación de plataforma abierta. Los resultados indicaron que el enfoque propuesto era apropiado para involucrar a los consumidores en eventos de gestión de la flexibilidad, ya que en promedio los participantes de los pilotos redujeron su carga en un 10 % durante un evento pico [28].

En otro estudio, se determinó que los cinco tipos de procesos industriales con mayor potencial de utilización de respuesta de la demanda (cementos, químicos, aluminio, papeles y metalúrgica) podrían ofrecer hasta 2660 MW de potencia de balance al sistema [3]. Para este potencial, existen tres mercados que permiten su utilización en la red eléctrica alemana [29]: (a) el *spot-market* (transado en bloques de quince minutos) en las modalidades de un día adelante y para transacciones durante el mismo día; (b) el mercado de reservas primario (con tiempos de respuesta menores a 30 segundos), el secundario (con tiempos de respuesta menores a cinco minutos) y el terciario (con tiempos de respuesta menores a quince minutos); (c) el mercado creado por la ordenanza de cargas interrumpibles (AbLav, por sus siglas en Alemán) con múltiples opciones de participación [30].

El *spot-market*, en sus dos modalidades, fue pensado en tiempos de generación centralizada y convencional, por lo que las opciones reales de participación de la respuesta de demanda es poca y la participación de la industria se reduce a los casos en los que estas tienen generación propia, controlable y eficiente en función de los costos. Los mercados primario y secundario de reservas requieren tiempos de reacción difíciles de alcanzar en procesos productivos, y aunque hay empresas que participan en estos, la mayor parte de la participación se ha concentrado históricamente en el mercado de reservas terciario [31], [32]. Este último cuenta con una licitación por separado de las potencias negativas y positivas, donde el envío debe corresponder entre el 100 % y 120 % de la potencia solicitada, además de que la disponibilidad no debe ser inferior al 100 % dentro del periodo contractual. Estas reglas se aplican a los recursos de generación y carga sin excepción. La industria química, desde 2009, proveía potencial de balance en el mercado terciario de reservas por un total de 660 MW; con el objetivo de aumentar la participación y el perfil de los participantes, aquellos recursos con disponibilidad limitada pueden participar a través de un agregador, pero cada carga debe ser precalificada de manera independiente [31]. De esta manera, el potencial de DSM no solo es promovido por parte de la DENA, sino que los agregadores fomentan la participación entre aquellas industrias que cumplen los requisitos.

El concepto de agregador hace referencia a un modelo de negocio en el cual un operador independiente ofrece un servicio de gestión de la demanda a diferentes clientes, reuniendo el potencial de flexibilidad de cada uno de ellos para participar en el mercado. Esta externalización permite aprovechar economías de escala, reducir costes e incrementa el potencial de los clientes agregados, explotando complementariedades entre las diferentes instalaciones. La actividad de agregación se basa en la instalación de equipos de acceso remoto que conectan la instalación eléctrica con el agregador, permitiendo gestionar la demanda de energía de la planta de forma automática.

El modelo de negocio de los agregadores se puede dividir —en función de los servicios ofrecidos— entre agregadores con un rol independiente y agregadores con un rol combinado, siendo posible que un mismo agregador oferte ambos servicios. Agregadores independientes son aquellos que actúan con independencia del proveedor usual y del proveedor responsable del servicio de balance. Los agregadores con un rol combinado actúan también como suministradores, lo que reduce la complejidad del servicio. Además de las ventajas por participar en los mecanismos de DSM, la agregación conlleva una ventaja económica, ya que la instalación de estos dispositivos genera un ahorro en el costo de la potencia contratada. Esta actividad es, a la vez, complementada con el uso de sistemas de almacenamiento para reducir la energía proveniente de la red cuando el mercado presenta mayores precios o con un modelo de economía de colaboración como son los prosumidores (consumidores que hacen parte activa de la creación de productos de consumo y servicios de amplio impacto).

