



Ingeniantes®

Año 11, No.1, Vol. 2

Revista de Investigación . Instituto Tecnológico Superior de Misantla

latindex

ISSN 2395-9452



Congreso Internacional de Instalaciones **ELECTROMECÁNICAS** 2024



Edición Especial

Ingeniantes

Año 11 / No. 1 / Vol. 2

Información Legal

Ingeniantes, Año 11, No. 1, Vol 2. junio 2024 - diciembre 2024, es una publicación semestral editada y publicada por el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, teléfono 01 (235) 323 60 18, página web citt.itsm.edu.mx. Editor responsable: Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-062512501200-203, ISSN 2395-9452, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología del ITSM, Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas, Km. 1.8 carretera a Loma del Cojolite, Misantla, Veracruz. México, C.P. 93850, fecha de última modificación, 25 de junio de 2024.

Actualmente indexada en la base de datos del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal LATINDEX, con número de registro 22843.

Se autoriza cualquier reproducción parcial de los contenidos o imágenes de la publicación siempre y cuando sea sin fines de lucro y para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente dando los créditos a los autores del artículo.

El contenido de los artículos publicados es responsabilidad de los autores y no representa el punto de vista del editor de la Revista Ingeniantes.

Cuerpo Editorial

Editor General
Instituto Tecnológico Superior de Misantla
Editor
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas
Coeditor
Lic. Erik Balderas González

Administración

Ing. Mayra Lizeth Méndez Oloarte

Propiedad Intelectual

Centro de Innovación & Transferencia de Tecnología
Lic. Jorge Obdulio Gerón Borjas

Sistemas

Administrador de Sistemas
M.S.C. Fernando Alberto Hernández Guevara
Webmaster
L.I. Ana Marcela Gutiérrez Romero

Distribución

Publicación electrónica disponible en
citt.itsm.edu.mx/ingeniantes
Correo electrónico:
revista.ingeniantes@itsm.edu.mx
<https://www.latindex.org/latindex/ficha/22843>

Directorio

M.G.E. Jorge Alberto Lara Gómez

Director General, ITSM, Veracruz, México

Mtro. Arturo Olguin Hernández

Director Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Julio Cesar Rosas Cruz

Director de Planeación y Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Dr. Alfonso Landero Hernández

Subdirector Académico, ITSM, Veracruz, México

Lic. Adriana López Trujillo

Subdirectora de Planeación, ITSM, Veracruz, México

Dra. María Cristina López Méndez

Subdirectora de Posgrado e Investigación, ITSM, Veracruz, México

M.C.E. Lidia Herrera Domínguez

Subdirectora de Vinculación, ITSM, Veracruz, México

Lic. Laura Eugenia Hernández Pérez

Subdirectora de Servicios Administrativos, ITSM, Veracruz, México

Comité de Revisión

Dr. Luis Eduardo Velázquez Contreras, US	SNI	Dr. Cuauhtémoc Guerrero Dávalos, UMSNH
Dr. Luis Alberto Morales Rosales, UMSNH	SNI	Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT
Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor, CENIDET	SNI	Dra. María Victoria Carreras Cruz, UP
Dr. Abel García Barrientos, UASLP	SNI	Dr. Alfredo Alberto Morales Tapia, UV
Dr. David Lara Alabazares, ITSM	SNI	Dr. Ramón Álvarez López, UDG
Dr. Gregorio Fernández Lambert, ITSM	SNI	Dr. Gustavo Martínez Castellanos, ITSM
Dra. Susana López Cuenca, ITSDZ	SNI	Dr. Arturo Cabrera Hernández, ITSM
Dr. Javier Esquer Peralta, UNISON	SNI	Dr. Saúl Santiago Cruz, ITSM
Dr. Francisco Reyes Zepeda, IEA-UAT	SNI	Dr. Joel Pozos Osorio, HUB2i
Dr. Eduardo Mael Sánchez Coronado, ITCV	SNI	Dra. Ana Lilia Sosa y Durán, ITSM
Dr. Jesús Antonio Álvarez Cedillo, IPN	SNI	Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, ITO
Dr. Roberto Ángel Meléndez Armenta, ITSM	SNI	Dr. Guillermo Alfredo Arrijoja Carrera, UX
Dr. Noé Alejandro Castro Sánchez, CENIDET	SNI	Dr. Modesto Raygosa Bello, ITO
Dr. José Jasson Flores Prieto, CENIDET	SNI	Dr. Luis Alberto Nava Ordoñez, UPAEP
Dr. Adolfo Preciado Quiroz, ITSDZ	SNI	Dr. Luis Enrique García Santamaría, ITSM
Dr. José Luis Marín Muñoz, CV	SNI	Dr. Irahan Otoniel José Guzmán, ITSM
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNI	Dra. Alicia Martínez Rebollar, CENIDET
Dr. Julio César Chacón Hernández, UAT	SNI	Dr. Humberto Raymundo González Moreno, ITSM
Dr. Eddy Sánchez de la Cruz, ITSM	SNI	Dr. Alan Rico Barragán, ITSM
Dra. María Cristina López Méndez, ITSM	SNI	M.C. Clovis Nchikou, ITNL
Dr. Luis Carlos Sandoval Herazo, ITSM	SNI	M.I. Fernando Jurado Pérez, ITESI
Dr. José de Jesús Ibarra Montalvo, ITSDZ	SNI	M.I.I. Aarón Montiel Rosales, ITSPR
Dr. Andrés Blanco Ortega, CENIDET	SNI	M.I.I. Nayeli Montalvo Romero, ITSPR
Dr. Juan Carlos González Hernández, ITM	SNI	M.I.I. Gema del Carmen Jiménez Gómez, ITSAV
Dr. Heriberto Esteban Benito, ITSNA	SNI	M.I.I. Mario Pérez Acosta, ITSM
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNI	M.I.I. Leonardo Martínez Lara, ITSAV
Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, UV	SNI	M.S.C. Arnulfo Gamaliel Hernández González, ITSM
Dra. Blanca Dina Valenzuela Robles, CENIDET	SNI	M.I.M. Jorge Roa Díaz, ITSM
Dr. Daniel Martínez Navarrete, ITSAV	SNI	M.C. Vladimir Zagoya Juárez, ITSM
Dra. Laura Celina Ruelas Monjardín, UV	SNI	M.G.C. Eduardo Gutierrez Almaraz, ITSM
Dr. Luis Mejía Macario, ITSM	SNI	M.I.I. Giovanni Luna Chontal, ITSM
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, UTCV	SNI	M.A. Luz del Carmen Muñoz Palacios, UTCV
Dr. Sergio Fabian Ruiz Paz, UNPA	SNI	M.C. Joel Maurilio Morales García, ITSM
Dr. Arturo Pacheco Espejel, IPN	SNI	

Ingeniantes



03



10



17



23

Contenido

Exploración de tecnologías para la generación de hidrógeno verde: desde energías renovables hasta los electrolizadores más utilizados _____ 03

Juan Antonio Pinilla-Rodríguez, Universidad Cristóbal Colón; Felipe de Jesús Pozos-Texton, María Monserrath Tijerino-Torres, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Metodología para el desarrollo de proyectos eléctricos enfocada a unidades habitacionales en México _____ 10

Pedro Aguilar Canseco, FIMCN Universidad Veracruzana; Juan Antonio Pinilla Rodríguez, Universidad Cristóbal Colón; Francisco Ortiz Martínez; Josué Domínguez Márquez; Adrián Vidal Santo, FIMCN Universidad Veracruzana

Fundamentos de sistemas de transmisión de alta tensión en Corriente Directa (HVCD) __ 17

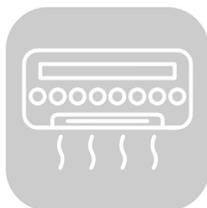
Juan Antonio Pinilla-Rodríguez; Felipe de Jesús Pozos-Texton; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Estudio de Comportamiento de Velocidad del Viento en Boca del Río Mediante Distribución Weibull _____ 23

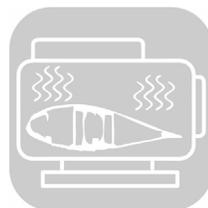
Erika Jazmín De la Cruz Ángel; José Alfredo Inclán Barragán; Guadalupe González Mejía; Ruth María Grajeda Rosado, Universidad Veracruzana; Pedro Díaz Abascal, Universidad Cristóbal Colón



30



36



44

Hacia una Solución Sostenible: Propuesta de sistemas de protección para la reducción de mortalidad en murciélagos debido a turbinas eólicas _____ 30

Jacqueline Hernández-Andrade; Felipe de Jesús Pozos-TeXon, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Juan Antonio Pinilla-Rodríguez; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Desarrollo de un sistema SCADA con adquisición de temperaturas para comparación de eficiencia térmica de aires acondicionados _____ 36

Armando Campos Domínguez; Francisco López Huerta, FIEE Universidad Veracruzana; William Alejandro Castillo Toscano, FIMCN Universidad Veracruzana; Aldo Giovanni Vázquez Guzmán, MICRONA Universidad Veracruzana; Adrián Vidal Santo, FIMCN Universidad Veracruzana

Exploración de tecnologías para el reciclaje de palas de aerogeneradores _____ 44

Reyes Antonio Vergara-Quezada; Felipe de Jesús Pozos-TeXon, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Juan Antonio Pinilla-Rodríguez Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón



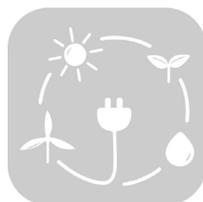
Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Exploración de tecnologías para la generación de hidrógeno verde: desde energías renovables hasta los electrolizadores más utilizados

RESUMEN: Esta investigación teórica aborda la posibilidad de generar hidrógeno verde por medio de la electrólisis del agua, con la energía solar fotovoltaica como principal fuente eléctrica. Considerando la abundancia y el gran potencial energético del hidrógeno, este podría ser una excelente alternativa de energía limpia. No obstante, los métodos convencionales de producción, como el reformado de gas natural con vapor, tienen una alta huella de carbono, emitiendo cantidades significativas de CO₂ que comprometen las ventajas ambientales del hidrógeno. Nuestros hallazgos indican que la electrólisis alimentada por energía solar no solo podría disminuir drásticamente las emisiones de CO₂ vinculadas a la obtención de hidrógeno, sino también contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a la lucha contra el cambio climático a nivel global. Adicionalmente, la reducción de los costos asociados a la tecnología fotovoltaica potencia la factibilidad económica de esta alternativa. Se examinan los beneficios de los electrolizadores sin membrana, cuyas ventajas incluyen la disminución de los gastos operacionales y una mayor resistencia a las impurezas. A pesar de enfrentar algunos retos técnicos, estos desarrollos marcan un avance hacia una producción de hidrógeno más eficaz y ecológica, posicionándolo como una fuente de energía futura prometedora.

PALABRAS CLAVE: Hidrógeno verde, electrólisis, energía fotovoltaica, sostenibilidad ambiental, tecnología electrolizadores.



Colaboración

Juan Antonio Pinilla-Rodríguez, Universidad Cristóbal Colón; Felipe de Jesús Pozos-Texon, María Monserrath Tijerino-Torres, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

ABSTRACT: This theoretical research addresses the possibility of generating green hydrogen by water electrolysis, with solar photovoltaic energy as the main electrical source. Considering the abundance and great energy potential of hydrogen, it could be an excellent clean energy alternative. However, conventional production methods, such as steam reforming of natural gas, have a high carbon footprint, emitting significant amounts of CO₂ that compromise the environmental advantages of hydrogen. Our findings indicate that solar-powered electrolysis could not only drastically decrease the CO₂ emissions linked to obtaining hydrogen, but also contribute to the Sustainable Development Goals and the fight against global climate change. In addition, the reduction of costs associated with photovoltaic technology enhances the economic feasibility of this alternative. The benefits of membrane-free electrolyzers, whose advantages include lower operational costs and greater resistance to impurities, are discussed. Despite facing some technical challenges, these developments mark a move towards more efficient and environmentally friendly hydrogen production, positioning it as a promising future energy source.

KEYWORDS: Green hydrogen, electrolysis, photovoltaics, environmental sustainability, electrolyzer technology.

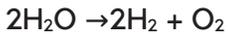
INTRODUCCIÓN

El elemento predominante en la Tierra es el hidrógeno y aún no se utiliza como combustible primario, debido a que no se encuentra de manera aislada, sino que siempre está enlazado a otros elementos, concretamente en los hidrocarburos y al agua. Sin embargo, la ventaja de producir hidrógeno a partir de una variedad de fuentes de energía es que se puede hacer de diversas maneras [1], incluyendo

el cambio de agua-gas [2], la electrólisis del agua [3], el reformado con vapor a través de gas natural, división termoquímica del agua, reformado con vapor, gasificación de carbón, gasificación de biomasa, entre otros [4].

Actualmente, el 95% de la producción mundial de hidrógeno se cubre mediante el proceso de reformado con vapor de gas natural, debido a que es el método más rentable para generar hidrógeno. Sin embargo, por cada kilogramo de hidrógeno molecular (H₂) generado con este método, se liberan 10 kg de CO₂ [5].

Hoy en día el hidrógeno es el elemento más abundante en la tierra y su capacidad energética es tres veces mayor que la de los hidrocarburos; el hidrógeno puede generar aproximadamente 39.4 kWh/Kg durante su combustión [6]; tiene la gran ventaja de liberar sólo agua en el proceso de combustión [7] y puede aplicarse en la mayoría de las actividades en donde se utiliza combustibles fósiles [8]. Una de los métodos para generar hidrógeno molecular es mediante el proceso de electrólisis, el cual, consiste en hacer pasar electricidad a través de dos electrodos en agua. La molécula de agua se divide y produce gas oxígeno en el ánodo y gas hidrógeno en el cátodo mediante la siguiente reacción:



En este sentido, el hidrógeno es el energético más eficiente y abundante que se podría obtener, pero la forma electrolítica necesita energía eléctrica y una forma de obtenerla de manera eficiente es a través de la energía solar fotovoltaica, resultado una alternativa económica y amigable con el medio ambiente. La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotoeléctrico. Se trata de un tipo de energía renovable, inagotable y no contaminante [9]. Al menos en 2020 el precio de generación de energía solar fotovoltaica paso de 0.061 USD/kWh a 0.057 USD/kWh [10], por lo tanto, producir hidrógeno verde utilizando energía solar apunta a ser una de las mejores opciones para esta transición energética.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El hidrógeno se fabrica generalmente mediante el reformado con vapor de gas natural o nafta, o mediante la oxidación parcial de hidrocarburos más pesados. Sólo una pequeña proporción se obtiene mediante electrólisis.

Existen diferentes maneras de obtener hidrógeno tales como el aprovechamiento de desechos orgánicos, que en estudios anteriores demuestran que el uso de diferentes materias primas como desechos de alimentos, partes de plantas y algas permitiría altos volúmenes de producción de hidrógeno. Por ejemplo, un estudio utilizó gasificación de agua supercrítica para generar gas de síntesis rico en hidrógeno a partir de una mezcla de

desechos de alimentos (arroz, pollo, repollo y aceite de cocina) (ver Figura 1).

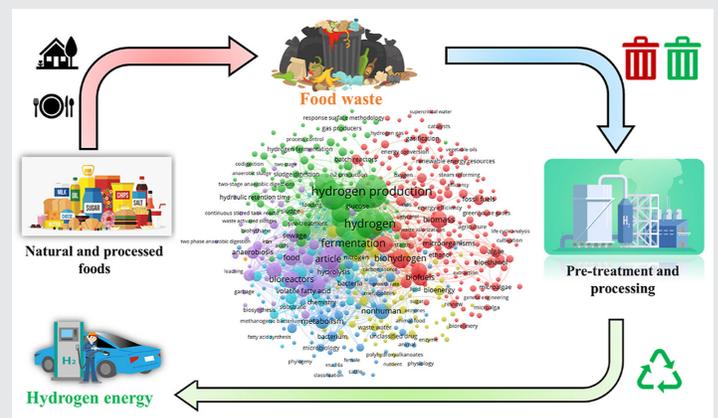


Figura 1. Generación de H₂ a partir de basura orgánica.

Fuente: A. Sridhar, et al. 2022.

Los experimentos discontinuos mostraron un alto rendimiento de hidrógeno de 20.37 mol/kg con una mejora del 32.21 % después de la adición del catalizador (KOH). Se compararon investigaciones similares utilizando procesos de fermentación de una y dos etapas para desechos de alimentos (arroz, verduras, carbohidratos y carne), donde los estudios mostraron una recuperación del 18% de energía mayor en dos etapas en comparación con una etapa con un rendimiento de hidrógeno de 55 ml/g. Esta energía posiblemente podría ser un recurso útil para generar calor y electricidad en automóviles, hogares y áreas comerciales [11].

También, se puede obtener hidrógeno con energía eólica y solar (ver Figura 2) [12]. Un proceso de electrólisis del agua impulsado por una fuente renovable como la energía eólica o solar puede producir cantidades notables de hidrógeno sin ninguna emisión. El hidrógeno producido mediante este método puede ser un excelente combustible alternativo, contribuyendo a los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y reducir la dependencia de los combustibles fósiles [13].

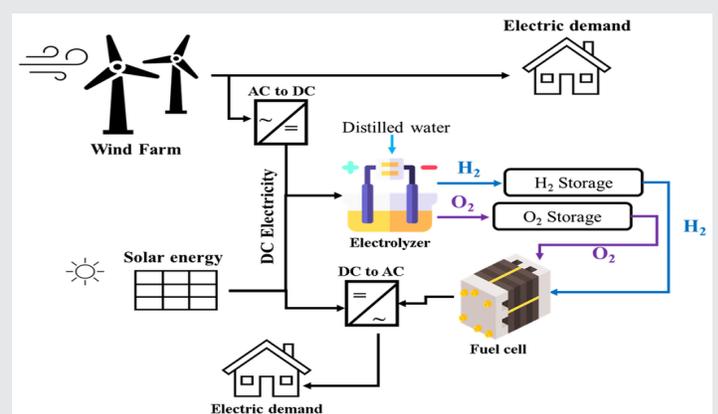


Figura 2. Generación de H₂ a partir de energía eólica y solar.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

La electrólisis de agua alcalina es uno de los métodos más sencillos para la producción de hidrógeno y ofrece la ventaja de la simplicidad (ver Figura 3). Los desafíos para el uso generalizado de la electrólisis del agua son reducir el consumo de energía, el costo y el mantenimiento y aumentar la confiabilidad, durabilidad y seguridad [14].

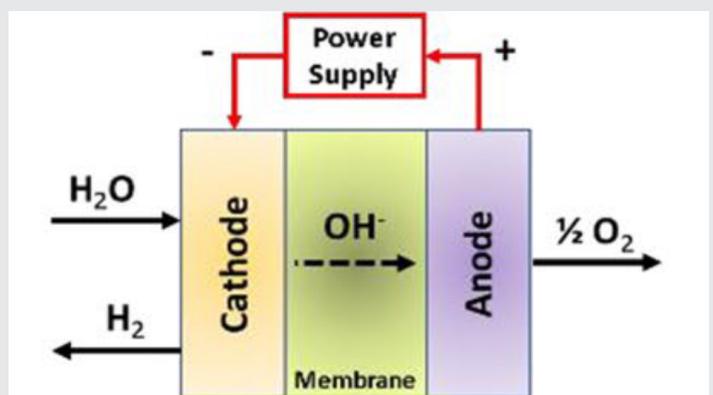


Figura 3. Generación de H₂ a partir de electrólisis alcalina con membrana.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

Los electrolizadores son reactores electroquímicos que utilizan la electricidad para “dividir” el agua en oxígeno (O₂) e hidrógeno (H₂), un combustible químico almacenable de gran densidad energética que resulta útil para una amplia gama de aplicaciones industriales y de consumo. Actualmente, el mayor costo de la electrólisis del agua es el gasto operativo asociado con la electricidad que se utiliza para impulsar esta reacción cuesta arriba.