Por último, el mercado creado por la ordenanza de cargas interrumpibles fue puesto en marcha en 2012 con el objetivo de reducir el impacto de la energía eólica y aumentar la seguridad del sistema. AbLaV considera cargas interrumpibles a aquellas unidades de consumo que pueden reducir la demanda de forma programada y segura bajo petición del operador de la red de transmisión. Para ello, regula las condiciones bajo las cuales las industrias intensivas en el uso de energía pueden reducir su nivel de demanda durante periodos cortos de tiempo (cuartos de hora) a cambio de una compensación económica. En 2016, la ordenanza fue modificada para reducir sus requisitos y flexibilidad, aumentando la participación en el esquema, ya que hasta 2016 solo se concretaron seis contratos con cuatro empresas [29]; entre estos cambios destacan: la reducción de la carga mínima disponible de 50 MW a 5 MW, la reducción de precio máximo de la capacidad de 2500 Eur/MW y mes a 500 Eur/MW y semana, la convocatoria de licitaciones semanal (antes mensual), los requisitos mínimos de conexión a la red de 110 kV a 20 kV, entre otros [30].

3.3. Gestión de la demanda en Chile

A partir de la década del 2000, el sector energético chileno experimenta sustantivas modificaciones legislativas que buscan adaptar y modernizar el marco regulatorio para hacer frente a las nuevas necesidades del país, esto es, a una permanente evolución tecnológica y a un nuevo contexto energético nacional, regional y mundial. Entre 2004 y 2005 entran en vigencia la Ley Corta I (19.940) y la Ley Corta II (20.018), las cuales incorporan por primera vez la definición y promoción de los Medios de Generación de Energías Renovables no Convencionales. Luego, en el 2008, es promulgada la Ley 20.257 que obliga a abastecer un 10 % de la demanda mediante inyecciones provenientes de ERNC, sufriendo en el 2013 una modificación con objeto de alcanzar un 20 % de la demanda abastecida por ERNC en el 2025 (Ley 20.698). Como resultado de estas reformas y

del amplio potencial ERNC, en marzo de 2018 la capacidad instalada de los sistemas eléctricos chilenos (sistema eléctrico nacional, sistema eléctrico de Aysén y sistema eléctrico de Magallanes) alcanzan 23 534.7 MW, de los cuales 4 558.65 MW corresponden a ERNC. De ellos, 2 447.42 MW corresponden a sistemas solares fotovoltaicos y 1 610.55 MW a sistemas eólicos [33]. Asimismo, continúan sumándose nuevos proyectos con base en fuentes renovables de energía variables, se trata de alrededor de 1125 MW sobre energía eólica y solar PV que actualmente se encuentran “en pruebas” y “en construcción”, y a los cuales podrían sumarse otros 25 017 MW provenientes de proyectos que ya cuentan con calificación ambiental (RCA) favorable [33].

Como en el caso alemán, uno de los principales impactos de la incorporación de las ERNC es el requerimiento de flexibilidad o capacidad del sistema eléctrico para responder a los cambios en el equilibrio de oferta y demanda de manera oportuna, así como el desarrollo de nueva infraestructura para transportar esta energía desde los puntos de generación hasta los de consumo. Además de las ERNC, Chile es país líder en la industria minera, donde estudios de la aplicación de DSM concluyen que es una excelente herramienta económica para controlar la demanda de electricidad debido al alto impacto que podría tener en los costos operacionales [34]. Esto se encuentra condicionado a una correcta caracterización de la demanda como una medida clave para implementar planes de uso eficiente de la energía y capacidad, además de que es necesario crear un mercado secundario con reglas claras y que ofrezca incentivos para aquellos consumidores que empleen DSM [35].

Siendo conscientes de estas dificultades, se han comenzado a mostrar los primeros avances desde el punto de vista de la política energética. La hoja de ruta del Ministerio de Energía chileno propuesta hacia 2050 promueve la producción descentralizada y gestión activa de la demanda, puesto que los mecanismos de gestión de la demanda en conjunto con las aplicaciones de redes inteligentes tienen como finalidad entregar flexibilidad y elasticidad [36], pero también pueden incrementar la eficiencia, competitividad y sostenibilidad del sistema en su conjunto. En esta misma línea, Energía 2050 ha fijado como meta que al 2050 el sector público, comercial y residencial aprovechen su potencial de generación distribuida y gestión de la demanda eléctrica [36]; en consecuencia, se espera que en los próximos años el sistema energético chileno experimente una creciente implementación de DSM.