MATERIAL Y MÉTODOS

Actualmente, el método más económico para producir hidrógeno es mediante la reforma de gas natural con vapor, aunque este proceso genera emisiones de CO₂ muy altas, contribuyendo significativamente a la huella de carbono. Este trabajo sugiere y examina la posibilidad de un enfoque alternativo que aproveche la energía solar fotovoltaica para la electrólisis del agua, buscando así reducir el impacto ambiental derivado de la fabricación de hidrógeno.

La energía solar fotovoltaica, al ser una fuente limpia y renovable, se estudia aquí como la energía primaria para obtener hidrógeno a través de la electrólisis del agua.

Se investigan desde una perspectiva teórica, tres tecnologías de electrolizadores:

- Membrana intercambiadora de protones (PEM).
- Diafragma en medios alcalinos.
- Sin diafragma en medio ácidos o alcalinos.

De cada una de los electrolizadores se describe su funcionamiento, ventajas y desventajas de implementación técnica y operacional que conlleva a un marco de producción energética limpia y sostenible.

RESULTADOS

Los estudios existentes sugieren que la transformación de radiación luminosa en moléculas de hidrógeno mediante este proceso sería comparable en rendimiento a procesos convencionales. Bajo circunstancias ideales, se precisan cantidades entre 55 y 60 kWh para generar un kilogramo de hidrógeno molecular, cifra acorde con las previsiones de eficiencia energética para sistemas electroquímicos mejorados [15]. Actualmente, dos tecnologías de electrolizadores de baja temperatura dominan el mercado: los electrolizadores PEM y los electrolizadores alcalinos.

Los electrolizadores PEM comerciales se basan en un diseño de conjunto de electrodos de membrana (MEA) de “espacio cero” en el que electrolitos de polímeros sólidos conductores de protones ver Figura 4, como Nafion, se intercalan entre capas de electrodos porosos. Esta arquitectura permite altas densidades de corriente operativa (0,6-2 A cm⁻²) al mismo tiempo que produce H₂ de alta pureza a partir de agua desionizada.

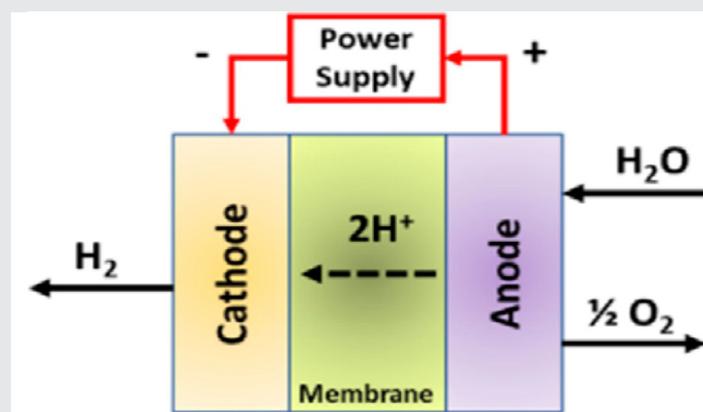


Figura 4. Generación de H₂ a partir de electrólisis PEM.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

Los electrolizadores alcalinos convencionales dividen el agua a 0,1-0,4 A cm⁻² en un electrolito líquido de 25-35 % en peso de KOH, mientras utilizan un divisor micro poroso conocido como diafragma para separar los dos electrodos ver Figura 5.

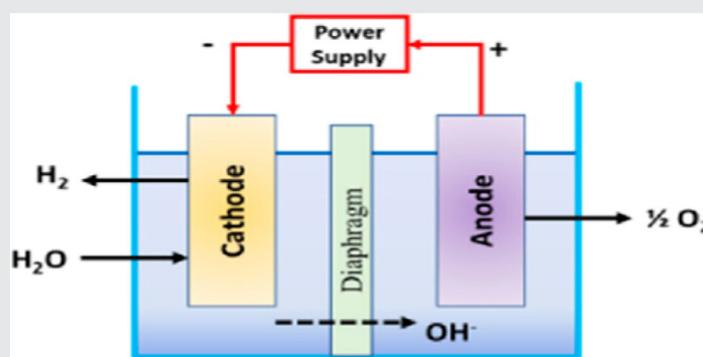


Figura 5. Generación de H₂ a partir de electrólisis alcalina con diafragma.

Fuente: M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, 2022.

En ambos tipos de electrolizadores, la membrana y el diafragma permiten el transporte de iones entre los electrodos y al mismo tiempo realizan la importante tarea de separar físicamente las especies de productos moleculares de H_2 y O_2 que de otro modo podrían formar una mezcla explosiva [12].

A pesar de sus funciones vitales en el funcionamiento del electrolizador PEM, la membrana trae consigo desventajas, incluida la necesidad de una arquitectura MEA bastante compleja y el riesgo de falla del dispositivo debido a la contaminación o degradación de la membrana en presencia de impurezas. Además de afectar directamente la vida útil del dispositivo y/o los costos de mantenimiento, la cuestión de la durabilidad de la membrana también afecta los costos de capital de los sistemas electrolizadores al imponer requisitos estrictos sobre la pureza del agua y los materiales utilizados dentro del sistema electrolizador. Debido a esta problemática varios componentes del electrolizador PEM suelen estar hechos de titanio costoso, pero resistente a la corrosión.

Por otro lado, los diafragmas utilizados en los electrolizadores alcalinos tienden a ser menos costosos que las membranas de electrolitos poliméricos y se utilizan en una estructura de dispositivo más simple que los electrolizadores PEM, pero también son susceptibles al bloqueo por impurezas y la alta resistencia óhmica asociada con estos divisores y las burbujas, los espacios llenos de líquido entre los electrodos normalmente limitan las densidades de corriente operativa por debajo de $0,4 \text{ A cm}^{-2}$.

Los electrolizadores sin membrana tienen varias ventajas potenciales sobre los dispositivos convencionales [16]. Primero, eliminar la membrana crea la oportunidad de disminuir los costos de capital al reducir la complejidad del dispositivo, los costos de materiales y los costos de ensamblaje. Varias de las celdas electrolizadoras sin membrana se fabrican con tan solo tres componentes esenciales: el ánodo, el cátodo y el cuerpo del dispositivo (ver Figura 6). Esto contrasta marcadamente con una sola celda PEM que contiene no solo una membrana y catalizadores de ánodo/cátodo, sino también capas de difusión de gas, placas bipolares, juntas, ionómero, colectores de corriente y más. Los componentes más costosos de una pila PEM típica [17].

Una segunda ventaja de los electrolizadores sin membrana es su potencial para ser dispositivos con una larga vida útil, alta tolerancia a las impurezas y mayor resistencia a condiciones operativas extremas que dañarían una membrana. Una tercera ventaja potencial de los electrolizadores sin membrana es su capacidad para funcionar en una amplia variedad de electrolitos acuosos, siempre que el electrolito sea suficientemente conductor. Esta versatilidad es posible al hecho de que la conducción iónica a través del espacio del electrolito

líquido entre los electrodos es relativamente insensible al pH del electrolito y a los tipos de iones presentes. Si bien las membranas selectivas de iones en los electrolizadores PEM limitan en gran medida el tipo de electrolito que se puede usar en un dispositivo determinado, se han demostrado electrolizadores sin membrana en soluciones ácidas, alcalinas y neutras [16].

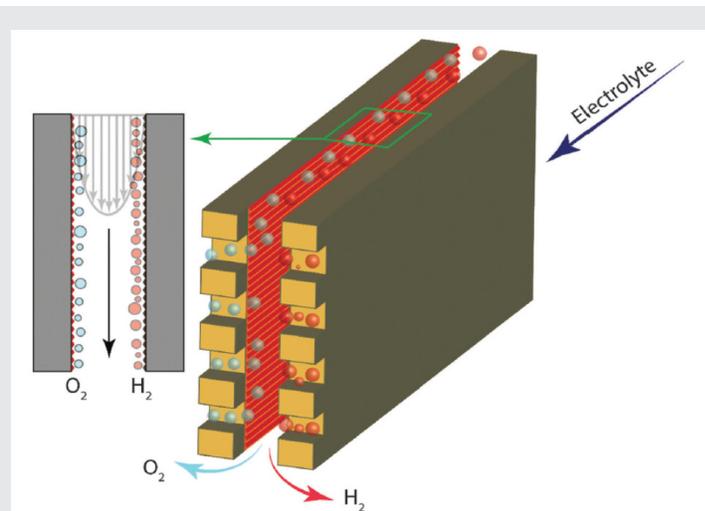


Figura 6. Generación de H_2 a partir de electrólisis alcalina o ácida sin membrana.

Fuente: S. M. H. Hashemi, M. A. Modestino y D. Psaltis, 2015.

A pesar de sus ventajas, los electrolizadores sin membrana también presentan una serie de desafíos. Una desventaja de los electrolizadores sin membrana en comparación con los electrolizadores PEM es una menor eficiencia de voltaje a altas densidades de corriente operativa ($\approx 0,5 \text{ A cm}^{-2}$ o más) debido a mayores pérdidas de IR en solución. Aunque los electrolitos concentrados de H_2SO_4 y KOH tienen una conductividad más alta que las membranas selectivas de iones, la distancia que deben recorrer los iones en muchos electrolizadores sin membrana demostrados hasta la fecha (típicamente milímetros) es mucho más larga que el espesor de una membrana de Nafion en un electrolizador PEM ($\approx 100\text{--}200 \mu\text{m}$) [18].

CONCLUSIONES

En resumen, la energía solar fotovoltaica representa una de las alternativas más alentadoras para la producción de hidrógeno verde, posicionándose como un actor clave en el avance hacia un paradigma energético más limpio y sostenible.

Este cambio hacia la electrólisis impulsada por energía luminosa permitiría una reducción estimada del 90 % en las emisiones de dióxido de carbono en contraste con el procedimiento tradicional de reformado de gas natural, respaldando así los objetivos globales de desarrollo sustentable.

Desde una óptica económica, el análisis señala que la fabricación de hidrógeno mediante fuentes renovables

se está volviendo viable financieramente debido al descenso en los costos de la tecnología fotovoltaica. Con el precio de la generación de electricidad solar bajando de entre 6 y 10 centavos de dólar estadounidense versus entre 5 y 7 centavos por kilowatt-hora, se proyecta que la diferencia en los gastos entre hidrógeno verde y métodos convencionales podría igualarse en la próxima década. A nivel ambiental, este enfoque promueve una menor dependencia de los combustibles fósiles y contribuye significativamente a la reducción de los gases de efecto invernadero, delineando un sendero hacia la mitigación del cambio climático y el cumplimiento de las Metas de Desarrollo Sostenible relacionadas con energía asequible y limpia y la acción ante el calentamiento global.

Una preocupación importante con los electrolizadores de membrana es la susceptibilidad de las membranas a experimentar una mayor resistencia óhmica cuando se exponen a impurezas catiónicas que pueden introducirse a través de la corriente de alimentación de agua o lixiviarse de los componentes dentro del propio sistema [19].

Por otro lado, la tecnología de los electrolizadores, desprovistos de membrana representan una prometedora vía para disminuir costos y aumentar la durabilidad. A pesar de que los electrolizadores de membrana de intercambio protónico y alcalinos siguen siendo predominantes, los dispositivos carentes de membrana demuestran mayor tolerancia a las impurezas y condiciones operativas rigurosas, minimizando así el riesgo de averías y la frecuencia de mantenimiento. En este sentido, la eficiencia energética de estos sistemas a altas densidades de corriente aún constituye desafíos en investigación y desarrollo, desde la academia y las empresas tecnológicas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. E. Lebrouhi, J. J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdelaziz y T. Kousksou, «Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 11, pp. 7016-7048, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.076>.
- [2] W. Liu, H. Zuo, J. Wang, Q. Xue, B. Ren y F. Yang, «The production and application of hydrogen in steel industry» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, n° 17, pp. 10548-10569, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.123>.
- [3] F. Posso, J. Sánchez, J. L. Espinoza y J. Si-guencia, «Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 4, pp. 2326-2344, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.155>.
- [4] M. Ni, M. K. H. Leung, K. Sumathy y D. Y. C. Leung, «Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 31, n° 10, pp. 1401-1412, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.005>.
- [5] K. Sareen, B. K. Panigrahi, T. Shikhola y R. Nagdeve, «Deep learning solar forecasting for green hydrogen production in India: A case study» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 50 part B, n° 2, pp. 334-351, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.323>.
- [6] U. P. M. Ashik, W. M. A. Wan Daud y H. F. Abbas, «Production of greenhouse gas free hydrogen by thermocatalytic decomposition of methane - A review» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 221-256, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.025>.
- [7] S. Sharma y S. K. Ghoshal, «Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1151-1158, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>.
- [8] B. Mohamed, B. Ali, M. Ahmed, B. Ahmed, L. Salah y D. Rachid, «Study of hydrogen production by solar energy as tool of storing and utilization renewable energy for the desert areas» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, n° 45, pp. 20788-20806, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.034>.
- [9] Iberdrola, «Funcionamiento energía solar fotovoltaica» Iberdrola, 2024. [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-energia-fotovoltaica>. [Último acceso: 11 05 2024].
- [10] IRENA, «International Renewable Energy Agency» 2020. [En línea]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020_Summary_ES.pdf?rev=ac2dc583c470469d88ba64f5b014ff5f. [Último acceso: 12 05 2024].
- [11] A. Sridhar, M. Ponnuchami, P. S. Kumar, A. Kapoor y L. Xiao, «Progress in the production of hydrogen energy from food waste: A bibliometric analysis» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 62, pp. 26326-26354, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.258>.
- [12] M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara y H. Hassan, «A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems» *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, p. 86994-87018, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>.

[13] K. Almutairi, S. S. Hosseini Dehshiri, S. J. Hosseini Dehshiri, A. Mostafaeipour y H. Techato, «An economic investigation of the wind-hydrogen projects: A case study» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 62, pp. 25880-25898, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.070>.

[14] K. Zeng y D. Zhang, «Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, n° 3, pp. 307-326, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.

[15] F. Troncoso, «Claves del hidrógeno verde» *InduAmbiente* 171, pp. 28-31, 2021. <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/calderas/claves-del-hidrogeno-verde> (Último acceso: 12 05 2024).

[16] S. M. H. Hashemi, M. A. Modestino y D. Psaltis, «A membrane-less electrolyzer for hydrogen production across the pH scale» *Energy & Environmental Science*, vol. 8, pp. 2003-2009, 2015.

[17] X. Wang, L. Zhang, G. Li, G. Zhang, Z.-G. Shao y B. Yi, «The influence of Ferric ion contamination on the solid polymer electrolyte water electrolysis performance» *Electrochimica Acta*, vol. 158, pp. 253-257, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.01.140>.

[18] C. Xiang, K. M. Papadantonakis y N. S. Lewis, «Principles and implementations of electrolysis systems for water splitting» *Materials Horizons*, vol. 3, pp. 169-173, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6MH00016A>.

[19] D. V. Esposito, «Membraneless electrolyzers for low-cost hydrogen production in a renewable energy future» *Joule*, vol. 1, pp. 651-658, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.003>.



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Metodología para el desarrollo de proyectos eléctricos enfocada a unidades habitacionales en México



Colaboración

Pedro Aguilar Canseco, FIMCN Universidad Veracruzana; Juan Antonio Pinilla Rodríguez, Universidad Cristóbal Colón; Francisco Ortiz Martínez; Josué Domínguez Márquez; Adrián Vidal Santo, FIMCN Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 22 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: La disparidad en el sector de instalaciones eléctricas en México destaca la necesidad de una metodología para promover la formalización de empresas y así obtengan beneficios en la construcción. Adoptar una metodología formal no solo garantizaría prácticas seguras y de alta calidad, reduciendo riesgos y mejorando la seguridad, sino que también establecería un marco claro para las operaciones, optimizando la eficiencia, reduciendo costos y aumentando la productividad. Este trabajo presenta una metodología para decisiones estratégicas en proyectos eléctricos para desarrollos habitacionales en México, abordando licitación, demanda de tensión en kVA, costos, fianzas y desafíos en gestiones CFE. Se analiza lo que es una licitación, incluyendo requisitos técnicos y económicos para asegurar transparencia y eficiencia. Se destaca la importancia de calcular correctamente la demanda de tensión y se proporcionan herramientas para ello. Se examina la estructura de costos, abordando materiales, mano de obra, maquinaria y equipos, así como la importancia de las fianzas para asegurar el cumplimiento legal. Se discuten desafíos en gestiones CFE, como normas obsoletas y la informalidad en proyectos. Se resalta la importancia de la tierra física y la capacitación del personal. Finalmente, se detalla el proceso de entrega del proyecto a CFE para garantizar su operatividad.

PALABRAS CLAVE: NOM's, licitación, demanda de tensión, costos y fianzas, CFE, tierra física, capacitación del personal.

ABSTRACT: The disparity in the electrical installations sector in Mexico highlights the need for a methodology for informal companies to benefit in construction. Adopting a formal methodology would not only ensure safe and high-quality practices, reducing risks and improving security, but also establish a clear framework for operations, optimizing efficiency, cutting costs, and increasing productivity. This paper presents a methodology for strategic decisions in electrical projects for residential developments in Mexico, addressing bidding, voltage demand in kVA, costs, bonds, and challenges in CFE management. It analyzes what a bid involves, including technical and economic requirements to ensure transparency and efficiency. The importance of exactly calculating voltage demand is emphasized, and tools for this purpose are provided. The cost structure is examined, covering materials, labor, machinery, and equipment, as well as the importance of bonds to ensure legal compliance. Challenges in CFE management, such as obsolete regulations and informality in projects, are discussed. The importance of physical grounding and staff training is highlighted. Finally, the process of delivering the project to CFE to ensure its operability is detailed.

KEYWORDS: NOM's, bidding, voltage demand, costs, and bonds, CFE, physical grounding, staff training.

INTRODUCCIÓN

La disparidad en el sector de instalaciones eléctricas en México, donde el 18% de los servicios son realizados por empresas informales, destaca la necesidad de una metodología que estas empresas puedan adoptar para obtener beneficios significativos, especialmente en el ámbito de la construcción [1]. En primer lugar, una metodología formal no solo garantizaría prácticas seguras y de alta calidad, reduciendo los riesgos eléctricos y mejorando la seguridad. En territorio mexicano, aproximadamente 560 personas fallecen anualmente debido a electrocución, siendo el 31.4% de estos incidentes en el ámbito doméstico, y más del 80% de las residencias carecen de sistemas eléctricos seguros. [2]. Además, esto proporcionaría un marco claro y consistente para las operaciones. Al estandarizar los procesos, las empresas informales podrían optimizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la productividad. Esta estandarización no solo implica beneficios operativos, sino que también juega un papel crucial en la transición de las empresas informales hacia la formalidad. Tal transición beneficia a las empresas en términos de estabilidad y acceso a oportunidades, contribuyendo al fortalecimiento general de la economía.

En el contexto del crecimiento en la construcción de desarrollos habitacionales en México, donde la demanda de proyectos eléctricos confiables y eficientes es alta, la metodología durante el desarrollo de estos proyectos es crucial para asegurar su éxito. Se reconoce que, si bien existen normas establecidas para la licitación, demanda de tensión en kVA, costos, fianzas y desafíos en gestiones CFE, la determinación de qué norma seguir puede ser compleja. Por lo tanto, se considera necesario contar con una guía que especifique qué normas son requeridas en el desarrollo de proyectos eléctricos enfocados a unidades habitacionales en México.

La metodología presentada en el artículo se posiciona como una guía integral, abordando diversos aspectos para implementar proyectos eléctricos destinados a desarrollos habitacionales en México. Esta metodología no solo proporciona una estructura sólida, sino que también contribuye al fortalecimiento de la confianza del cliente en instalaciones eléctricas, estimulando una competencia leal y sostenible en el sector. Es decir, la implementación de esta metodología no solo aborda las necesidades específicas de las empresas informales, sino que también se convierte en un factor clave para el desarrollo exitoso y sostenible del sector eléctrico en el contexto habitacional mexicano.

MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva del estado del arte en el ámbito de la contratación de empresas eléctricas, centrándose en los procedimientos de licitación pública y los criterios técnicos, económicos y legales necesarios para su implementación eficaz.

Se analizaron y compararon los diferentes esquemas de licitación utilizados en México, así como las mejores prácticas para garantizar transparencia y eficiencia en el proceso. Además, se realizó un estudio detallado sobre la determinación de la demanda de tensión en proyectos eléctricos, siguiendo los lineamientos establecidos por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se examinaron también los aspectos relacionados con la estructura de costos, el papel de las fianzas en el ámbito legal y los desafíos en la confiabilidad de los procesos y gestiones de la CFE. Todo ello se enmarcó en una revisión exhaustiva del estado actual de la investigación en el campo, con el objetivo de proporcionar una base sólida para el desarrollo y la implementación de proyectos eléctricos eficientes y confiables. Para cumplir con esta metodología, es imprescindible seguir todas las normas y reglamentos pertinentes en materia de contratación de empresas eléctricas, incluyendo los procedimientos de licitación pública y los criterios técnicos, económicos y legales necesarios para su implementación eficaz. Esto garantizará la transparencia, eficiencia y confiabilidad en el proceso de desarrollo e implementación de proyectos eléctricos en México.

RESULTADOS

Los resultados cubrirán tres temas principales: el proceso de licitación pública para contratar empresas eléctricas, la importancia de calcular correctamente la demanda de tensión en proyectos eléctricos y los costos y fianzas asociados con dichos proyectos, junto con los desafíos en la gestión de la CFE.

Licitación

En la licitación se deben describir el proceso del tipo pública para la contratación de empresas eléctricas, incluyendo los requisitos legales, los esquemas de licitación más utilizados y las mejores prácticas para garantizar un proceso transparente y eficiente. Se detallan los pasos a seguir para la elaboración de las bases requeridas, la evaluación de las propuestas y la adjudicación del contrato.

Requisitos

En la requisición se puntualizan los requisitos técnicos, económicos y legales que deben cumplir las empresas participantes en una licitación pública, con especial énfasis en la experiencia previa, la solvencia económica y la capacidad técnica. Se establecen los requisitos mínimos de experiencia en proyectos similares, la capacidad financiera para afrontar el proyecto y la disponibilidad de personal calificado y maquinaria especializada.

Esquemas de licitación

El proceso general que seguir en una licitación pública se presenta detalladamente en la Fig. 1. Este diagrama de flujo proporciona una representación esquemática y paso a paso, desde la fase inicial de selección de la licitación hasta la crucial etapa de adjudicación del contrato. Es fundamental que las empresas especializadas

en instalaciones eléctricas comprendan este proceso en su totalidad, ya que les permite participar de manera constante en diversas licitaciones relacionadas con este sector. Es importante destacar que las licitaciones públicas utilizadas en México presentan una diversidad de esquemas, entre los que se incluyen por precio alzado, por unidad de obra y por concurso-subasta. Cada uno de estos esquemas tienen sus propias características, ventajas y desafíos, por lo que es esencial que las empresas estén familiarizadas con ellos para adaptarse eficazmente a las distintas dinámicas de cada proceso licitatorio.

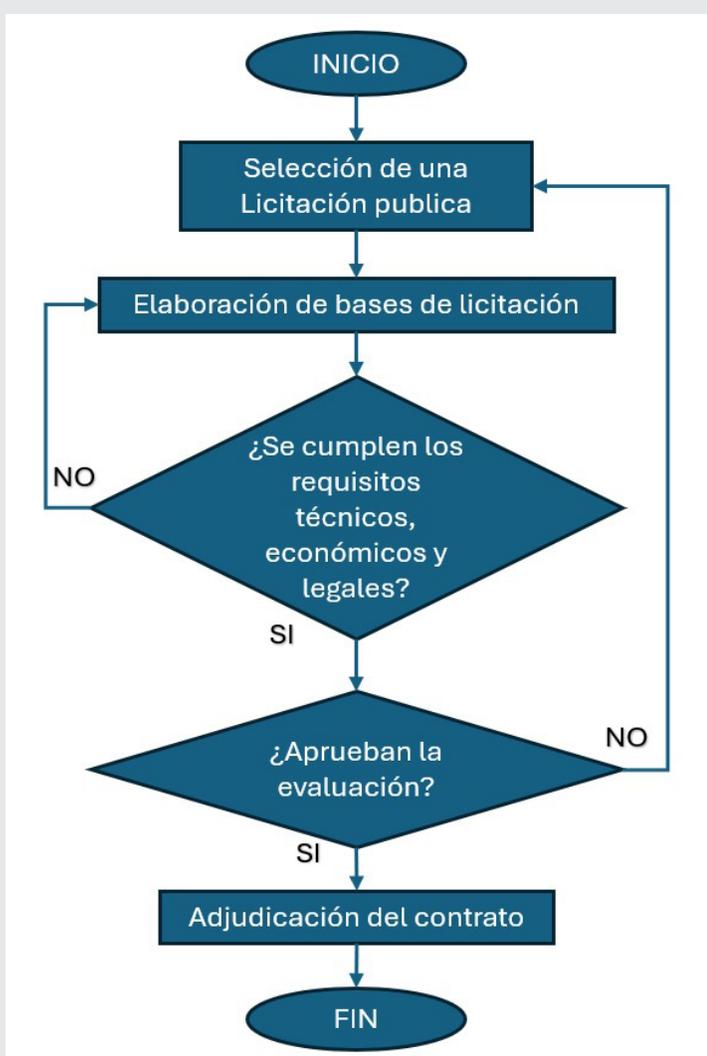


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de licitación.

Fuente: Elaboración propia

Demanda de tensión en kVA

Se analiza la importancia de determinar correctamente la demanda de tensión en un proyecto eléctrico, considerando la cantidad de viviendas, la potencia de los equipos y las características del sistema eléctrico. Se proporcionan fórmulas y herramientas para calcular la demanda de tensión en diferentes tipos de desarrollos habitacionales.

La potencia en kVA se calcula conforme a los criterios establecidos por la Comisión Federal de Electricidad

(CFE). Esta entidad pública establece normativas a través de un manual denominado “Bases de diseño únicas para los proyectos y construcción de obras eléctricas que serán recibidas en CFE”. Específicamente, la CFE publica la tabla 1, la cual detalla las zonas de regiones con clima cálido. En dicha tabla, se presenta la densidad de carga (kVA) en relación con la superficie, el tipo de vivienda y las distintas zonas.

Tabla 1 Zonas de región con clima Cálido.

Zonas	Tipo de Vivienda	Superficie (m ²)	Densidad de carga (kVA)
Poza Rica Veracruz	Social Bajo	55 a 65	1.30
	Social Medio	66 a 80	2.00
	Social Alto	81 a 100	2.50
Papaloapan Los Tuxtlas Coatzacoalcos	Residencial Medio	101 a 200	3.50
	Residencial Alto	Mayor a 200	10.00

Fuente: CFE (2023)

Costos y fianzas

Costos

Se examina detalladamente la estructura de costos de un proyecto eléctrico, abordando aspectos como los costos asociados a materiales, mano de obra, maquinaria y equipos. Se proporciona un desglose exhaustivo de los costos habituales en proyectos eléctricos residenciales, que abarcan desde los materiales de construcción hasta los equipos eléctricos, incluyendo también los gastos relacionados con la mano de obra e ingeniería.

Fianzas

Según la referencia [4] las fianzas son un elemento fundamental en el ámbito legal, sirviendo como garantía para asegurar el cumplimiento de obligaciones. En el contexto de los contratos de fianza, el fiador se compromete a cumplir una prestación si el deudor principal no cumple con su obligación, lo que lo convierte en un contrato accesorio dentro de los contratos de garantía. En el ámbito civil mexicano, las fianzas están estrechamente ligadas a los contratos de arrendamiento, donde son comunes para garantizar el cumplimiento de las obligaciones del arrendatario. Este tipo de fianzas proporcionan seguridad tanto al arrendador como al arrendatario, ofreciendo una capa adicional de protección en caso de incumplimiento contractual. Por otro lado, en el ámbito mercantil, las fianzas mercantiles son emitidas por compañías autorizadas y se rigen por pólizas que detallan claramente el alcance de la garantía ofrecida. Estas fianzas son esenciales para respaldar transacciones comerciales importantes, ofreciendo seguridad y confianza a las partes involucradas en la negociación. Un aspecto relevante para considerar es la interpretación legal respecto a la demanda a una afianzadora. Según resoluciones judiciales, es necesario demostrar la conclusión de un procedimiento firme contra el deudor principal antes de proceder con una demanda a la

afianzadora. Esta interpretación puede tener un impacto significativo en la práctica de las fianzas, ya que las compañías podrían optar por no cumplir sus obligaciones hasta que se cumpla lo establecido por la corte.

En la industria de la construcción, es común solicitar una fianza para garantizar el cumplimiento de un contrato. Esta fianza puede requerir un anticipo del 30%, un pago inicial que asegura el compromiso de ambas partes. Sin embargo, es crucial especificar claramente los términos y condiciones para evitar posibles incumplimientos. En el contexto de las propiedades, las afianzadoras desempeñan un papel esencial al respaldar financieramente el acuerdo. El monto de la fianza se calcula a menudo como 1.5 a 2 veces el valor de las propiedades involucradas, proporcionando una capa adicional de seguridad. Además, es vital abordar posibles problemas como los vicios ocultos, defectos no evidentes que podrían surgir después de la transacción. Una cláusula del 10% podría destinarse a cubrir estos posibles inconvenientes, brindando protección adicional.

Por último, aunque relacionado pero diferente, el seguro se convierte en un elemento esencial para cubrir daños causados durante la ejecución del contrato. Este seguro proporciona tranquilidad en caso de que surjan imprevistos, como roturas o daños, y debe ser considerado aparte de la fianza.

Retos en la confiabilidad de los procesos y gestiones CFE

La obsolescencia de las normas eléctricas puede generar riesgos de seguridad y afectar la eficiencia energética de las instalaciones. Ejemplo: La norma NOM-001-SEDE-2012, norma oficial mexicana que establece los requisitos de seguridad para las instalaciones eléctricas, no se ha actualizado desde 2018, lo que la hace susceptible a no cubrir las necesidades de las nuevas tecnologías y tendencias en el sector eléctrico.

Dimensionamiento e instalación de la tierra física

El dimensionamiento e instalación de la tierra física representa un elemento crucial en la implementación segura y eficiente de sistemas eléctricos. En este contexto, la tierra física se define como la conexión de los equipos y componentes eléctricos a la tierra, estableciendo un camino de baja resistencia para la corriente eléctrica en casos de fallos o sobrecargas. En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-022-STPS-2015 se erige como la referencia fundamental para la protección y seguridad de los trabajadores involucrados en actividades relacionadas con sistemas eléctricos. Dicha norma aborda diversos aspectos cruciales para la correcta implementación de sistemas de tierras físicas.

En primer lugar, se establecen condiciones de seguridad para la electricidad estática en los centros de trabajo. Además, la norma proporciona definiciones clave, como la carga eléctrica estática, la cual se manifiesta

mediante la pérdida o ganancia de electrones en materiales aislantes o conductores aislados de tierra. Asimismo, se ofrecen reglas específicas para la instalación y mantenimiento de sistemas de puesta a tierra.

En lo referente a la instalación y verificación, la norma establece criterios precisos para la instalación de conductores de puesta a tierra. Se pone un énfasis especial en verificar la conexión adecuada entre el neutro y la tierra física en los sistemas eléctricos. En este sentido, la medición entre ambos debe ser menor a 2 voltios para asegurar una tierra física adecuada. Este enfoque exacto en la instalación y verificación garantiza un cumplimiento efectivo de los estándares de seguridad establecidos por la normativa vigente. Para entender el comportamiento eléctrico del sistema de puesta de tierra, se recomienda leer la siguiente fuente de información [5].

Capacitación del personal

La capacitación deficiente del personal puede afectar negativamente la calidad de las instalaciones y la seguridad de los trabajadores. Esta falta de conocimiento técnico sobre las normas eléctricas y las mejores prácticas de instalación puede traducirse en errores que afecten el funcionamiento y la vida útil de las instalaciones. Para capacitar al personal en instalaciones eléctricas existen diversos tipos de diplomados y cursos brindados por el Colegio de Ingenieros Mecánicos Electricistas ramas afines del estado de Veracruz (CI-MEVER). Algunos de ellos son: Subestaciones eléctricas, Sistemas de protección contra tormentas eléctricas, Marco jurídico de los peritos en instalaciones eléctricas, etc.

La metodología propuesta se basa en un enfoque integral que considera los aspectos técnicos, económicos, legales y sociales del desarrollo de proyectos eléctricos. Su aplicación permitirá a los desarrolladores inmobiliarios, empresas constructoras y entidades gubernamentales tomar decisiones informadas y estratégicas que optimicen la calidad, la confiabilidad y la rentabilidad de sus proyectos.

Entrega de proyecto a CFE

El proceso de entrega de una obra implica varios pasos clave para asegurar su finalización y operatividad. Primero, tras la finalización de la obra, se prepara una carpeta que incluye la terminación de la obra, un documento que certifica su finalización, junto con detalles sobre materiales, facturas, proyectos autorizados y documentos legales. Esta carpeta se presenta al departamento de planeación, donde se asigna un supervisor para revisar la distribución y medición de la obra. El supervisor genera dos carpetas separadas, una para el jefe de distribución y otra para el jefe de medición, las cuales se someten a autorización o firma. Una vez que ambas carpetas están firmadas y en orden, se genera un acta de entrega. Este acta es firmada por los jefes de CFE y el representante legal del proyecto. Luego, el

representante legal firma cuatro copias del acta y las presenta a la comisión, donde todas las partes involucradas vuelven a firmar las cuatro copias. Una vez devuelto el acta firmada, se emite un oficio de liberación de obra, lo que permite proceder con el contrato de energía eléctrica. Además, para el aviso de término de obra, se necesita la documentación requerida, que incluye diversos documentos como informes, contratos, planos y copias de documentos legales, asegurando así una entrega ordenada y documentada de la obra. Para una mayor información del proceso, se recomienda revisar el sitio web [6].

Esquema de guía de eventos

La Figura 2 proporciona una “Guía de eventos” para un proyecto de construcción, detallando los pasos críticos en su ejecución. Se inicia con la planeación de obra, que implica la definición de tareas, asignación de recursos y establecimiento de plazos. Luego, se establecen fechas clave para la ejecución del proyecto. Es crucial realizar una visita al sitio de construcción para evaluar condiciones y tomar decisiones informadas. En la junta de aclaraciones se resuelven dudas relacionadas con el proyecto. Los contratistas presentan propuestas detalladas, incluyendo costos y cronograma. Posteriormente, se adjudica el proyecto tras evaluar las propuestas. Se detallan precios unitarios para componentes como materiales y mano de obra. Este proceso garantiza una planificación precisa y una ejecución eficiente del proyecto.



Figura 2. Esquema de guía de eventos
Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La formalización de los procesos en el sector de instalaciones eléctricas en México emerge como una necesidad fundamental. No solo garantiza prácticas seguras y de alta calidad, sino que también desempeña un papel crucial en la reducción de riesgos eléctricos y mejora de la seguridad en general. Esta formalización proporcionaría a las empresas informales un marco claro y consistente para sus operaciones, lo que les permitiría optimizar la eficiencia, reducir costos y mejorar la productividad. Además, facilitaría su transición hacia la formalidad, ofrecien-

do estabilidad y acceso a oportunidades que contribuyen al fortalecimiento general de la economía.

Por otro lado, la metodología presentada en el artículo se posiciona como una guía integral para el desarrollo de proyectos eléctricos en desarrollos habitacionales en México. Más allá de proporcionar una estructura sólida para la implementación de estos proyectos, esta metodología también desempeña un papel crucial en el fortalecimiento de la confianza del cliente en las instalaciones eléctricas. Al estimular una competencia justa y sostenible en el sector, contribuye al desarrollo exitoso y sostenible del mismo.

No obstante, no adoptar esta metodología propuesta conlleva consecuencias significativas. La falta de un enfoque formal puede resultar en prácticas inseguras y de calidad variable, aumentando los riesgos eléctricos y comprometiendo la seguridad tanto para los trabajadores como para los usuarios finales. Además, la ausencia de una guía clara puede dificultar la eficiencia operativa y generar costos adicionales debido a errores y retrabajos. Esto podría llevar a una pérdida de confianza por parte de los clientes y a una menor competitividad en el mercado, lo que a su vez podría impactar negativamente en el crecimiento y la sostenibilidad del sector de instalaciones eléctricas en el largo plazo. Por tal, la adopción de la metodología propuesta ofrece beneficios tangibles en términos de seguridad, eficiencia y competitividad, mientras que la omisión de esta puede resultar en riesgos y desafíos significativos para todas las partes involucradas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Laboratorio Sistemas Energéticos de la Facultad de Ingeniería Región Veracruz de la Universidad Veracruzana, por dejarnos usar sus instalaciones, así como a la Dirección de Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales del Programa Educativo Ingeniería Mecánica Eléctrica, también al grupo de colaboración “Análisis de riesgo y ahorro de energía” por el apoyo brindado en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] INEGI, “Los servicios relacionados a la construcción. Censos Económicos.” p. 73, 2019, [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463901990>.

[2] CONAVI, “Si pones muchas luces en Navidad o tienes conectados numerosos aparatos... aguas con tu instalación eléctrica, ¡denuncia!” 2021. <https://www.gob.mx/conavi/prensa/si-pones-muchas-luces-en-navidad-o-tienes-conectados-numerosos-aparatos-aguas-con-tu-instalacion-electrica-denuncia?idiom=es>.