Para integrar los servicios de DSM dentro del mercado chileno, en 2016 es promulgada la Ley que “establece un Nuevo Sistema de Transmisión Eléctrica y crea un Organismo Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional” (Ley 20.936); con esta legislación, se crea el nuevo marco regulatorio para los consumidores que prestan sus recursos técnicos, ello con objeto de preservar la seguridad del servicio energético en el sistema a partir de los SSCC. Conviene destacar que esta ley también incorpora por primera vez la definición de los sistemas de almacenamiento de energía y equipamiento tecnológico, siendo capaz de retirar energía desde el sistema eléctrico, transformarla en otro tipo de energía (química, potencial, térmica, entre otras) y almacenarla con el objetivo de inyectarla nuevamente al sistema eléctrico. Así, se contribuye a la seguridad, suficiencia o eficiencia económica del sistema, viabilizando que los sistemas de almacenamiento presten flexibilidad para el sistema y sean instrumento de DSM.

En noviembre de 2018, el diario oficial publicó la Ley 21.118 que modifica la Ley General de Servicios Eléctricos, ello con el fin de incentivar el desarrollo de las generadoras residenciales.

Esta modifica los artículos 149 bis y 149 ter de la Ley 20.571, estableciendo que los usuarios finales sujetos a fijación de precios que dispongan su propio consumo de equipamiento de generación por medios renovables no convencionales o de instalaciones de cogeneración eficiente, de manera individual o colectiva, tendrán derecho a inyectar la energía que generan a la red de distribución. Pueden operar de esta forma conjuntos habitacionales como, por ejemplo, condominios, con un límite de generación donde la capacidad instalada por cada inmueble o instalación de un cliente o usuario final no podrá superar los 300 kilowatts. Las concesionarias de servicio público dispondrán de un contrato con los participantes, definiendo el equipamiento de generación del usuario final y sus características técnicas, capacidad instalada de generación y la opción tarifaria, así como destino de remanentes no descontados. De igual forma, se definen los remanentes de inyecciones de energía que, transcurrido el plazo señalado en el contrato, no hayan sido descontados; así, podrán a voluntad de clientes ser descontados de los cargos por suministro eléctrico correspondientes a inmuebles o instalaciones de propiedad del mismo cliente [37].

Otra de las modificaciones legales y que debería ingresar al Congreso en el presente 2019 es la Ley Miscelánea de Perfeccionamiento del Sector, la cual se dividirá en dos proyectos: el Proyecto de Ley Perfeccionamiento Transmisión y el Proyecto de Ley de Flexibilidad. El primer proyecto busca incorporar herramientas regulatorias que aporten flexibilidad a la ejecución y planificación de la transmisión, incorporando desarrollos tecnológicos de manera eficiente y que permitan aprovechar de una mejor manera los recursos del país. Busca también acortar los plazos y procedimientos para que la generación y la demanda puedan acceder y utilizar las redes eléctricas. El segundo proyecto de flexibilidad tiene como principal objetivo generar las condiciones para que el desarrollo del sistema eléctrico en el mediano y largo plazo sea seguro, eficiente y sostenible, en particular para la creciente inserción de las energías renovables. Se plantea también el desafío jurídico y técnico, donde se debe trabajar por encontrar un justo equilibrio entre la entrega de certeza de señales de largo plazo a los agentes, con marcos normativos que moldeen los espacios para reaccionar a tiempo frente a los cambios. Se tiene en cuenta la incorporación, en el caso de la potencia inicial, de sistemas de almacenamiento, además de incluir consideraciones por indisponibilidad forzada, la relación entre el almacenamiento y la demanda de punta y la determinación de potencia inicial renovable en función del tipo de suministro energético. Dentro de los principales desafíos se encuentra la metodología en la asignación de potencia, destacándose la necesidad de trabajar en elaborar políticas públicas para perfeccionar y modernizar el mercado eléctrico [38].

En la Figura 3, se muestra un paralelismo entre la experiencia alemana y la chilena en términos del desarrollo y aplicación de DSM y DR. Se caracterizan ambos casos por una columna vertebral que retrata una historia similar originada por el aumento en la penetración de energías renovables; el caso alemán presenta mayor anticipo y, por lo tanto, ofrece al caso chileno la posibilidad de acoger iniciativas que han logrado fomentar el uso de esta herramienta.