[3] CFE, “Bases de diseño únicas para la consideración en los proyectos y en la construcción de las obras eléctricas que serán recibidas por la división de distribución oriente.” p. 38, 2023.

[4] O. Arana, “El Contrato De Fianza, Un Contrato En Extinción,” *Bibl. Jurídica Virtual del Investig. Jurídicas la UNAM*, no. 1, 2016, [Online]. Available: www.juridicas.unam.mx<http://biblio.juridicas.unam.mx/bjv><https://goo.gl/NKEj58>.

[5] M. A. Sobrevila, *Instalaciones eléctricas*. 207AD.

[6] CFE, “Autorización de obras construidas por terceros, que serán | gob.mx,” 2024. <https://www.gob.mx/tramites/ficha/autorizacion-de-obras-construidas-por-terceros-que-seran-entregadas-a-cfe/CFE560> (accessed Mar. 12, 2024).





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Fundamentos de sistemas de transmisión de alta tensión en Corriente Directa (HVCD)



Colaboración

Juan Antonio Pinilla-Rodríguez; Felipe de Jesús Pozos-Texton; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: Hoy en día, en todo el mundo se están empleando enlaces de alta tensión en Corriente Directa (HVDC). En el pasado, su adopción se veía obstaculizada por su elevado costo. Sin embargo, gracias a avances recientes en la electrónica de potencia, como la disminución en los costos de los tiristores, el aumento en sus voltajes y corrientes nominales, la simplificación de los sistemas de disparo y protección, el diseño más compacto de las estaciones convertidoras, el uso de tiristores GTO y el cambio del agua por freón líquido para el enfriamiento de los tiristores, esta tecnología está experimentando una transformación en términos de viabilidad. Este texto tiene como objetivo introducir al lector en los principios fundamentales de la transmisión HVDC, resaltando su potencial como una opción factible para el transporte de energía, aspecto que está siendo considerado y evaluado en diversos proyectos de expansión de transmisión a nivel mundial.

PALABRAS CLAVE: HVDC, corriente directa, transporte de corriente directa.

ABSTRACT: Today, High Voltage Direct Current (HVDC) links are being used throughout the world. In the past, their adoption was hampered by their high cost. However, thanks to recent advances in power electronics, such as the decrease in thyristor costs, the increase in their rated voltages and currents, the simplification of triggering and protection systems, the more compact design of converter stations, the use of GTO thyristors and the change from water to liquid Freon for thyristor cooling, this technology is undergoing a transformation in terms of feasibility. This text aims to introduce the reader to the fundamental principles of HVDC transmission, highlighting its potential as a feasible option for power transmission, an aspect that is being considered and evaluated in several transmission expansion projects around the world.

KEYWORDS: HVDC, direct current, direct current transmission.

INTRODUCCIÓN

La primera instalación importante de HVDC se estableció en 1954 cuando se construyó un enlace de 90 km y 20 MW entre Suecia y la isla de Gotland. Esta opción se eligió en lugar de la corriente alterna debido a las altas exigencias de compensación reactiva que habrían sido necesarias. Desde entonces, la capacidad de transmisión ha experimentado un notable crecimiento, alcanzando voltajes de hasta 800 kV e incluso tecnologías capaces de lograr

1000 kV. En los últimos años, los sistemas HVDC han evolucionado significativamente en el panorama de la infraestructura eléctrica global, ofreciendo un mayor control en los sistemas eléctricos de potencia. Sin embargo, su adopción aún enfrenta limitaciones debido a los elevados costos y a la necesidad de contar con personal altamente calificado para su mantenimiento.

Definiciones básicas, a continuación, se presentan las explicaciones de los términos más comúnmente asociados con la transmisión de alta tensión en corriente continua (HVDC):

Rectificador: Dispositivo que convierte la corriente alterna (CA) en corriente directa (CD).

Convertidor: Equipo que transforma la corriente alterna en corriente directa.

Inversor: Dispositivo que convierte la corriente directa en corriente alterna.

Ripple: Variación restante en la corriente directa, que es mitigada por reactores en sistemas modernos.

Conmutación: Proceso de transferencia de corriente entre válvulas.

Reactor: Componente inductivo que mejora la calidad de la corriente directa y protege contra sobre corrientes.

Válvula: Dispositivo que permite el flujo de corriente en una sola dirección, como tubos de arco de mercurio o tiristores.

Filtros armónicos: Necesarios para eliminar distorsiones generadas por los convertidores.

Fuentes de potencia reactiva: Dispositivos como capacitores o compensadores estáticos que gestionan la absorción de potencia reactiva de los convertidores.

Electrodos: Conductores con una gran superficie empleados en líneas de corriente directa que operan mediante la devolución a través de tierra.

Interruptores de CA: Utilizados para aislar fallas en el transformador y desconectar el enlace de HVDC, no por fallos en la línea de corriente directa.

Ángulo de solape (μ): Intervalo de tiempo en el cual la corriente se transfiere entre dos componentes de un rectificador, típicamente menor a 60 grados.

Ángulo de retraso (alfa): Retraso en la activación de la conmutación, expresado en grados eléctricos, que no debe exceder los 180 grados.

Tiristor (SCR, Rectificador Controlado de Silicio): Semiconductor empleado para controlar y convertir corriente, con una puerta para su activación.

Transmisión en Corriente Directa

La aplicación de corriente directa en las líneas de transmisión no pretende reemplazar la corriente alterna, sino complementarla. Se sugiere la implementación de enlaces de transmisión de corriente directa dentro de un sistema de corriente alterna, o la interconexión de dos sistemas de corriente alterna a través de una línea de transmisión de corriente directa. Este enfoque requiere la conversión de corriente alterna a corriente directa en el punto de origen, y luego de corriente directa a corriente alterna en el punto de destino. La viabilidad y los beneficios de esta integración se basan en gran medida en el avance de convertidores que manejen los altos niveles de voltaje y potencia requeridos [5].

Aspectos Básicos de los Sistemas HVDC

Los argumentos más comunes a favor de la tecnología HVDC son los siguientes [6].

Transmitir grandes bloques de energía, especialmente a través de cables submarinos, donde la alta capacitancia en corriente alterna limita significativamente la distancia de transmisión, situación que no ocurre en corriente directa.

La transmisión de energía a largas distancias a través de líneas aéreas (de al menos 800 km o más). Reducir las pérdidas de potencia activa. Por lo general, las pérdidas son menores en corriente continua que en corriente alterna, a pesar de considerar las pérdidas en las estaciones convertidoras. Conectar sistemas asincrónicos debido a diferencias en las frecuencias de operación o problemas de estabilidad.

Aumentar el nivel de control en el sistema de corriente alterna donde se conecta el sistema HVDC. Elevar la capacidad de transmisión sin incrementar la capacidad de cortocircuito.

Configuraciones de los sistemas de HVDC

Entre las configuraciones más usuales de sistemas HVDC, se distinguen principalmente tres tipos [6]:

Transmisión punto a punto: Esta es la forma predominante entre las líneas construidas, utilizando ya sea cables aéreos, submarinos o una combinación de ambos. Las líneas submarinas frecuentemente son unipolares, con un solo conductor entre las estaciones convertidoras, y emplean la tierra o el agua marina como retorno para la corriente, como se puede observar en la Figura 1.

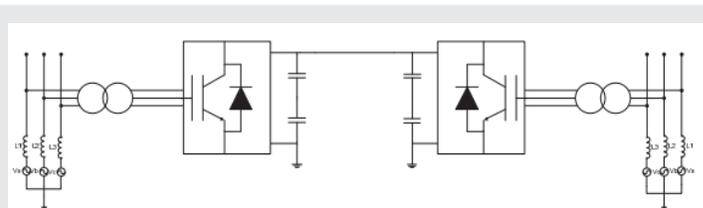


Figura 1. Línea de transmisión monopolar.
Fuente: Díaz-Martín (2013). [7]

En líneas generales, las líneas aéreas son bipolares, lo que significa que se utilizan dos conductores con polaridades opuestas (uno positivo y otro negativo).

En esencia, una transmisión bipolar equivale a tener un doble circuito de transmisión, ya que un polo puede transmitir energía mientras el otro polo está fuera de servicio, como se puede observar en la Figura 2.

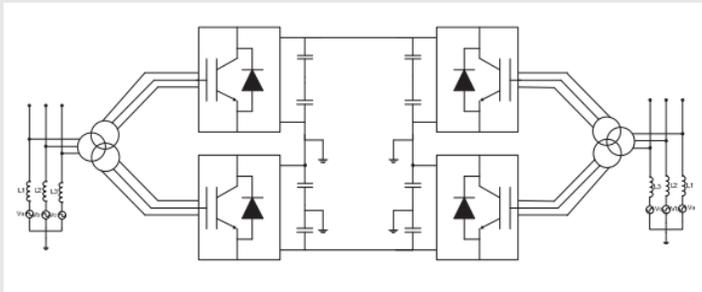


Figura 2. Línea de transmisión bipolar.
Fuente: Díaz-Martín (2013). [7]

El voltaje en las conexiones HVDC se determina mediante la búsqueda de la relación óptima entre la inversión inicial y las pérdidas operativas. Hasta la fecha, el voltaje más alto registrado en una línea aérea HVDC es de 600 kV, mientras que en cables submarinos es de 450 kV.

En la configuración Back to Back, utilizada para interconexiones asincrónicas entre dos estaciones de CA, el rectificador y el inversor están situados juntos. Esta modalidad aprovecha otra ventaja del HVDC, permitiendo la conexión de dos redes de CA que operan a la misma frecuencia pero que difieren en las frecuencias de sus sistemas de control internos.

Los sistemas multiterminales, por su parte, implican más de dos estaciones convertidoras y, como tal, requieren un sistema de control y requisitos de telecomunicaciones más complejos en comparación con una configuración punto a punto. Como se puede observar en la Figura 3.

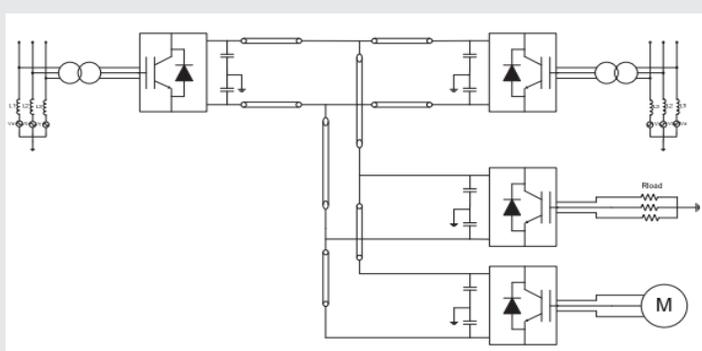


Figura 3. Línea de conexión multiterminal.
Fuente: Díaz-Martín (2013). [7]

Hay solamente un sistema como estos en el mundo en operación y otros sistemas así están en consideración.

MATERIAL Y MÉTODOS

Existen diversas razones por las cuales optar por la corriente continua de alta tensión (HVDC) en lugar de corriente alterna (CA) para la transmisión de electricidad, las cuales generalmente se dividen en dos grandes categorías [5]:

HVDC resulta en menos inversión y pérdidas menores

Menor costo inicial: Implementar sistemas HVDC puede requerir una inversión inicial menor en comparación con las transmisiones de CA, especialmente cuando las distancias de transmisión son largas o existen obstáculos geográficos que dificultan el despliegue de líneas de CA.

Menor pérdida de energía: Las transmisiones HVDC pueden tener menores pérdidas de energía en comparación con las transmisiones de CA, principalmente a largas distancias, lo que conduce a una mayor eficiencia en la transmisión de energía.

HVDC es necesaria o técnicamente deseable

Ventajas ambientales: Las torres de transmisión para HVDC suelen ser más pequeñas que sus equivalentes de CA para la misma capacidad de transmisión, lo que reduce el impacto visual ambiental y la huella ecológica.

Control preciso de la potencia activa: Los sistemas HVDC permiten un control exacto de la potencia activa, lo que puede ser ventajoso en términos de estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.

Funcionamiento asíncrono: Los enlaces HVDC pueden operar de manera asíncrona, lo que los hace útiles para conectar sistemas eléctricos con diferentes frecuencias o para la transmisión de energía entre redes eléctricas que operan de forma independiente.

Transmisiones submarinas: HVDC es preferible para transmisiones submarinas, ya que es más eficiente y económico que la transmisión de CA a largas distancias bajo el agua.

Largas distancias terrestres: En casos donde se requiere transmitir energía a largas distancias por tierra, el ahorro en el costo de la línea de transmisión HVDC puede compensar el mayor costo de las estaciones convertidoras.

La elección de implementar una línea HVDC puede depender de varios factores técnicos, económicos y ambientales, y suele evaluarse caso por caso, se puede observar en la Figura 4.

Los sistemas de corriente directa poseen una capacidad inherente de sobrecarga que puede ser aprovechada para amortiguar oscilaciones, así como para establecer conexiones entre dos sistemas sin aumentar el nivel de cortocircuito.

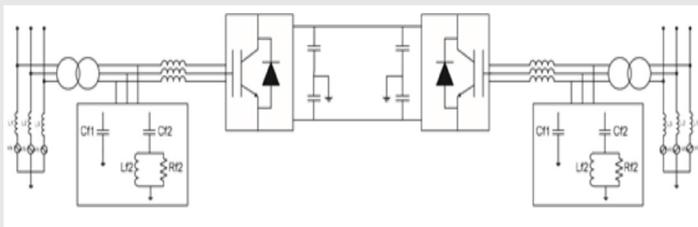


Figura 4 Línea de transmisión en HVDC.

Fuente: Díaz-Martín (2013). [7]

Sin embargo, es importante tener en cuenta algunas limitaciones de la tecnología HVDC [9]:

Carencia de interruptores: Esta limitación ha restringido el esquema multiterminal en el pasado, pero avances tecnológicos recientes están permitiendo la instalación de más de dos terminales, como se observa en proyectos en Italia y en la interconexión Quebec-Nueva Inglaterra.

Confiabilidad y mantenimiento de convertidores de arco de mercurio: Aunque en las primeras instalaciones se utilizaban válvulas de arco de mercurio para el proceso de conversión, actualmente se emplean tiristores. No obstante, aún existen instalaciones que mantienen la tecnología antigua.

Producción de armónicas debido a la operación de los convertidores: Es necesario instalar filtros en ambos lados del sistema de corriente directa para mitigar este problema.

Generación de armónicos: La eliminación de estos armónicos puede resultar costosa y complicada.

Los sistemas de transmisión de alta tensión en corriente directa (HVDC) son ampliamente utilizados debido a sus múltiples ventajas en comparación con los sistemas de corriente alterna (CA). Una aplicación destacada de los sistemas HVDC es la integración de energías renovables, especialmente en parques eólicos marinos.

Los sistemas HVDC son cruciales para la transmisión de energía generada en parques eólicos ubicados en el mar hacia la tierra firme, permitiendo el transporte eficiente de grandes cantidades de energía a largas distancias con menores pérdidas comparadas con los sistemas CA.

Esta tecnología facilita la conexión de fuentes de energía renovable a las redes eléctricas nacionales, mejorando la estabilidad y la capacidad de gestión de la energía generada.

Además, los sistemas HVDC permiten la conexión de redes eléctricas que operan de manera asincrónica, mejorando la estabilidad y facilitando el intercambio de energía entre diferentes sistemas eléctricos, lo cual es especialmente útil para integrar fuentes de energía re-

novable que pueden tener fluctuaciones significativas en su producción.

RESULTADOS

Existen diferentes configuraciones de enlaces de corriente continua de alta tensión (HVDC) dependiendo del número y tipo de conductores utilizados. El sistema monopolar emplea un único conductor con polaridad negativa, donde la tierra actúa como retorno. En contraste, el sistema bipolar consta de dos cables, uno positivo y otro negativo, con puntos neutros conectados a tierra en ambos extremos de los convertidores.

Además, el sistema homopolar presenta dos o más conductores de la misma polaridad, generalmente negativa, también regresando a tierra y con la capacidad de cambiar a operación bipolar en caso de falla.

La principal ventaja de los sistemas HVDC sobre la corriente alterna (CA) reside en la economía que resulta del uso de solo dos conductores por circuito. Esto conlleva a la construcción de torres más livianas y menores pérdidas para igual cantidad de potencia transmitida, gracias a la facilidad de control del flujo de energía en los sistemas HVDC.

Sin embargo, es importante señalar algunas limitaciones, como la falta de interruptores adecuados para corriente continua, el alto costo asociado con los convertidores y la necesidad de implementar filtros para mitigar los armónicos producidos.

A pesar de estas limitaciones, los avances continuos en la electrónica de potencia, así como la reducción de costos en esta área, junto con el aumento en los gastos de los derechos de vía y la creciente demanda por mayor eficiencia en las redes de transmisión, indican un futuro prometedor para la adopción y desarrollo de sistemas HVDC.

CONCLUSIONES

Existen diferentes configuraciones para las líneas de corriente continua de alta tensión según la complejidad y cantidad de conductores empleados. En el sistema monopolar se implementa un solo conductor con carga negativa, utilizando la tierra como retorno de la corriente. El sistema bipolar consta de dos cables, uno positivo y otro negativo, conectando puntos neutros a tierra en ambos extremos de los convertidores. Asimismo, el sistema homopolar posee dos o más hilos de igual polaridad, generalmente negativa, empleando también la tierra para el retorno de la corriente, pudiendo cambiar a operación bipolar ante fallas.

La principal ventaja de los sistemas HVDC sobre la corriente alterna radica en el ahorro que supone usar solo dos conductores por circuito, lo que resulta en torres más livianas y menores pérdidas para igual cantidad de energía transmitida, debido a la facilidad de control

del flujo de potencia. Sin embargo, existen desventajas como la carencia de interruptores adecuados para la corriente continua, el elevado costo de los convertidores y la necesidad de filtros para mitigar las armónicas producidas.

A pesar de estas limitaciones, los avances y la reducción de precios en la electrónica de potencia, junto con el aumento en los costos de los derechos de paso y la demanda por una mayor eficiencia en las redes de transmisión, sugieren un futuro prometedor para los sistemas HVDC.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Asplund, G., & Carlsson, L. (2008). HVDC: ABB, de pionero a líder mundial. *Revista ABB*(4), 59-64. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de https://www.researchgate.net/publication/28241749_HVDC_ABB_de_pionero_a_lider_mundial.

[2] Asplund, G. (2007). Transmisión de ultra alta tensión. Escenarios alternativos para la transmisión masiva de energía eléctrica de 800 kV HVDC y 1000 kV HVAC a largas distancias. *Revista ABB*(2), 22-27. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de https://library.e.abb.com/public/ff499832d4f2d734c-12573020031f4d6/22-27%20M733_SPA72dpi.pdf.

[3] Elg, A.-P., Bergman, A., Hällström, J., Kharezy, M., y Nieminen, T. (2015). Traceability and Characterization of a 1000 kV HVDC Reference Divider. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(6), 1709-1715. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2410373>.

[4] Grainjer, J. J., & Stevenson Jr., W. D. (1996). Análisis de sistemas de potencia. México: McGraw-Hill. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de https://www.academia.edu/7276069/An%C3%A1lisis_de_Sistemas_de_Potencia_John_J_Grainger_William_D_Stevenson.

[5] Escobar-Vargas, L. M. (2014). Planeamiento de redes de transmisión considerando escenarios generación-demanda y enlaces HVDC [tesis de maestría]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://hdl.handle.net/11059/4923>.

[6] Sarmiento-Uruchurtu, H. G. (1997). Conceptos básicos sobre la transmisión en alta tensión a corriente directa (HVDC). *Boletín IIE*, 21(4), 187-191. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://biblat.unam.mx/es/revista/boletin-iie/articulo/conceptos-basicos-sobre-la-transmision-en-alta-tension-a-corriente-directa-hvdc>.

[7] Díaz-Martín, J. A. (2013). Modelo y simulación del enlace HVDC-VSC de un parque eólico marítimo [tesis de grado]. Universidad de Sevilla. Recuperado el

10 de septiembre de 2023, de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5221/>

[8] Jiménez-Bahamón, L. (2016). Impacto de la transmisión HVDC en la estabilidad transitoria del sistema de potencia [tesis de grado]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://repositorio.utp.edu.co/items/a8f39780-6e9e-44ee-b572-db56a0bc500f>.

[9] Berizzo, R. (2022). Transmisión HVDC: corriente continua de alta tensión. *Ingeniería Eléctrica*(378), 2-6. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de https://www.editores.com.ar/autor/ricardo_berizzo/20220731_transmision_hvdc_corriente_continua_de_alta_tension.

[10] Dodds, S. W., Railing, B., Akman, K., Jacobson, B., y Worzyk, T. (2010). HVDC VSC (HVDC light) transmission - operating experiences. *CIGRE(B4_203_2010)*, 1-9. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113609291>.

[12] Turrubiates-Guillén, V. (2017). Diagnóstico de la coordinación de aislamiento de líneas de transmisión de alta tensión mediante el modelado en ATP/EMTP [tesis de maestría]. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Recuperado el 09 de septiembre de 2023, de <https://hdl.handle.net/20.500.12371/188>.



Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Estudio de Comportamiento de Velocidad del Viento en Boca del Río Mediante Distribución Weibull



Colaboración

Erika Jazmín De la Cruz Ángel; José Alfredo Inclán Barragán; Guadalupe González Mejía; Ruth María Grajeda Rosado, Universidad Veracruzana; Pedro Díaz Abascal, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 28 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: Para conocer una proyección estadística de la energía eólica disponible en la zona urbanizada de Boca del Río, Veracruz es necesario realizar un estudio de la distribución de velocidad de viento. Este estudio describe el comportamiento de la velocidad del viento utilizando el modelo de probabilidad de Weibull y sus parámetros de forma y escala. La muestra de los datos de velocidad de viento proviene del Observatorio Meteorológico, estación 76692, Centro Regional Hidrometeorológico de CONAGUA en Boca del Río. De acuerdo con el estudio efectuado para el periodo del año 2021 a 2023, la velocidad promedio anual del viento fue de 2.18, 2.27 y 2.22 m/s para cada año respectivamente, se ubica en escala 2 de Beaufort. La curva de distribución Weibull muestra una función de densidad de probabilidad con poca variabilidad para cada periodo y con tendencia a bajas velocidades. Los resultados obtenidos representan una fuente de información útil capaz de generar un perfil de velocidades a distintas alturas y la posibilidad de obtener densidad de energía eólica con los datos experimentales en una zona urbana.

PALABRAS CLAVE

Distribución de Weibull, velocidad de viento, factor de escala y forma, energía eólica, zona urbana.

ABSTRACT: Performing a study on the wind speed distribution is necessary to understand a statistical projection of available wind energy in the urbanized area of Boca del Río, Veracruz. This study describes the behavior of wind speed using the Weibull probability model and its shape and scale parameters. The wind speed data sample comes from the Meteorological Observatory, station 76692, at the CONAGUA Regional Hydrometeorological Center in Boca del Río. According to the study conducted for the period from 2021 to 2023, the average annual wind speed was 2.18, 2.27, and 2.22 m/s for each respective year, placing it at Beaufort scale two. The Weibull distribution curve shows a probability density function with little variability for each period and a tendency towards low speeds. The results obtained represent a useful source of information capable of generating velocity profiles at different heights and the possibility of obtaining wind energy density with experimental data in an urban area.

KEYWORDS

Weibull distribution, wind speed, scale and shape parameter, eolic energy, urban area.

INTRODUCCIÓN

A nivel global, los países líderes en producción de energía eólica son China (45 GW), Estados Unidos (43 GW) y Alemania (28 GW), con un total de 80 granjas, 103 parques y 21,607 turbinas eólicas respectivamente [1], este es un ejemplo del porque se ha impulsado a nivel mundial el uso de las energías renovables [2, 3]. A pesar del potencial eólico destacado en diversas regiones de México como el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, la costa del Pacífico y áreas en Baja California Sur, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo y Zacatecas, la capacidad instalada desde los últimos 6 años a la actualidad alcanzo aproximadamente 1.35 GW adicionales a los 6 GW instalados, representando solo el 2% de la producción total. Sin embargo, expertos señalan que este potencial podría aumentar hasta un 14% [4].

Las regiones con recurso potencial eólico deben ser caracterizadas a través de técnicas de estadística descriptiva. Este es-

tudio describe un análisis del comportamiento de la velocidad del viento en la zona urbana de Boca del Río Veracruz durante un periodo de los últimos tres años (del periodo 2021 al 2023), utilizando datos medidos en un centro meteorológico local. Este análisis es decisivo para comprender la variabilidad de velocidades del viento en un periodo de tiempo, la posibilidad de identificar un perfil de velocidades a distintas alturas para la generación de energía eólica y efectos en la planificación urbana, aspectos clave para el desarrollo sostenible de una ciudad.

Es relevante mencionar que el estudio se lleva a cabo en una ciudad costera, donde las condiciones climáticas extremas como tormentas han limitado previamente la exploración de fuentes limpias de energía. No obstante, se han desarrollado tecnologías innovadoras como árboles eólicos y turbinas verticales más compactas que se adaptan a estos entornos urbanos [5].

La caracterización del recurso renovable se lleva a cabo a través de medidas de tendencia central y de dispersión, con los modelos de probabilidad para generar conocimiento del comportamiento del viento en la zona estudiada. La recopilación de datos está basada en la dirección, el valor de velocidad máxima, mínima y promedio del viento, densidad de potencia en un punto específico dentro de la ciudad. El análisis estadístico con el modelo de función de Weibull permite evaluar el potencial energético eólico de las zonas estudiadas y las variaciones a lo largo del tiempo.

Tras evaluar la distribución de probabilidad de velocidad del viento en el lugar de estudio, se puede determinar el potencial eólico disponible en la zona urbanizada y conocer datos necesarios para extrapolar la altura en casos donde no se dispone de información en una localización precisa.

Ante la posibilidad de crecer cuatro veces más la capacidad actual instalada a nivel nacional, propicia el interés de abordar un caso de estudio que beneficie la línea de energía renovable con miras a viabilizar propuestas relacionadas con la energía eólica cercana a la zona costera y realizar investigaciones adicionales para valorar su factibilidad técnica y económica. Un ejemplo similar fue un estudio realizado en 2012, se examinó 16 estaciones anemométricas en todo el estado de Veracruz, México a una altura de 50m, revelando un promedio de velocidad del viento de 5.45 m/s. Se estimó que utilizando un aerogenerador ACCIONA AW 70/1500 Clase I, se podría generar entre 10,694 y 14,432 MWh/año, lo que resultaría en una reducción de aproximadamente 28,806 toneladas de CO₂ en emisiones de gases de efecto invernadero [6].

METODOLOGÍA

Las variaciones de velocidad del viento dependen principalmente de las condiciones climatológicas o la diferencia de temperatura entre el día y la noche debido a los efectos de convección, la temporada estacional y la capa límite terrestre que se deriva de condiciones de superficie local u obstáculos. Para conocer el aprovechamiento del potencial eólico en una zona es necesario evaluar el recurso mediante la aplicación de métodos estadísticos.

La ecuación estadística empleada en el análisis de los datos de medición registrados es la distribución probabilística de Weibull, la cual es ampliamente utilizada para examinar y monitorear datos de velocidad del viento en una ubicación específica durante el periodo determinado en el estudio. Esta función tiene dos variaciones dependiendo del número de parámetros utilizados, para datos del viento se utilizan dos parámetros que se pueden evaluar por distintos métodos para proporcionar un ajuste preciso a la distribución de probabilidades, siendo la técnica empírica o método de los momentos considerada por varios autores como el más adecuado y recomendado para analizar datos en fuentes de energía renovable en comparación con otras distribuciones estadísticas [7, 8].

Los datos utilizados en el estudio son provenientes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente del Centro Regional Hidrometeorológico de Boca del Río en la estación 76692 del Observatorio Meteorológico, con coordenadas geográficas Latitud 19 grados 08' 34.76" N y longitud 96 grados 06' 40.73" W [9]. Esta institución proporcionó los valores registrados de manera horaria durante el periodo comprendido del año 2021 al 2023.

La muestra se obtuvo con los instrumentos de medición colocados a una altitud de 15 msnm, sobre un mástil de 10 metros de altura sobre la superficie como lo marca la normatividad para estaciones meteorológicas, hasta considerar una altura total de 25 msnm. Los datos se obtuvieron para calcular el comportamiento de perfil de viento, pudiéndose estimar que se obtendrá una mayor velocidad de vientos hacia una mayor altura dado que en la vertical los vientos van aumentando exponencialmente.

En la Figura 1 se muestra una fotografía del anemocinógrafo Modelo F-420C-M4 de la marca ESTERLINE ANGUS. Este instrumento está compuesto por una veleta y un anemómetro, del cual se obtuvieron los registros de mediciones de velocidad del viento en m/s y la dirección de este en los puntos cardinales de la rosa de los vientos.

ESTACIONALIDAD DEL VIENTO

Se realizó un estudio estadístico anual de la velocidad media diaria del viento obtenida a partir de las mediciones registradas cada año durante el periodo 2021 al 2023. En la ecuación 1 se muestra la fórmula utilizada para obtener la tendencia central o punto medio de una distribución conocida como velocidad media o promedio en cada periodo anual. Los datos son previamente ordenados por frecuencias y de acuerdo con el número de muestras se obtiene el promedio de las velocidades del viento con la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i * f_i}{n} \tag{Ec. (1)}$$

En la ecuación 2 se muestra la fórmula de la desviación típica o estándar para calcular la distancia promedio de cualquier observación con respecto a la media de distribución y se representa mediante la siguiente expresión:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{Ec. (2)}$$

Dada la variabilidad y asimetría de las velocidades de viento, la distribución de probabilidad se realiza a través del análisis de la función de distribución de Weibull. En la ecuación 3 se muestra la función que define la curva de la densidad de probabilidad y está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{Ec. (3)}$$

Los parámetros asociados en la distribución de Weibull se calculan con el método empírico. La ecuación 4 define el valor k que representa el factor de forma adimensional, la fórmula utiliza el valor de la desviación estándar para estimar la dispersión de un conjunto de datos alrededor de su valor medio y se expresa:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{x}}\right)^{-1.086} \tag{Ec. (4)}$$

De la ecuación 5 se obtiene el valor c que es el factor de escala dado en m/s. Una vez encontrado el valor k se puede utilizar en la fórmula que está en función de la velocidad media y la función gamma expresada por:

$$c = \frac{\bar{x}}{\gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \tag{Ec. (5)}$$

A partir de los parámetros se puede conocer la distribución ajustada a la información del recurso eólico y se puede graficar con el histograma de frecuencia.



Figura 1. Equipo de medición Modelo F-420C-M4 de la marca ESTERLINE ANGUS
Fuente: Observatorio Meteorológico 76692 Boca del Río, Ver.

CASO DE ESTUDIO

En la Figura 2 se muestra la ubicación del sitio donde se tomaron las mediciones y registros de las velocidades y direcciones del viento. De acuerdo con la climatología de la zona conurbada de Veracruz (comprendiendo los municipios de Veracruz, Boca del Río, Medellín de Bravo y Alvarado), el clima es predominantemente cálido y húmedo, con temperaturas superiores a 18°C, según la clasificación de Köppen es Aw [10]. La temperatura media anual es de 25.23°C, con lluvias concentradas en verano y una escasa variación térmica, lo que origina la canícula, un periodo de calor intenso. La región experimenta fenómenos como bruma, niebla, lluvias fuertes, tormentas eléctricas y ocasionalmente pequeños tornados debido al fenómeno de El Niño. Es importante mencionar que la presencia de un frente frío en el Golfo de México genera vientos del norte al sur, conocidos como “Norte”, que pueden alcanzar velocidades de hasta 30 m/s [11].



Figura 2. Ubicación del caso de estudio en Boca del Río, Veracruz.
Fuente: Creación propia

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de las ecuaciones 1, 2, 4 y 5 que describen las variables estadísticas por periodo anual. A partir de estos parámetros utilizados en la ecuación 3, se generó la curva de distribución del comportamiento de la velocidad del viento definidas para cada año.

Tabla 1. Datos estadísticos del viento.

Año	Velocidad Promedio (m/s)	Desviación Estándar (m/s)	factor de forma k	factor de escala c (m/s)	Velocidad Máxima (m/s)
2021	2.18	1.64227	1.357176	2.37648	8.83
2022	2.27	1.79247	1.292747	2.45716	12.00
2023	2.22	1.85805	1.214387	2.37021	12.28

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En relación con los datos obtenidos durante el periodo estudiado, se pudo observar que la velocidad promedio anual tiende a valores continuos sobre 2.2 m/s, alcanzando una velocidad máxima de 12 m/s en los últimos dos años.

La Figura 3 corresponde al histograma del año 2021, donde se observa la curva de distribución de velocidades, presentándose la menor velocidad promedio (2.18 m/s) del caso de estudio.

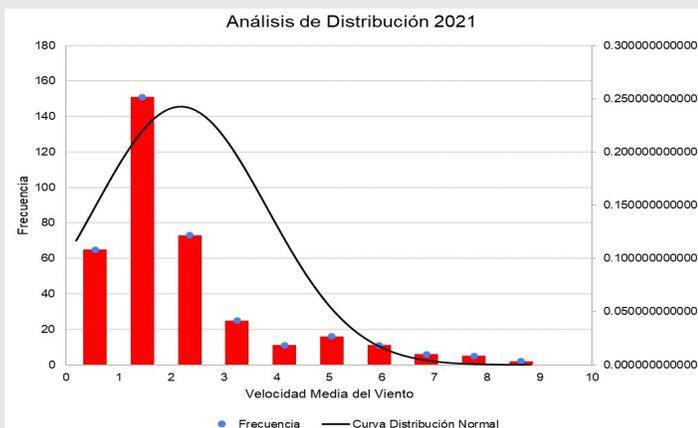


Figura 3. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2021.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 corresponde al histograma del año 2022, donde se observa la curva de distribución de velocidades, presentándose la mayor velocidad promedio (2.27 m/s) del caso de estudio.

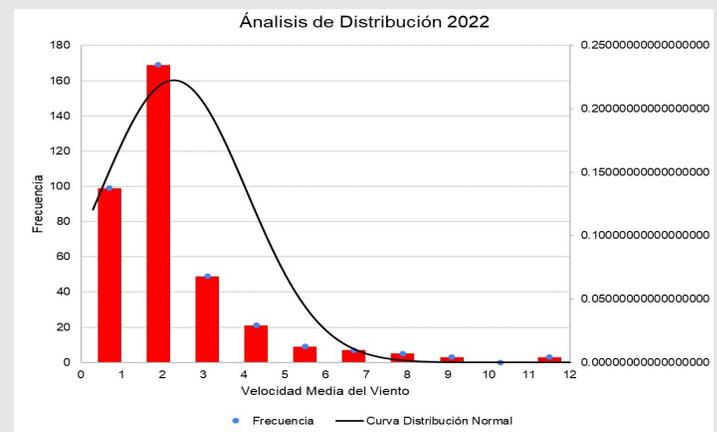


Figura 4. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2022.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra el histograma del año 2023, donde la curva de distribución de velocidades muestra un valor intermedio (2.22 m/s) del periodo estudiado.

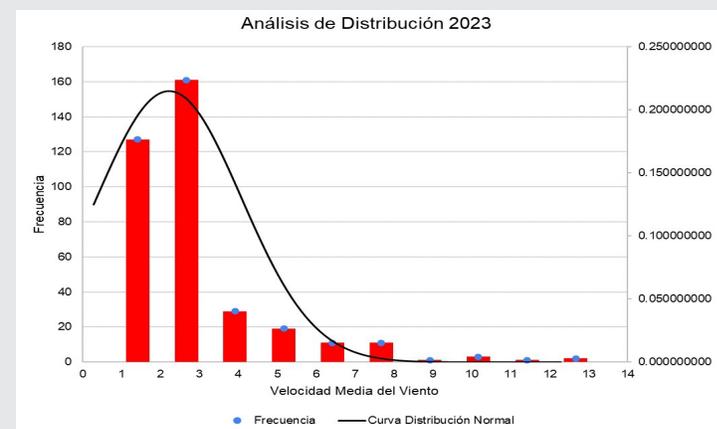


Figura 5. Curva de Distribución de Frecuencias de velocidades en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia.

Las medidas de tendencia central se utilizaron en las curvas de distribución normal y al evaluarlas se aprecia como se van desplazando respecto a las frecuencias de velocidad media del viento, en el 2021 se muestra a la derecha de los histogramas, en el año 2022 se muestra con tendencia alineada a las frecuencias y para el año 2023 se muestra a la izquierda del histograma.

Se aprecia una distribución con apuntamiento y alta frecuencia de velocidades bajas con comportamiento similar, mientras que hacia la derecha del histograma se muestra una cola representativa de frecuencias bajas para velocidad de viento más altas.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de los parámetros estadísticos de la función de distribución de

Weibull evaluada en cada año. El rango de variación de k es menor a 2 que muestra la regularidad del viento, mientras que el valor de c se presenta en 2.37 m/s, 2.45 m/s, y 2.37 m/s correspondiente a cada año.

Se puede observar que el comportamiento de la velocidad en cada año presenta un decremento en la probabilidad de frecuencia de los dos últimos años estudiados.

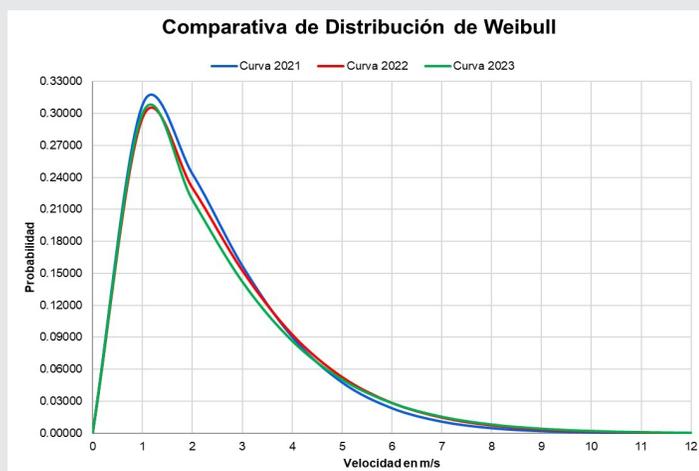


Figura 6. Curvas de Distribución de Weibull de los años 2021 al 2023.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La evaluación estadística del viento es importante para realizar un proyecto eólico en la zona urbanizada. El análisis de la velocidad promedio y la probabilidad de distribución es determinante para estimar la energía eólica disponible y las características de distribución del recurso en el lugar de estudio y su zona de influencia. Para determinar el aprovechamiento eólico se debe tomar en consideración la urbanización y los patrones estacionales del viento.