4. Discusión

Los SSCC desempeñan un rol fundamental para enfrentar la incorporación de ERNC variables en la matriz energética chilena, puesto que permiten la utilización de recursos disponibles en el sistema con objeto de preservar la seguridad del servicio eléctrico y, al mismo tiempo, procurando garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones.

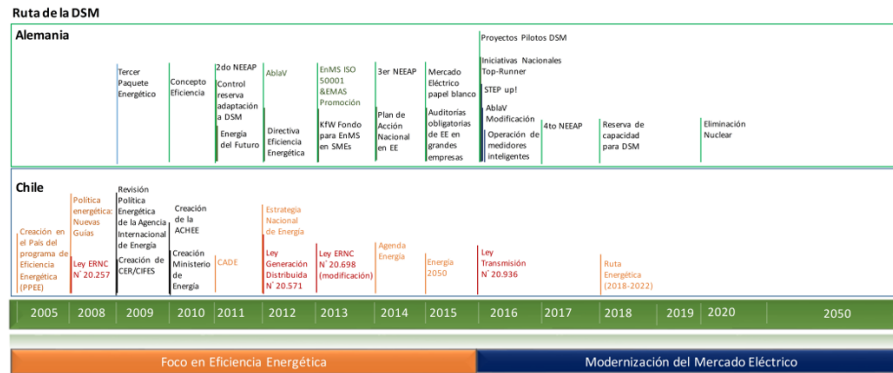


Figura 3. Evolución energética para implementar la DSM en Alemania y Chile.

Fuente: elaboración propia basada en [9].

Si bien se han identificado importantes avances en términos de la discusión e intención de incorporar al sector demanda en un mercado de SSCC, estas iniciativas aún no han visto la luz en su totalidad en Chile. La provisión de reservas de regulación de frecuencia de apertura a DER (Recursos Energéticos Distribuidos) no está exenta de costo para los TSO (Operadores de Sistemas de Transmisión). Los costos de aprendizaje como TSO tendrán que implementar nuevos procedimientos para intercambiar información con diferentes jugadores, y los costos de transacción están presentes. Estos costos deben evaluarse para equilibrarlos con los beneficios potenciales. Sin embargo, dada la creciente participación de las energías renovables intermitentes, los TSO, los reguladores y los gobiernos deben anticipar estos problemas de flexibilidad y explorar opciones para abrir mercados a los nuevos participantes, ello a fin de garantizar una fase de prueba adecuada y gestionar la transición sin problemas antes de verse obligados a hacerlo. Abrir el mercado a nuevos actores, como los agregadores, no debería significar introducir una gran complejidad en los diseños del mercado, lo que podría generar incertidumbre y obstaculizar las inversiones. Se pueden crear excepciones a las reglas o esquemas complementarios dirigidos específicamente a los DER para fomentar las inversiones, pero, en última instancia, se debe implementar un diseño de mercado unificado para obtener reservas al menor costo posible.

Aunque agregadores independientes podrían incrementar la competencia en el mercado y abrir la puerta a nuevos competidores, la falta de un marco claro que regule tanto el rol de los agregadores como las relaciones entre agregadores responsables del servicio de balance y los proveedores de energía hace muy difícil este modelo de negocio. Lo anterior se debe a la necesidad de contar con reglas claras para el servicio de balance, las compensaciones financieras para los proveedores y en la transferencia de datos. La experiencia alemana muestra que modelos de negocio basados en agregadores con un rol combinado podrían ser más compatibles con el diseño de mercado chileno [39].

Transactive Energy (TE), *per-to-per (P2P)* y *control-based approach (CBA)* son tres alternativas para abordar los problemas asociados a los AS [40]. TE propone una solución basada en un mercado para la administración de pequeños recursos energéticos distribuidos, servicios de almacenamiento y otras reservas de frecuencia en el nivel de distribución. P2P es un modelo emergente

basado en la economía colaborativa y permite a los agentes comercializar directamente sus recursos sin la intervención del operador del sistema. Finalmente, CBA considera la agrupación de prosumidores mediante la figura de los subagregadores, los cuales ofertan los recursos ante un agregador. Además, propone un nuevo mecanismo denominado “Ancillary Services 4.0: A Top-to-Bottom Control-Based Approach for Solving Ancillary Services Problems in Smart Grid”, el cual se basa en dos principios básicos: primero, cada prosumidor es controlado por un pequeño administrador local; mientras que el segundo es el tratamiento de la operación de los problemas del sistema de manera desagregada en términos espacio temporales. Todas estas alternativas buscan obtener el máximo provecho —en términos de SSCC— de los “prosumers” de energía localizados en el sector de distribución, sean estos residenciales o industriales; además, integrando la penetración de la electromovilidad.