El comportamiento de velocidades promedio anual mostrados en la Tabla 1, presenta una velocidad media mínima de 2.18 m/s y máxima de 2.27 m/s, que están consideradas como brisa suave (1.6 – 3.3 m/s) según la escala de Beaufort, ubicado en escala 2, por encima de la ventolina y la calma, lo cual significa que hay movimiento de masas de aire en la zona de estudio de forma constante a una velocidad del viento media de 2.2 m/s del periodo 2021 a 2023, considerada relativamente baja.

En los histogramas de frecuencias obtenidos de las distribuciones de datos anuales, se observaron curvas de distribución normal diferentes en sus probabilidades, pero de velocidades semejantes.

Posteriormente se analizaron los datos mediante una función de probabilidad con parámetros calculados

por el método empírico. Las curvas de distribución de Weibull anuales muestran una tendencia similar en la función de densidad de probabilidad aplicadas a los datos observados, el rango de variación de k es menor a 2, lo que indica cierta regularidad del viento.

El comportamiento de los vientos durante el periodo de estudio presenta un decremento en la probabilidad de frecuencia en los dos últimos años.

El escenario calculado con las muestras de medición es insuficiente para definir si existe un potencial eólico, ya que se requiere realizar la proyección del comportamiento a diversas alturas mediante un estudio de perfil de velocidades e identificar las características del terreno para evaluar en un emplazamiento cercano y la posibilidad de obtención recursos eólicos importantes en la zona.

El comportamiento de vientos en la zona de estudio expone un panorama inicial del recurso eólico disponible, pudiendo continuar el estudio con mayor profundidad, para obtener una estimación eólica de la zona urbana.

A pesar de las velocidades obtenidas que se considera en escala menor, pueden ser aptas para aerogeneradores de baja potencia. Es pertinente estudiar la variación de la dirección del viento para identificar un diseño adecuado que permita un funcionamiento continuo a lo largo del año.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente al Centro Regional Hidrometeorológico de Boca del Río por el apoyo brindado y del cual sirvió la información empleada en el estudio del viento.

A los estudiantes Valeria Sosa Ortega y Nahara Nicole Ricardo Torres del Programa Educativo Arquitectura, Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, Universidad Veracruzana, Región Veracruz, por su apoyo en el manejo de datos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Secretaría de Gobernación, «La energía eólica en México. Una perspectiva social sobre el valor de la tierra,» Comisión, Ciudad de México, 2015.

[2] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde y G. J., «Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.

[3] M. Mirhosseini, F. Sharfi y A. Sedagha, «Assessing the wind energy potential locations in pro-

vince of Semnan in Iran,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 449-455, 2011.

[4] M. González-Ávila, L. Beltrán-Morales, E. Troyo-Diéguez y A. Ortega-Rubio, «Potencial de aprovechamiento de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en zonas rurales de México.,» *Interciencia*, vol. 31, n° 4, pp. 240-245, 2006.

[5] J. Ramos, «Tomorrow City ¿Tiene sentido las turbinas eólicas en las ciudades?,» *Fira Barcelona*, 27 September 2022. [En línea]. Available: <https://www.tomorrow.city/es/pueden-usarse-turbinas-energia-eolica-ciudad/>. [Último acceso: 2024].

[6] Q. Hernández-Escobedo, F. Espinosa-Arenal, R. Saldaña-Flores y C. Rivera-Blanco, «Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz,» *Dyna*, vol. 79, n° 171, pp. 215-221, 2012.

[7] S. Akdağ, H. Bagiorgas y G. Mihalakakou, «Use of two-component Weibull mixtures in the analysis of wind speed in the Eastern Mediterranean,» *Applied Energy*, vol. 87, n° 8, pp. 2566-2573, 2010.

[8] A. Rathore, A. Kumar, S. Patel, P. Khatakar y N. Patidar, «Modelling of Wind Speed Data using Weibull Distribution Function in Dewas,» *IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, pp. 1-5, 2022.

[9] Gobierno de Mexico, «Centro Hidrometeorológico Regional “Boca del Rio - Veracruz”,» *CONAGUA*, 2022. [En línea]. Available: <https://smn.conagua.gob.mx/es/centro-hidrometeorologico-veracruz-boca-del-rio>. [Último acceso: 2024].

[10] S. M., G. L. y G. M., «Los climas cálidos subhúmedo del Estado de Veracruz, México,» *Forresta Veracruzana*, vol. 3, n° 2, pp. 31-40, 2011.

[11] Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología, «<https://digaohm.semarmar.gob.mx/>,» *Secretaría Marina*, 2024. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbnmn-nnibpcajpcglclefindmkaj/https://digaohm.semarmar.gob.mx/cuestionarios/cnarioVeracruz.pdf>. [Último acceso: 2024].





Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Hacia una Solución Sostenible: Propuesta de sistemas de protección para la reducción de mortalidad en murciélagos debido a turbinas eólicas

RESUMEN: El impulso hacia las fuentes de energía limpias presenta desafíos significativos para el medio ambiente, especialmente en términos de la biodiversidad, con la creciente preocupación por la mortalidad de los murciélagos en áreas con turbinas de viento. Esta problemática se vincula en gran medida con los accidentes que sufren estos mamíferos voladores al colisionar con las turbinas durante sus períodos de migración o en momentos de viento leve, lo que se cree puede deberse a una atracción por el sonido que generan las turbinas, o por la búsqueda de lugares de reposo o de apareamiento cerca de estas estructuras. Dado el papel vital de los murciélagos en el equilibrio ecológico, como reguladores naturales de insectos y agentes polinizadores, es crucial desarrollar estrategias para minimizar estos impactos negativos. La propuesta de investigación se centra en la creación y evaluación de sistemas de protección destinados a disminuir la tasa de fatalidades entre los murciélagos en los parques eólicos, ajustándose a variadas condiciones del entorno y diferentes diseños de turbinas, sin comprometer la eficacia en la generación de energía. Aunque se enfrentan restricciones de presupuesto y tiempo, el estudio aspira a hallar vías que permitan un equilibrio entre el avance de las energías renovables y la preservación de especies clave para la biodiversidad.

PALABRAS CLAVE: Biodiversidad, energía eólica, mortandad de murciélagos, dispositivos preventivos, conservación.



Colaboración

Jacqueline Hernández-Andrade; Felipe de Jesús Pozos-Texon, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Juan Antonio Pinilla-Rodríguez; Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

ABSTRACT: The drive towards clean energy sources presents significant challenges for the environment, especially in terms of biodiversity, with growing concern over bat mortality in areas with wind turbines. This issue is largely linked to accidents involving these flying mammals colliding with turbines during their migration periods or at times of light wind, which is thought to be due to an attraction to the sound generated by the turbines, or to finding roosting or mating sites near these structures. Given the vital role of bats in the ecological balance, as natural regulators of insects and pollinators, it is crucial to develop strategies to minimize these negative impacts. The research proposal focuses on the creation and evaluation of protection systems aimed at decreasing the fatality rate among bats in wind farms, adjusting to varied environmental conditions and different turbine designs, without compromising efficiency in power generation. Although facing budget and time constraints, the study aims to find ways to strike a balance between the advancement of renewable energy and the preservation of key biodiversity species.

KEYWORDS: Biodiversity, wind energy, bat mortality, preventive devices, conservation.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las muertes de murciélagos son causadas por colisiones con las aspas móviles de las turbinas eólicas, y son más frecuentes durante la migración otoñal y las noches con vientos ligeros. Existe la posibilidad de que los murciélagos se sientan atraídos por las turbinas Figura 1 y, por lo tanto, aumenten el riesgo de impacto [1]. Esto puede estar sesgado a la colocación de detectores acústicos, limitados por el alcance causado por la atenuación del sonido. Además, la variación en función de la altura sobre el suelo entre las especies de murciélagos y la reducción

de la ecolocalización pueden influir en ocasiones en las mediciones de la actividad. El estudio de atracción se divide en cinco explicaciones propuestas previamente para la actividad de esta especie en aerogeneradores, como la atracción de ruido, los sitios de descanso, la búsqueda de alimento y agua, el comportamiento de apareamiento [2] [3].

El interés por las energías renovables aumentó debido al cambio climático causado por las emisiones de combustibles fósiles [4] [5]. La energía eólica y otras formas de energía renovable no están exentas de consecuencias negativas. Una de estas consecuencias es la mortalidad de los murciélagos debido a colisiones con palas de aerogeneradores [6]. En América del Norte, las especies migratorias como el murciélago de pelo gris, el murciélago rojo oriental y el murciélago de pelo plateado representan la mayoría de las muertes registradas. La importancia de atender esta problemática se debe a que los murciélagos juegan un papel crucial en el equilibrio de los ecosistemas al contribuir al control de plagas y la polinización, por lo que supone una amenaza directa para la biodiversidad y la salud de los ecosistemas [7] [8] [9].



Figura 1. Murciélagos y turbinas eólicas.

Fuente: Planeta Vivo 2021.

Mediante el desarrollo e implementación de dispositivos preventivos efectivos, esta investigación busca mitigar el impacto negativo de la energía eólica en las poblaciones de murciélagos [10]. Las llamadas de ecolocalización de los murciélagos se encuentran entre los sonidos naturales más poderosos y proporcionan una percepción sensorial confiable para navegar y encontrar comida durante la noche [11], por lo tanto, es necesario crear las condiciones de coexistencia más sostenible entre las iniciativas de energía renovable y la conservación de la vida silvestre [12].

El estudio se centrará en el diseño y evaluación de dispositivos preventivos específicos para reducir la mortalidad de murciélagos en parques eólicos seleccionados [13]. Se buscará la adaptabilidad de estos dispositivos a diversas condiciones ambientales y tipologías de turbi-

nas. Se realizará un análisis detallado del rendimiento energético de las turbinas equipadas con dispositivos preventivos [14].

Este alcance tiene como objetivo comprender cómo estas soluciones afectan la eficiencia general de la generación de energía eólica.

Las limitaciones identificadas son aspectos que podrían afectar la ejecución integral y exhaustiva de la investigación.

Al buscar financiación de diversas fuentes, las restricciones presupuestarias podrían limitar la escala y la duración del estudio. La investigación se llevará a cabo de manera eficiente, priorizando áreas críticas. La evaluación a largo plazo del impacto de los dispositivos preventivos puede estar limitada por la duración del proyecto. Se reconocerá esta limitación y se proporcionarán recomendaciones para futuras investigaciones que aborden esta necesidad [15].

El ruido audible y ultrasónico generado por las turbinas eólicas puede atraer a los murciélagos. Algunas especies pueden confundir los sonidos con presas potenciales o interpretarlos como señales de navegación, lo que lleva a una mayor proximidad a las turbinas [16] [17] [18].

Los murciélagos pueden malinterpretar la estructura alta e independiente de las turbinas eólicas como un paisaje de árboles [19] [20], en este sentido, pueden imitar inadvertidamente las características de los sitios de descanso natural, como las copas de los árboles o los acantilados. Las estructuras proporcionan refugio de los depredadores y de las condiciones climáticas adversas [21] [22].

La observación directa utilizando imágenes termográficas se muestra en la Figura 2, combinadas con tendencias de mortalidad sugiere que los murciélagos pueden usar turbinas eólicas para guiarse hacia sitios potenciales de apareamiento [23] [24].

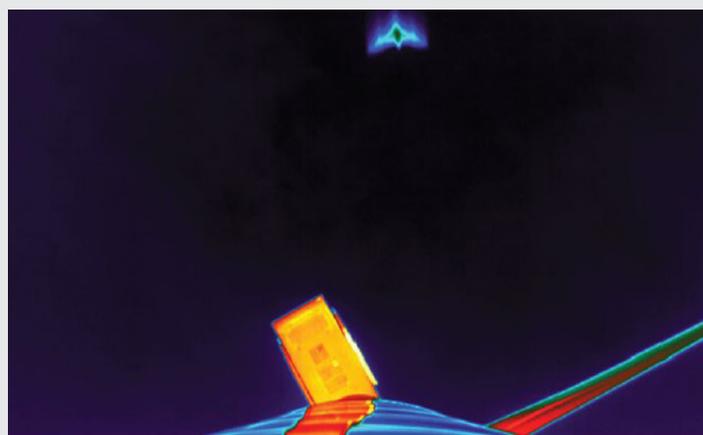


Figura 2. Imagen termográfica de turbina eólica y murciélago.

Fuente: R. Green et al. 2022 .

Los murciélagos utilizan la ecolocalización para la navegación y la comunicación. Las características acústicas de las turbinas eólicas pueden atraer inadvertidamente a los murciélagos, debido a que las estructuras pueden producir sonidos que se asemejan a los asociados con posibles parejas [21].

Además, en las inmediaciones de las turbinas eólicas se crean condiciones propicias para la agregación de insectos, una fuente primaria de alimento para los murciélagos [25].

Con respecto a la iluminación de las turbinas, especialmente durante la noche, puede contribuir a la contaminación lumínica. Los murciélagos, que son animales nocturnos, pueden sentirse atraídos por la luz, alterando sus comportamientos naturales [26] [27].

Muchos murciélagos de clima templado migran cientos de kilómetros desde su hábitat de invierno a su hábitat de verano en dirección opuesta cada otoño. De kilómetros desde el hábitat de invierno al de verano en dirección opuesta cada otoño [28]. El período de migración puede ayudar a reducir el riesgo de perturbaciones causadas por actividades antropogénicas, guiar una gestión eficaz y predecir los efectos futuros de un clima cambiante [29].

MATERIAL Y MÉTODOS

El proyecto iniciará seleccionando parques eólicos en función de criterios concretos, como la alta incidencia de muertes de murciélagos, la presencia de especies migratorias en peligro y la diversidad de entornos ambientales. Esta estrategia permitirá una evaluación pormenorizada de la eficacia de mecanismos de prevención en múltiples contextos y especies de quirópteros.

Procederemos a concebir un dispositivo ultrasónico para evitar que los murciélagos se acerquen a las turbinas, además de modificar patrones de luz para reducir su atracción y establecer barreras físicas que no resulten invasivas. Este diseño surgirá de un esfuerzo interdisciplinario, abarcando desde la biología conductual hasta la ingeniería acústica y la optoelectrónica. Los patrones de vuelo recabados nos orientarán para perfeccionar el funcionamiento de los sistemas preventivos y recopilar evidencia de su eficacia.

Durante las migraciones otoñales, implementaremos ensayos controlados para observar la conducta de los murciélagos pre y post instalación de los dispositivos y así identificar variaciones notables en la mortalidad.

En paralelo, mediremos cómo los dispositivos afectan la eficiencia energética de las turbinas.

Analizaremos los datos mediante métodos estadísticos para valorar la eficacia de los dispositivos y descubrir tendencias, relaciones y posibles causas de colisiones.

Finalmente, aparte de enfocarnos en la disminución de las muertes de los murciélagos, evaluaremos el impacto ambiental de los dispositivos para prevenir o minimizar efectos colaterales adversos en el hábitat local (Figura 3).

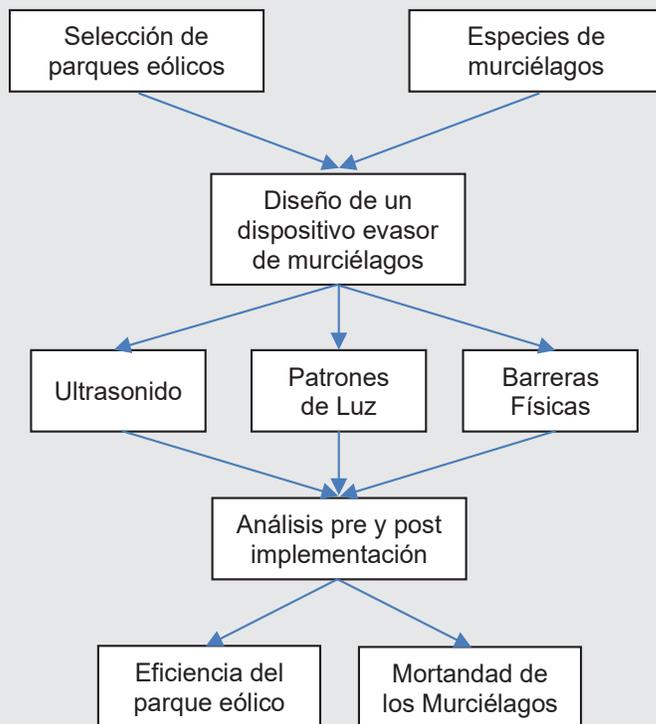


Figura 3. Propuesta metodológica para la reducción de mortalidad de murciélagos en parques eólicos.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

La investigación en los parques eólicos se centra en tres objetivos fundamentales: preservar la biodiversidad, fomentar la innovación tecnológica y mitigar el impacto ambiental.

Con respecto a la biodiversidad, los nuevos dispositivos disuasivos avanzados deberían contribuir a reducir significativamente la mortalidad de murciélagos en las áreas estudiadas. Mediante la alteración de su ecolocalización ultrasónica y la modificación del entorno lumínico, se espera que las colisiones disminuyan sustancialmente, especialmente durante las épocas de migración otoñal, cuando el riesgo aumenta. Se prevé que la menor tasa de incidentes repercuta positivamente en las poblaciones de especies migratorias reconocidas por su vulnerabilidad.

En el campo tecnológico, los dispositivos, fruto de un enfoque multidisciplinario, deben proporcionar soluciones flexibles adaptadas a los diversos entornos ambientales y modelos de turbinas. Los ajustes basados en los patrones de vuelo registrados promoverán la mejora continua de estas herramientas. Las pruebas in situ serán esenciales para perfeccionar los dispositivos, optimizando la prevención de encuentros con

murciélagos y la eficiencia operativa de las turbinas. El análisis pormenorizado de los datos recogidos apoyará la comprensión profunda de la dinámica entre los quirópteros y las turbinas, influyendo en futuros desarrollos.

En cuanto al impacto ambiental, el objetivo es que sea neutro o incluso beneficioso. Se busca evidenciar que la disminución de la mortalidad de los murciélagos no conlleve efectos colaterales negativos, como la alteración de la fauna circundante o la degradación de los ecosistemas. El equilibrio entre la protección ambiental y la generación de energía renovable será un foco crítico, con el fin de garantizar una estrategia de desarrollo sostenible y ética. Aspiramos a establecer un modelo de convivencia entre la conservación de la biodiversidad y la promoción de fuentes de energía limpia.

CONCLUSIONES

La implantación proactiva de medidas proteccionistas en instalaciones eólicas, matizadas por la singularidad de los murciélagos migrantes, promete ser un punto de giro determinante en la reducción de los efectos adversos de la energía eólica en la biodiversidad. Se anticipa que la integración de tecnologías punteras como el ultrasonido y la optoelectrónica en la creación de dichos dispositivos aminore de modo notable los incidentes de murciélagos con las turbinas. Este avance no solo constituye un hito en la salvaguardia de estas especies, sino que asimismo podría señalar una nueva etapa para el desarrollo sostenible de infraestructuras de energía renovable.

El triunfo de este enfoque podría contribuir significativamente al equilibrio entre la protección del medio ambiente y la producción energética, destacando la factibilidad de prácticas ecológicamente responsables en el sector eólico. A través de un análisis meticuloso y una supervisión constante, los hallazgos de este estudio podrían transformarse en un punto de referencia para otros proyectos de energías renovables que busquen una conciliación entre los objetivos energéticos y la conservación de la naturaleza.

Finalmente, este proyecto se vislumbra como un impulso hacia un compromiso más firme con la sostenibilidad ambiental y el bienestar ecológico de nuestro planeta a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Guest, E. E., Stamps, B. F., Durish, N. D., Hale, A. M., Hein, C. D., Morton, B., Weaver, S. P., & Fritts, S. R. (2022b). An updated review of hypotheses regarding bat attraction to wind turbines. *Animals*, 12(3), 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>.

[2] Tuneu-Corral, C., Puig-Montserrat, X., Flaquer, C., Mata, V. A., Rebelo, H., Cabeza, M., & López-Bauccells, A. (2024). Bats and rice: Quantifying the role of insectivorous bats as agricultural pest suppres-

sors in rice fields. *Ecosystem Services*, 66, 101603. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101603>.

[3] T. J. O'Shea, P. M. Cryan, D. T. S. Hayman, R. K. Plowright, and D. G. Streicker, "Multiple mortality events in bats: a global review," *Mammal Review*, vol. 46, no. 3, pp. 175–190, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1111/mam.12064>.

[4] Yang, X., & Long, L. R. (2024). Renewable energy transition and its implication on natural resource management for green and sustainable economic recovery. *Resources Policy*, 89, 104624. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104624>.

[5] Zakariazadeh, A., Ahshan, R., Al-Abri, R., & Al-Abri, M. (2024). Renewable energy integration in sustainable water systems: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100722. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100722>.

[6] Morant, J., Arrondo, E., Sánchez-Zapata, J. A., Donázar, J. A., Margalida, A., Carrete, M., Blanco, G., Guil, F., Serrano, D., & Pérez-García, J. M. (2024). Fine-scale collision risk mapping and validation with long-term mortality data reveal current and future wind energy development impact on sensitive species. *Environmental Impact Assessment Review*.

[7] Guest, E. E., Stamps, B. F., Durish, N. D., Hale, A. M., Hein, C. D., Morton, B., Weaver, S. P., & Fritts, S. R. (2022b). An updated review of hypotheses regarding bat attraction to wind turbines. *Animals*, 12(3), 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>.

[8] Garvin, J. C., Simonis, J. L., & Taylor, J. L. (2024). Does size matter? Investigation of the effect of wind turbine size on bird and bat mortality. *Biological Conservation*, 291, 110474. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110474>.

[9] Smallwood, K. S., & Bell, D. A. (2020b). Relating BAT passage rates to wind turbine fatalities. *Diversity*, 12(2), 84. <https://doi.org/10.3390/d12020084>.

[10] Bennett, V. J., & Hale, A. M. (2018). Es posible que la disponibilidad de recursos no sea un predictor útil de las muertes de murciélagos migratorios o de la actividad en las turbinas eólicas. *Diversidad*, 10(2), 44. <https://doi.org/10.3390/d10020044>.

[11] E. R. Buchler and S. B. Childs, "Orientation to distant sounds by foraging big brown bats (*Eptesicus fuscus*)," *Animal Behaviour*, vol. 29, no. 2, pp. 428–432, May 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/s0003-3472\(81\)80102-9](https://doi.org/10.1016/s0003-3472(81)80102-9).

[12] Kasso, M., & Balakrishnan, M. (2013). Importancia ecológica y económica de los murciélagos

(Orden Chiroptera). ISRN Biodiversidad, 2013, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/187415> Posadero. (2024). [HTTPS://Dictionary.Cambridge.org/Dictionary/English/Roosting](https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/roosting).

[13] E.R. Buchler, S.B. Childs, Orientation to distant sounds by foraging big brown bats (*Eptesicus fuscus*), *Animal Behaviour*, Volume 29, Issue 2, 1981, Pages 428-432, ISSN 0003-3472, [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(81\)80102-9](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(81)80102-9).

[14] Happ, C., Sutor, A., & Hochradel, K. (2021). Metodología para la detección visual automatizada de muertes por colisión de aves y murciélagos en aerogeneradores terrestres. *Revista de Imageología*, 7(12), 272. <https://doi.org/10.3390/jimage7120272>.

[15] Smallwood, K. S., & Bell, D. A. (2020). Relación de las tasas de paso de las MTD con las muertes de turbinas eólicas. *Diversidad*, 12(2), 84. <https://doi.org/10.3390/d12020084>.

[16] E. R. Buchler and S. B. Childs, "Orientation to distant sounds by foraging big brown bats (*Eptesicus fuscus*)," *Animal Behaviour*, vol. 29, no. 2, pp. 428-432, May 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/s0003-3472\(81\)80102-9](https://doi.org/10.1016/s0003-3472(81)80102-9).

[17] Doolan, C. (n.d.). The real science on wind farms, noise, infrasound and health. *The conversation*. <https://theconversation.com/the-real-science-on-wind-farms-noise-infrasound-and-health>.

[18] Kanwal, J. S. (2021). Comunicación sónica y ultrasónica en murciélagos: Acústica, percepción y producción. En Elsevier eBooks (pp. 239-265). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815160-0.00011-6>.

[19] Smallwood, K. S., & Bell, D. A. (2020). Relación de las tasas de paso de las MTD con las muertes de turbinas eólicas. *Diversidad*, 12(2), 84. <https://doi.org/10.3390/d12020084>.

[20] Allen, JJ, Mathger, LM, Buresch, KC, Fetichko, T., Gardner, M. y Hanlon, RT (2010). La visión nocturna de las sepias permite cambiar el camuflaje. *Revista de biología experimental* 213, 3953 - 3960.

[21] Guest, E. E., Stamps, B. F., Durish, N. D., Hale, A. M., Hein, C. D., Morton, B., Weaver, S. P., & Fritts, S. R. (2022b). An updated review of hypotheses regarding bat attraction to wind turbines. *Animals*, 12(3), 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>.

[22] Hale, A. M., Hein, C. D., & Straw, B. (2021). Acoustic and genetic data can reduce uncertainty regarding populations of migratory Tree-Roosting

bats impacted by wind energy. *Animals*, 12(1), 81. <https://doi.org/10.3390/ani12010081>.

[23] Guest, E. E., Stamps, B. F., Durish, N. D., Hale, A. M., Hein, C. D., Morton, B., Weaver, S. P., & Fritts, S. R. (2022b). An updated review of hypotheses regarding bat attraction to wind turbines. *Animals*, 12(3), 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>.

[24] R. Green, C. Hein, F. Oteri, M. Severy, A. Mahon, H. Farr y G. Harker-Klimes, «Efectos ambientales del desarrollo de energía eólica marina en los Estados Unidos: Recopilación de resúmenes de investigación educativa,» *U.S. Offshore Wind Synthesis of Environmental Effects Research*, 2022. tethys.pnnl.gov/seer.

[25] Crawford, M., Dority, D., Dillon, M. E., & Tronslad, L. M. (2023). Insects are attracted to the white bases of wind turbines: evidence of turbine imitations. *Naturalist of Western North America*, 83(2). <https://doi.org/10.3398/064.083.0208>.

[26] Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Straw, B., Thao, S., & DeGeorge, E. (2021). Influir en la actividad de los murciélagos al iluminar tenuemente las superficies de las turbinas eólicas con luz ultravioleta. *Animales*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.3390/ani12010009>.

[27] Sara P. Weaver, Cris D. Hein, Thomas R. Simpson, Jonah W. Evans, Ivan Castro-Arellano, Ultrasonic acoustic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines, *Global Ecology and Conservation*, Volume 24, 2020, e01099, ISSN 2351-9894, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01099>.

[28] Smallwood, K. S. (2020). Las muertes de murciélagos causadas por la energía eólica en EE. UU. aumentan con intervalos de búsqueda de muertes más cortos. *Diversidad*, 12(3), 98. <https://doi.org/10.3390/d12030098>.

[29] Joseph L Pettit, Joy M O'Keefe, El día del año, la temperatura, el viento y las precipitaciones predicen el momento de la migración de los murciélagos, *Journal of Mammalogy*, volumen 98, número 5, 3 de octubre de 2017, páginas 1236-1248, <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx054>.



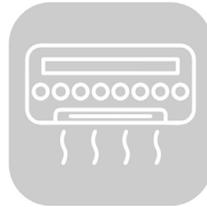
Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Desarrollo de un sistema SCADA con adquisición de temperaturas para comparación de eficiencia térmica de aires acondicionados

RESUMEN: En el presente trabajo se documenta el proceso de la instrumentación SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y programación gráfica para determinar las temperaturas ambiente exterior e interior, para un proyecto de comparación de la eficiencia energética a través de un análisis que relaciona las temperaturas y el consumo de energía, entre un sistema de acondicionamiento de aire convencional (on/off) y uno con tecnología inverter. Debido a que muchos fabricantes de estos sistemas no se apegan a la normatividad nacional de eficiencia energética y presentan información engañosa respecto a su consumo real de energía (kWh). Se realizaron experimentos con sistemas de aire acondicionado convencionales e inverter, monitoreando las temperaturas interior y exterior mediante termopares y un sistema SCADA, durante marzo y abril, con condiciones ambientales medias y altas. Los perfiles de temperatura reflejaron variaciones relacionadas con la irradiación solar y la actividad en el laboratorio. Se observaron cambios bruscos en los sistemas convencionales durante períodos de ocupación y desocupación, mientras que los sistemas inverter mostraron una similitud entre las temperaturas interior y exterior, atribuida al ajuste del variador de frecuencia. Este estudio ofrece valiosa información para optimizar el control y la eficiencia energética de los sistemas de aire acondicionado.

PALABRAS CLAVE: Consumo de energía, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Sensores tipo J, Gradiente de temperatura, Instrumentación.



Colaboración

Armando Campos Domínguez; Francisco López Huerta, FIEE Universidad Veracruzana; William Alejandro Castillo Toscano, FIMCN Universidad Veracruzana; Aldo Giovanni Vázquez Guzmán, MICRONA Universidad Veracruzana; Adrián Vidal Santo, FIMCN Universidad Veracruzana

Fecha de recepción: 20 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

ABSTRACT: This paper extensively discusses the process of implementing SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) instrumentation and graphical programming to effectively monitor indoor and outdoor ambient temperatures for an in-depth energy efficiency comparison project. The primary goal is to particularly analyze the temperature dynamics and discern any discrepancies in energy consumption between a traditional on/off air conditioning system and one equipped with advanced inverter technology. A significant issue highlighted throughout this research is the prevalence of ambiguous information provided by manufacturers regarding the actual energy consumption of their systems, often neglecting to adhere to national energy efficiency standards. The recorded temperature profiles vividly portrayed the fluctuations influenced by a multitude of factors, prominently including solar radiation variations and the dynamic activities within the laboratory environment. Of notable interest are the distinct temperature patterns observed between conventional and inverter systems. While conventional systems showcased pronounced temperature variations during both occupancy and vacancy periods, the inverter systems demonstrated a significantly more stable temperature profile. This stability can be attributed to the adaptive nature of frequency variable adjustments inherent to inverter technology. In conclusion, this comprehensive study offers invaluable insights into optimizing control strategies and effectively enhancing the energy efficiency of air conditioning systems.

KEYWORDS: Energy consumption, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), Type J sensors, Temperature gradient, Instrumentation.

INTRODUCCIÓN

El empleo de técnicas modernas de instrumentación, adquisición de datos y caracterización de gradientes de temperaturas, son

muy importantes para el monitoreo y control de la energía térmica y de la energía eléctrica de los aires acondicionados tipo convencionales on/off y tipo inverter [1]–[3]. Tales técnicas de adquisición de datos con equipos robustos y confiables son más precisas que el usar tarjetas DAQ con mayor incertidumbre en las mediciones y no se dispone en la actualidad de software de análisis a la medida en línea que permita realizar una mejor evaluación de los gradientes de temperaturas de los aires acondicionados y realizar a su vez una retroalimentación o en este caso una comparación de la eficiencia térmica y eléctrica.

Por lo anterior es importante el desarrollo de sistemas SCADA con software científico que permita analizar las mediciones de parámetros experimentales como las temperaturas del interior y exterior, consumo de energía, variación de la tensión, humedad relativa, de los aires acondicionados en cuestión [4]. Sin embargo, con este equipo SCADA, solo se acondicionaron sensores de temperatura, todo esto a través de la interfaz de programación en lenguaje gráfico (lenguaje-G) que se desarrolló para este fin.

La exigencia actual en la calidad de los aires acondicionados ha llevado a múltiples esquemas de mercadotecnia, eficiencia y costos de producción, hasta la implementación de estrategias técnico-económicas que regulen la calidad de estos [5]. Por ejemplo, en esta investigación a los climas convencional e inverter se le fueron realizadas algunas pruebas de mediciones en línea, mediante la adquisición de datos de temperaturas interior y exterior del recinto de análisis del laboratorio de sistemas energéticos, para el seguimiento o perfil de las temperaturas más importantes. La adquisición y análisis de datos de las temperaturas representa una herramienta de programación e instrumentación muy significativa para el monitoreo de la tendencia de dichas variables. Sin embargo, dicho análisis e interpretación de información no siempre es fácil, debido principalmente a la compleja distribución del comportamiento de los datos o de las herramientas de programación con software y también hasta de las mismas temperaturas dentro y fuera del recinto que fueron algunas veces irregulares [6]–[8].

Por ello en el presente trabajo se desarrolló una instrumentación y programación para monitorear las temperaturas de los aires acondicionados del recinto del laboratorio en primera instancia ya que a futuro se podrá realizar el análisis de diferentes marcas de aires acondicionados convencionales e inverter que conlleven una cantidad de información útil registrada ya sea en línea o fuera de línea para poder analizar los datos de temperaturas y correlacionarse con otros modelos en cuestión. Lo anterior es debido a que estudios recientes sugieren que el consumo eléctrico y eficiencia térmica o confort no es la real que presentan los fabricantes y esta investigación podría ser usada para dar seguimien-

to y detección de parámetros de muchos aires acondicionados que a simple vista no se pueden apreciar en la hoja de datos o de la mercadotecnia de la marca de distintos modelos sus consumos energéticos.

Debe ser breve, esclareciendo la naturaleza del problema de investigación estudiado con su correspondiente sustento teórico. Debe considerar la(s) hipótesis del trabajo, con citación bibliográfica específica (entre corchetes y en orden numérico); finalizando con los objetivos de la investigación. No debe representar más del 10% del documento total.

MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Data sheet Termopares tipo J. IEC 60584-1

Termopar Tipo J, comúnmente llamado Hierro/Constantán, es uno de los pocos termopares que se pueden utilizar de forma segura en atmósferas reductoras y este fue el seleccionado para la medición de las temperaturas interior y exterior del recinto

Data sheet Power Supply NI PS-15

Fuente de Alimentación Industrial de Montaje DIN, 24 VDC a 28 VDC, 5 A, 120W. La PS-15 puede alimentar sus sistemas CompactDAQ y CompactRIO, controladores de CompactRIO Single-Board, Smart Cameras, PCs de Pantalla Táctil (TPC) y más. Esta fuente de alimentación industrial es la que proporciona energía para el proceso de adquisición de datos.

Data sheet CompactRIO

Controlador CompactRIO (Legado), 8 Ranuras, CPU 400 MHz, 128 MB DRAM, Almacenamiento 256 MB, FPGA de 2M de Compuertas—El cRIO-9074 es un controlador embebido, ideal para aplicaciones avanzadas de monitoreo y control. Este controlador robusto es el sistema principal donde se instrumentan los módulos para la adquisición de datos de diferentes variables.

Data sheet NI-9211. Módulo de entrada de temperatura de la serie C.

Este módulo consta de 4 Canales, 14 S/s/canal, ± 80 mV—El NI-9211 incluye filtros anti-aliasing, detección de termopares abiertos y compensación de unión fría para medidas de termopares de alta precisión. El NI-9211 cuenta con calibración rastreada por NIST y doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje de modo común.

Métodos

Existen instrumentos de medición tradicionales analógicos y digitales que se caracterizan por realizar una o varias funciones específicas que no pueden ser modificadas tan fácilmente. Los instrumentos virtuales (vi) tienen una combinación de hardware y elementos de software, usados por una computadora personal (PC), para cumplir la función de un instrumento tradicional.

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste en sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs estándares en la industria e investigación proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.

El ambiente de programación donde se realizó esta instrumentación y adquisición de datos es LabVIEW. LabVIEW, es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, que en conjunto aceleran la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Clark et al. (1994) mencionan que LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico, que se ejecuta a velocidades comparables con programas compilados en C; también mencionan que un instrumento virtual es un módulo de software, realizado gráficamente para que parezca un instrumento físico; tiene un panel frontal que sirve como interfaz interactiva para entradas y salidas, un diagrama de bloque que es donde se realiza la programación y determina la funcionalidad del instrumento virtual. Resaltan estos autores, como característica muy importante del LabVIEW que, por ser conceptualmente simple, los estudiantes se pueden concentrar en el contenido básico del experimento, no perdiendo gran tiempo en actividades menos importantes, como lo es la recolección de datos.

La programación en LabVIEW es 100% gráfica, es decir, permite programar y desarrollar una aplicación sin utilizar texto. Este tipo de programas son la base de la instrumentación virtual. La programación gráfica se basa en cuatro elementos básicos: Usos de iconos, cables, gráficos, controles e indicadores y como se dijo la programación es con base a un panel frontal y diagrama de bloques, como se muestra en las Figuras 1 y 2.

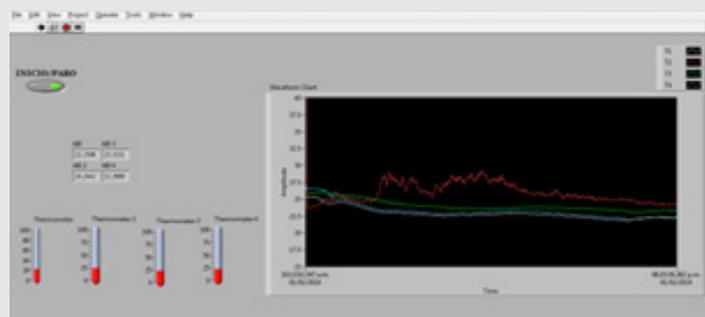


Figura 1 Panel frontal de adquisición de temperaturas.
Fuente: Elaboración propia.