Con objeto de superar los desafíos que impone el sector eléctrico chileno, cabe destacar la necesidad de un marco regulatorio que abra las puertas para la participación de todos los consumidores industriales que puedan implementar DSM, ello a través de reglas claras e incentivos reales, ya sea de manera directa o a través de terceros. Si se observa el caso alemán, no basta con tener mercados con la opción para que las industrias ofrezcan su potencial de DSM, sino que es necesario un espacio para industrias cuyo negocio principal no es la generación de energía. El *spot-market* y el mercado de reservas fueron creados con empresas generadoras de energía en mente, y si no se desarrolla un proceso de acompañamiento a la industria productiva no es de esperarse que esta decida participar en estos. Reglas más laxas para la industria productiva permitirían que se integre a ofrecer su potencial de respuesta de demanda durante el proceso de transición a mayores penetraciones de ERNC, y no apenas en algunas décadas después cuando las plantas de generación de energía convencionales sean dadas de baja.

La creación de un mercado propio para competencia entre iguales, como el creado por la AbLaV en Alemania, sería un paso importante para llevar los potenciales de DSM de la industria chilena al sistema eléctrico; sin embargo, en caso de querer concebir algo así, es importante que se piense en reglas que permitan participar a la industria productiva con altos potenciales de DSM y no solo a grandes industrias. Para ello, será necesario que se estudien aspectos técnicos que pueden variar considerablemente en función del equipamiento y los procesos que se llevan a cabo en plantas como: el nivel de reducción de la carga mínima, la periodicidad de las convocatorias de licitaciones o los requisitos mínimos de conexión a la red, entre otros. Por otro lado, y con el objetivo de adaptar el marco legislativo a la realidad de la economía chilena, se necesitan periodos de revisión más cortos de la normativa (en el caso alemán se necesitaron cuatro años para corregir una normativa que no estaba surtiendo fruto). Si estas condiciones no se dan, valdría la pena concentrarse en un mercado de reservas que sea más vinculante con la industria productiva.

Vale destacar la importancia de las medidas que pueden contribuir a que la industria productiva haga DSM como la implementación de estándares de manejo de energía a la manera del ISO 50001. Como se ha señalado, uno de los requisitos básicos para hacer uso de DSM es la instalación de medidores y el levantamiento de datos. En Alemania, este levantamiento de datos se lleva a cabo mediante certificaciones ISO 50001, puesto que el Gobierno introdujo una serie de políticas para incrementar el número de certificaciones como extensiones de hasta el 99 % de los impuestos de la energía [22], [41].

5. Conclusiones

Este estudio hace una revisión del desarrollo histórico y conceptos básicos de DSM, presentando los avances regulatorios y organizativos de los mercados en términos de DSM en Alemania y Chile. El análisis comparativo muestra los paralelismos entre los casos chileno y alemán, destacando el reto de integrar una creciente cantidad de ERNC, autoconsumo y la carga de vehículos. La capacidad de ambos sistemas para adaptarse a los nuevos retos pasa por el desarrollo de sistemas de gestión de la demanda que reduzcan la rigidez del sistema, aumentando los niveles de eficiencia y competitividad. Para ello, una mirada a los éxitos y desaciertos de la experiencia alemana muestra que conocer los potenciales de DSM es esencial, ya que sin ella no es posible entender la naturaleza de estos retos.

Tras el análisis de la integración de DSM en la industria, quedan patentes las dificultades existentes a la hora de encajar el amplio potencial de DSM tanto en el mercado chileno como alemán; lo anterior se debe a la falta de una verdadera regulación que permita, no solo participar a aquellas industrias con potencial de DSM en los mercados, sino a la capacidad de establecer reglas claras y mecanismos que integren las características de estas. Asimismo, el análisis del caso alemán muestra la necesidad de reducir la complejidad del marco normativo con el objetivo de facilitar la entrada de nuevos actores que dinamizan el mercado, ya sea directamente o a través de terceros.

En relación con la implementación de DSM, un elemento que resulta trascendental e ineludible es la incorporación de infraestructura asociada a las tecnologías de la información y de la comunicación en el nivel de usuarios o clientes finales, así como en toda la red eléctrica. Se aplica lo anterior también en el caso del sector residencial, que en ambos países necesita un estudio para determinar el potencial real disponible y así hacer factible el buen desarrollo de DSM. La disponibilidad de información instantánea, además de registros históricos y series de datos, viabilizan la posibilidad no tan solo de gestionar la demanda según los requerimientos del sistema, sino que abre la puerta a la creación de nuevos mercados asociados. No obstante, la experiencia alemana muestra que desde el punto de vista económico resulta mucho más viable la implementación de ICT en el sector industrial, dado los volúmenes de energía que se manejan.

Finalmente, es importante que la academia contribuya con números concretos de potenciales de DSM de la industria en el caso chileno y que se estudien cuáles son los incentivos necesarios para que la industria productiva nacional se vincule al mercado de SSCC o alguno similar al creado por la AbLaV, el cual se pudiera crear en Chile. Adicionalmente, es importante que se dé acompañamiento a la industria para que vea las ventajas de ofrecer su potencial de DSM o para que se decida a ofrecer este a través de agregadores

Referencias

- [1] W. S. Tan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, y H. Abdul, "Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 626–645, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.039>†236
- [2] R. Passey, T. Spooner, I. MacGill, M. Watt y K. Syngellakis, "The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors", *Energy Policy*, vol. 39, n. o

- 10, pp. 6280–6290, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.027> ↑236
- [3] M. Paulus y F. Borggreffe, “The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany”, *Applied Energy*, vol. 88, n. o 2, pp. 432–441, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.017> ↑236, 242
- [4] P. Warren, “The use of systematic reviews to analyse demand-side management policy”, *Energy Efficiency*, vol. 7, n. o 3, pp. 417–427, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12053-013-9230-x> ↑236
- [5] C. Kuzemko, C. Mitchell, M. Lockwood, y R. Hoggett, “Policies, politics and demand side innovations: The untold story of Germany’s energy transition”, *Energy Research and Social Science*, vol. 28, pp. 58–67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.03.013> ↑237, 240
- [6] C. W. Gellings, “The concept of demand-side management for electric utilities”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, n. o 10, pp. 1468–1470, 1985. <https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13318> ↑237
- [7] P. Warren, “A review of demand-side management policy in the UK”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 941–951, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.009> ↑237, 238
- [8] Z. Ming, X. Song, M. Mingjuan, L. Lingyun, C. Min, y W. Yuejin, “Historical review of demand side management in China: Management content, operation mode, results assessment and relative incentives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 470–482, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.020> ↑237
- [9] J. Valdes, A. Poque, L. Ramírez, Y. Masip y W. Dorner, “Industry, flexibility, and demand response: Applying German energy transition lessons in Chile”, *Energy Research and Social Science*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.03.003> ↑238, 239, 246
- [10] A. F. Meyabadi y M. H. Deihimi, “A review of demand-side management: Reconsidering theoretical framework”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 367–379, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.207> ↑238
- [11] R. Sharifi, S. H. Fathi, y V. Vahidinasab, “A review on Demand-side tools in electricity market”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 565–572, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.020> ↑238
- [12] M. H. Albadi y E. F. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets”, *Electric Power Systems Research*, vol. 78, n. o 11, pp. 1989–1996, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.04.002> ↑238
- [13] A. Pina, C. Silva y P. Ferrão, “The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity”, *Energy*, vol. 41, n. o 1, pp. 128–137, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.013> ↑238
- [14] C. Bergaentzlé, C. Clastres y H. Khalfallah, “Demandside management and European environmental and energy goals: An optimal complementary approach”, *Energy Policy*, vol. 67, pp. 858–869, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.008> ↑238
- [15] International Energy Agency (IEA), “Energy Policies of IEA Countries. Germany 2007 Review”, 2007. ↑239
- [16] International Energy Agency (IEA), “Germany. Energy System Overview”, 2017. ↑239
- [17] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Renewable Energy Sources Act (EEG 2017)”, 2017. ↑239
- [18] O. Borne, K. Korte, Y. Perez, M. Petit y A. Purkus, “Barriers to entry in frequencyregulation services markets: Review of the status quo and options for improvements”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 605–614, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.052> ↑240
- [19] T. Muller y D. Most, “Demand Response Potential: Available when Needed?”, *Energy Policy*, vol. 115, pp. 181–198, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.025> ↑240
- [20] P. Schott, J. Sedlmeir, N. Strobel, T. Weber, G. Fridgen y E. Abele, “A generic data model for describing flexibility in power markets”, *Energies*, vol. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12101893> ↑240
- [21] A. L. Klingler, “Self-consumption with PV+Battery systems: A market diffusion model considering individual consumer behaviour and preferences”, *Applied Energy*, vol. 205, pp. 1560–1570, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.159> ↑240
- [22] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Making more out of energy. National Action Plan on Energy Efficiency”, Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2014. ↑240, 247
- [23] P. Bertoldi, P. Zancanella, B. Boza-Kiss, *Demand response status in EU Member States*. Luxembourg: Publications Office, 2016. ↑241
- [24] K. Wohlfarth, M. Klobasa y A. Esser, “Setting course for demand response in the service sector”, *Energy Efficiency*, vol. 12, n. o 1, pp. 327–341, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9728-3> ↑241

- [25] R. Seidl, T. von Wirth y P. Kruetl, "Social acceptance of distributed energy systems in Swiss, German, and Austrian energy transitions", *Energy Research and Social Science*, vol. 54, pp. 117–128, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.04.006> ↑241
- [26] N. Krzikalla, S. Achner y S. Brühl, "Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien", Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energien, Aachen, Germany, Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie, 2013. ↑241
- [27] International Organization for Standardization, "ISO Survey 2016", 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/the-iso-survey.html>. ↑242
- [28] J. Kiljander et al., "Residential Flexibility Management: A Case Study in Distribution Networks", *IEEE ACCESS*, vol. 7, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923069> ↑242
- [29] Deutsche Energieagentur, "Roadmap Demand Side Management: Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem", Deutsche Energieagentur, Berlin, 2016. ↑242, 243
- [30] Deutsche Bundesregierung, "Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (Verordnung zu abschaltbaren Lasten - AbLaV)", 2016. ↑242, 243
- [31] B. Bayer, "Current Practice and Thinking with Integrating Demand Response for Power System Flexibility in the Electricity Markets in the USA and Germany", *Curr Sustainable Renewable Energy Rep*, vol. 2, n. o 2, pp. 55–62, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0028-7> ↑242
- [32] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, "Regelleistung.net: Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung.", *Regelleistung.net*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.regelleistung.net/ext/> ↑242
- [33] Comisión Nacional de Energía de Chile, "Reporte Mensual ERNC CNE marzo 2018", Comisión Nacional de Energía, Vol. 19, 2018. ↑244
- [34] S. Díaz, E. Gil, A. Palacios, "Demand side management, an imperative asset for the mining industry", En *ENERMIN 2016: 3rd International Seminar on energy Management in Mining*, Santiago de Chile, 2016, p. 10. ↑244
- [35] V. J. Martínez y H. Rudnick, "Design of demand response programs in emerging countries", *Power System Technology (POWERCON)*, En *IEEE International Conference on*, 2012. <https://doi.org/10.1109/PowerCon.2012.6401387> ↑244
- [36] Ministerio de Energía de Chile, "Energía 2050: Política Energética de Chile", 2015. ↑244
- [37] Comisión de Minería y Energía Cámara de Diputados "Agenda Legislativa 2019. Ruta Energética 2018-2022. Liderando la modernización con sello ciudadano", 2019. ↑245
- [38] Ministerio de Energía, "Ley 21.118". Diario Oficial de la República de Chile, 2018. ↑245
- [39] R. Verhaegen y C. Dierckxens, "Existing business models for renewable energy aggregators". [En línea]. Disponible en: http://bestres.eu/wp-content/uploads/2016/08/BestRES_Existing-business-models-for-RE-aggregators.pdf ↑246
- [40] G. De Zotti, S. A. Pourmousavi, H. Madsen y N. Kjolstad, "Ancillary Services 4.0: A Top-to-Bottom Control-Based Approach for Solving Ancillary Services Problems in Smart Grids", *IEEE Access*, vol. 6, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2805330> ↑246
- [41] G. F. Siciliano, "Energy management policies and programs from around the globe". [En línea]. Disponible en: https://www.unido.org/sites/default/files/2014-04/7.Energy_policies_related_to_energy_management_Siciliano_0.pdf ↑247

Axel Poque

Ingeniero civil en electricidad. Ayudante de Investigación en el Proyecto BMBF150075: "Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized chp energy dispatch scheduling and demand side management", financiado por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT).
Correo electrónico: axel.poque.g@mail.pucv.cl

Meyli Valín

Dra. Ingeniera mecánica e investigadora en el Proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized chp energy dispatch scheduling and demand side management”, financiado por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT).

Correo electrónico: meyli.valin@pucv.cl

Luis Ramírez

Investigador de la Technische Hochschule Deggendorf en Alemania con doctorado en recursos naturales y maestría de ingeniería en medio ambiente y manejo de recursos naturales de la Universidad de Ciencias Naturales de Viena (BOKU). Experto en la modelación espacio-temporal de sistemas de energías renovables y miembro del equipo del proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized chp energy dispatch scheduling and demand side management”, financiado por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT).

Correo electrónico: luis.ramirez-camargo@th-deg.de

Javier Valdes

Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales por las Universidades de Ferrara y Parma, actualmente trabaja en la universidad Technische Hochschule Deggendorf como investigador del proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized chp energy dispatch scheduling and demand side management”, financiado por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT). Anteriormente ha sido investigador visitante en el Instituto Leibniz de Estudios de Europa del Este y Sudeste (IOS) y en la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), e investigador asociado del Grupo de Economía Política Internacional y de la Energía en la UNED.

Correo electrónico: javier.valdes@th-deg.de

Yunesky Masip

Dr. Ingeniero mecánico y profesor Auxiliar de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Investigador Responsable del Proyecto BMBF150075: “Increasing renewable energy penetration in industrial production and grid integration through optimized chp energy dispatch scheduling and demand side management”, financiado por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania (BMBF) y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT). Además, Director de Vinculación con el Medio e Internacionalización del Proyecto Ingeniería 2030 de la Facultad de Ingeniería PUCV y financiado por CORFO-Chile.

Correo electrónico: yunesky.masip@pucv.cl



Instrucciones para los Autores

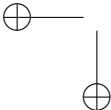
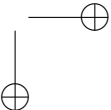
Introducción

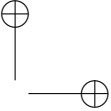
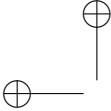
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
 - **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
 - **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
 - **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
 - **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que
- 
- 



enfatar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”.
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)

La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

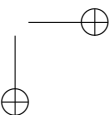
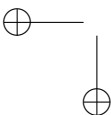
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

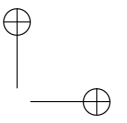
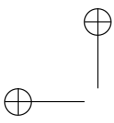
- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener a una institución diferente a la de los autores.
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años.

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica: revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>



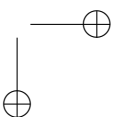
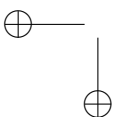


Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

Derechos de autor

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista INGENIERÍA, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0.





Instructions for authors

Aim and scope

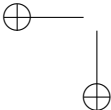
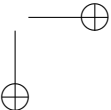
INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

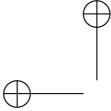
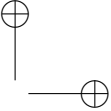
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
 - **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
 - **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
 - **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
 - **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.
- 
- 

- 
- 
- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

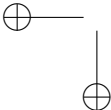
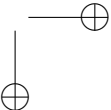
– Must belong to an institution other than the authors’

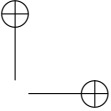
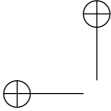
– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
 - The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
 - When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.
- 
- 



Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

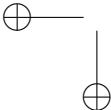
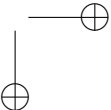
Code of good conduct in scientific publishing

INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
 2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
 3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
 4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.
 5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.
 6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.
- 
- 



Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B.0.pdf>

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B.0.pdf>

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