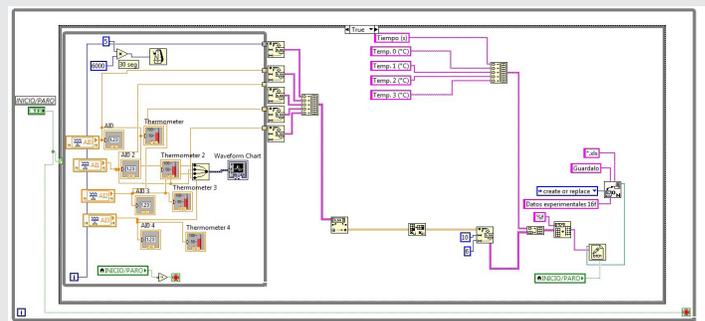


Figura 2 Diagrama de bloques que muestra la programación gráfica.
Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de caliente, tibio o frío que puede ser medida con un termómetro. Los termopares son unos de los sensores más comúnmente empleados en la medición de temperatura, ya que son relativamente económicos brindando exactitud y además pueden operar sobre un amplio rango de temperaturas.

Para la experimentación realizada en la comprobación de la funcionalidad de los termopares instalados y el monitoreo de las temperaturas en el programa en lenguaje G, se realizaron pruebas (una diaria con un horario de 11:40 a 19:40 hrs en promedio a intervalos de medición de 30 segundos), dichas pruebas fueron ejecutadas en el puerto de Veracruz, México en el laboratorio de Sistemas energéticos, tomando en cuenta que las temperaturas ambientales en el puerto en el mes de marzo y abril son medias y altas. En la Figura 3 se muestran los parámetros registrados para algunos días antes mencionados.

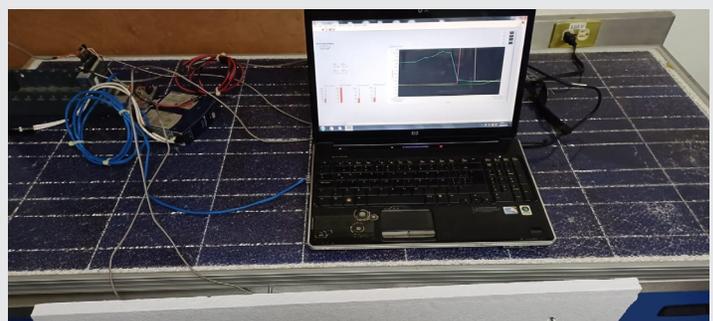


Figura 3 Dispositivos de instrumentación del sistema SCADA.
Fuente: Elaboración propia.

Se muestra en la Tabla 1 un histórico de temperaturas promedio de los últimos 3 años para el periodo de primavera-verano en el puerto de Veracruz.

Tabla 1. Temperaturas promedio en los años 2020, 2021 y 2022 [10]

AÑO	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
2020	26.33	30.19	29.06	28.1	27.83	27.26
2021	25.35	28.75	29.12	27.83	27.17	27.27
2022	24.32	28.29	30.05	27.37	27.33	27.27

Fuente: Elaboración propia 2020.

Perfiles de temperatura

Un perfil de temperatura es la representación gráfica de la medida de la temperatura de un gas o un sólido en función del tiempo, realizado a través de un instrumento específico compuesto por sensores de temperaturas y uno o más registradores de datos, que tienen como finalidad mostrar un panorama real del comportamiento térmico de un proceso.

Se muestra que los perfiles de temperatura del interior tratan de mantener la temperatura deseada, mientras que la temperatura exterior es la que no se puede manipular ya que depende de las condiciones climatológicas de los días donde se realizaron las corridas experimentales [11], [12].

Instalación y conexión de la instrumentación

Cada uno de los termopares utilizados en este proyecto se colocaron de la siguiente manera: uno en medio de los dos aires acondicionados (convencional e inverter) y otro en la parte exterior del recinto de prueba a climatizar, de tal modo que nos permitiera monitorear las temperaturas en los puntos de mayor interés; el equipo CompactRIO 9074, su fuente de alimentación PS-15 y el módulo de acondicionamiento de termopares NI-9215 estuvieron en el interior interconectados, monitoreando las temperaturas cada medio minuto (30 segundos), estos equipos estuvieron ubicados en una esquina del recinto, junto a una computadora portátil donde se programó una interfaz virtual para registrar, graficar y monitorear las temperaturas tanto del interior como del exterior, todo esto con el fin de poder tener un perfil de temperatura de referencia entre la temperatura ambiente exterior y la temperatura deseada por el usuario con los equipos de aire acondicionado tipo convencional e inverter.

Los dispositivos empleados en la instrumentación para el sistema SCADA se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 4.

Tabla 2 Dispositivos de la Instrumentación.

Cantidad	Dispositivo
1	Computadora Portátil. Procesador Intel(R) Core (TM) 2 Duo CPU T6500 @2.10GHz, Memoria RAM con 4GB Sistema operativo a 32 bits.
1	Chasis CompactRIO 9074. 8 slots integrados a 400 MHz en tiempo real y 2M en compuerta FPGA.
1	Fuente de poder NI PS-15. 24 VCD y 5 A. 120 VCA. National Instruments
1	Módulo NI-9211 para medición de termopares tipo J de cuatro canales.
4	Termopar tipo J; temperatura de 0 a 760 °C; longitud de cable, 2 m.

Fuente: Elaboración propia 2020.

El panel frontal quedó de la siguiente manera: en el panel frontal al presionar el botón Inicio (1) se empiezan a registrar o almacenar los datos de las temperaturas

para 4 canales, pero solamente se usaron 2 para monitorear las temperaturas del interior y del exterior.

Se muestran los datos con leyendas AIO hasta la AI4 (2) con valores enteros de doble precisión y más abajo unos gráficos de bulbos de temperatura indicando también estos datos como indicadores (3).

Y del lado derecho se muestran las gráficas de la evolución de los perfiles de las temperaturas tanto interior como exterior (4).

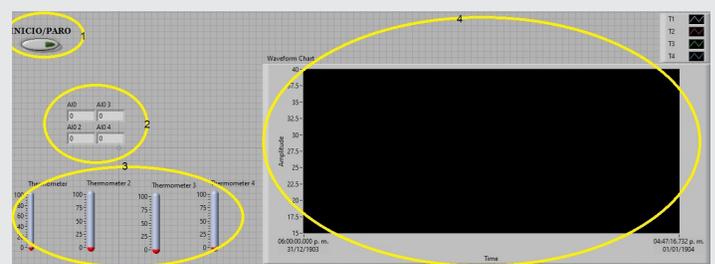


Figura 4 Panel frontal.

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama de bloques de la Figura 5, se explica cómo se realizó la programación del lenguaje G.

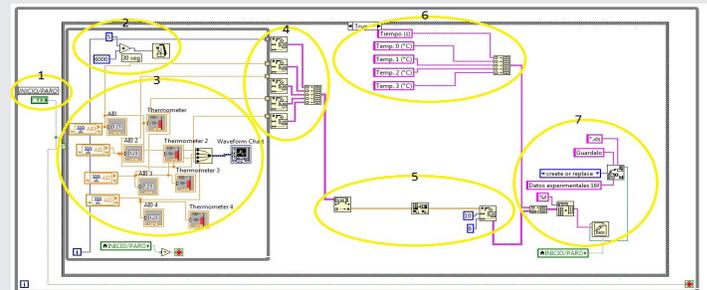


Figura 5 Diagrama de bloques.

Fuente: Elaboración propia

1. Con este botón de Inicio-Paro se realiza la adquisición y la detención de los datos.
2. En esta parte se ajustaron los valores para que se adquirieron los datos a 30 segundos 30,000 milisegundos.
3. Aquí se introdujeron los canales del CompactRIO 9074 y del módulo 9215 para las 4 señales de los termopares, con sus indicadores numéricos y gráficos para cada uno, luego con un icono de colector las 4 señales de los datos se envían para el icono de graficar Waveform Chart. Todos estos 3 pasos están dentro de un ciclo While donde Inició-Paro es quien los controla.
4. Tanto los datos del tiempo, con círculo número 2 y de las temperaturas en el círculo número 3, se convierten mediante un arreglo en una cadena de datos (string) y poderlos manipular en el círculo 5.
5. Habiendo manipulado la cadena de datos string se deben nuevamente convertir a números y presentarlos en 2 dimensiones. Posteriormente, esos números arreglados se convierten a cadena fraccionaria con ancho de 10 y dígitos de precisión 6.

6. Los elementos de texto Tiempo (s) y Temperatura 0 hasta Temperatura 3 (°C) serán los nombres de los datos que se almacenarán en un Tabla de excel y que se envían a una construcción de tipo arreglo.

7. De los datos en cadenas fraccionarias de círculo 5 y 6 se envían a un nuevo icono de arreglo para la elaboración de una matriz de datos, después a un icono para la creación de ese arreglo a datos en cadena de hoja de cálculo de excel; aquí se indica que se guarda el archivo en ese formato, esto ocurre al presionar el botón "paro".

Finalmente, al presionar paro en el panel frontal y esperar el último monitoreo de los 30 segundos quedará terminada la adquisición de datos de la prueba experimental en cuestión.

RESULTADOS

Una vez terminado el proceso de adquisición de datos de las corridas experimentales realizadas en varios días y para cada aire acondicionado tipo convencional e inverter, se usó el programa con el instrumento virtual (vi) explicado anteriormente para la comprobación de la funcionalidad de los termopares instalados y el monitoreo de las temperaturas con el sistema SCADA, se realizaron varias pruebas (una diaria con un horario de 11:30 hr a 19:40 hr aproximadamente), tomando en cuenta que las temperaturas ambientales en el puerto en el mes de marzo y abril son medias y altas. En las siguientes figuras mostramos algunos de los comportamientos de los perfiles de temperaturas registrados.

De la Figura 6 a la 9, se muestran los perfiles de temperatura de los sistemas de aire acondicionado on-off e inverter en operación durante la experimentación, con las temperaturas Interior (T1) y Exterior (T2) de diferentes fechas de marzo de 2023.

El perfil de temperatura exterior (línea roja) presenta un comportamiento relacionado con la distribución de la irradiación solar. Mientras que, el perfil de temperatura interior (línea negra) está relacionada con la dinámica del uso del laboratorio con respecto a número de estudiantes durante el periodo de medición número, de aperturas de puerta que incrementan la ganancia térmica en el interior, equipos electrónicos como laptop, video proyector y misceláneos que se usaron.

Las Figuras 6 y 7 presentan los parámetros de perfil de temperaturas del aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 06 y 14 de marzo de 2023. Tales distribuciones de temperatura corresponden al periodo de utilización del aire acondicionado. La temperatura espacial interior fue de alrededor de 23 °C cuando en el equipo se estableció una temperatura de set-point de 18 °C. Se resalta el cambio del comportamiento en periodos de desocupación del laboratorio durante el cual el aire acondicionado se apagaba. Esto ocasionó un incremento abrupto en la temperatura es-

pacial interna. La Figura 6 presenta tal incremento justo antes de las 14 horas (como lo indica la flecha azul insertada en la Figura 6).

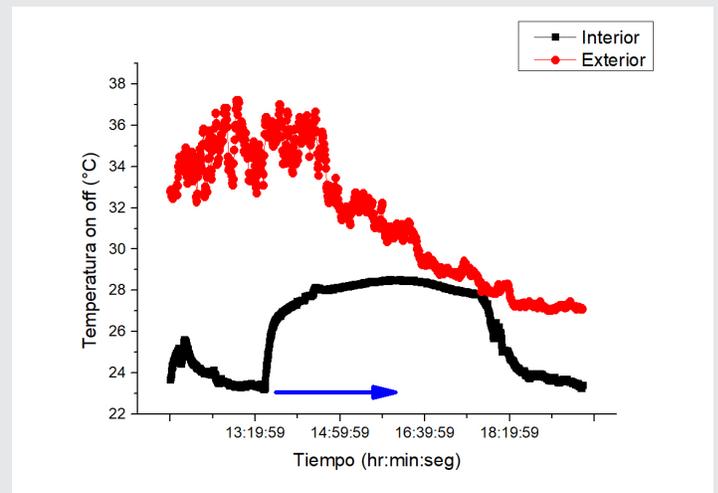


Figura 6 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 06 de marzo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la Figura 7, el perfil de temperatura espacial interior muestra un decremento abrupto después de las 16 horas (como lo indica la flecha azul insertada en la Fig. 7). Eso coincide con el encendido del aire acondicionado. Sin embargo, estos comportamientos preliminares resultan parciales debido al periodo de ocupación y desocupación del laboratorio. Por lo tanto, se requirió monitorear la temperatura en el laboratorio en periodos de aplicación homogéneos como se muestra en los siguientes resultados. Este tipo de estudio de monitoreo de temperatura es de utilidad para controlar sistemas de aire acondicionado on-off. Por ejemplo, las referencias [13], [14] analizan una estrategia óptima de control on-off para mejorar el proceso de utilización del aire acondicionado.

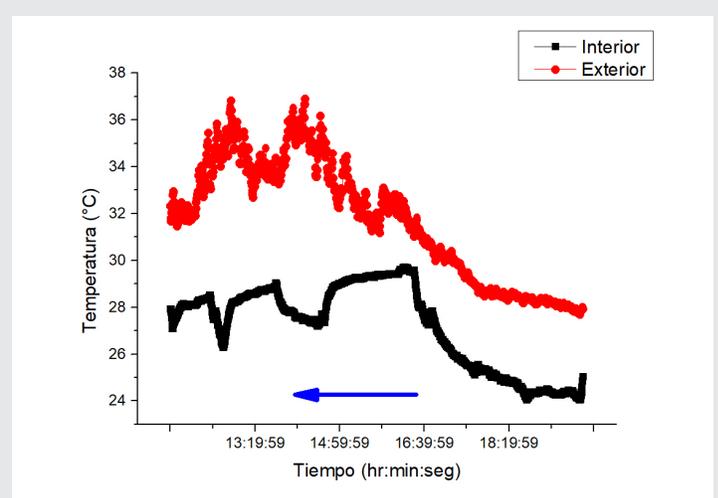


Figura 7 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado on-off, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 14 de marzo. Fuente: Elaboración propia

Las Fig. 8 y 9 exhiben los parámetros que describen el perfil de temperaturas tanto del aire acondicionado inverter en el interior (T1) como en el exterior (T2), registrados el 05 y el 13 de marzo de 2023, respectivamente. Estos registros representan las condiciones de temperatura durante el uso del sistema de aire acondicionado. La temperatura espacial interior fue de alrededor de 25 °C cuando en el equipo se estableció una temperatura de set-point de 18 °C.

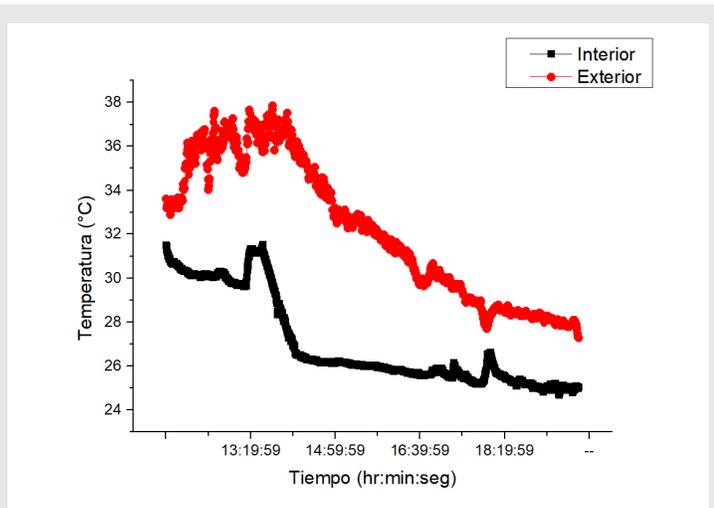


Figura 8 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado inverter, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 13 de marzo. Fuente: Elaboración propia.

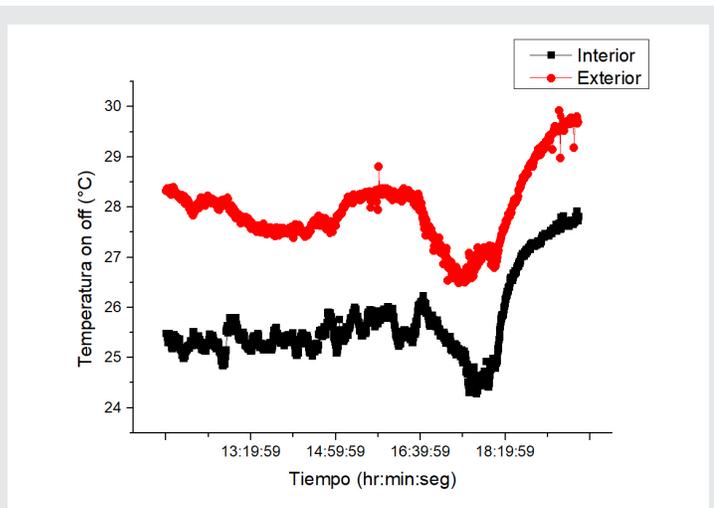


Figura 9 Parámetros de perfil de temperaturas aire acondicionado inverter, Interior (T1) y Exterior (T2) de fecha 5 de marzo 2024. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la distribución de temperaturas interior, como se muestra en la Figura 8, se asemeja a la registrada en el exterior, un fenómeno que también se refleja en la Fig. 9. Esta similitud en el comportamiento se atribuye al ajuste característico del variador de frecuencia del sistema de aire acondicionado inverter [15].

CONCLUSIONES

En este artículo se implementó un sistema SCADA con una instrumentación y programación para el muestreo en línea de temperaturas dentro y fuera de un recinto. Los resultados mostraron que las temperaturas tanto la interior como la exterior pueden proporcionar información sobre la evolución del proceso del confort de la temperatura dentro del inmueble, incluidos los efectos de la temperatura exterior y la posible aparición de no linealidades dentro de la temperatura interior y en algunas ocasiones a mecanismos como la falta de energía eléctrica, o apertura de puerta, etc., debido a los cambios en el perfil de enfriamiento o confort del recinto que se tenía en las pruebas.

Si bien los resultados del procesamiento de los datos de los perfiles de temperaturas se centraron en los gradientes dentro y fuera del mismo, la forma de estos perfiles tiene un enfoque para la adquisición de los datos de las temperaturas de equipos tipo mini Split tipo inverter y tipo convencional y que esta investigación se puede utilizar para complementar la evolución de los equipos de otras marcas y modelos.

En este trabajo nos hemos centrado principalmente en la instrumentación y la programación en lenguaje G para monitorear las temperaturas dentro y fuera de un recinto para tener un confort de temperatura deseada, todo esto usando equipos y software apropiados. Sin embargo, se reconoce que para algunos de ellos se necesita saber si son compatibles o si se requiere de cierto grado de capacitación.

Como se indicó, previamente en la introducción, la aplicación de estos sistemas de adquisición de datos es más confiable, y logran monitorear, almacenar, graficar, etc., los datos de temperaturas como se explicó en las secciones anteriores.

Los resultados de todas las pruebas en línea deberían conducir a una caracterización más completa de los equipos de aires acondicionados tipo inverter y tipo convencional, pero esto es ideal para otro tipo de investigación más profunda.

Finalmente, dada la complejidad del comportamiento de los perfiles de temperaturas y las formas del comportamiento de los días, que no siempre fueron los mismos al igual que se alternó la operación de los equipos de aire acondicionado (on-off e inverter), se entiende que el análisis de temperaturas en línea si es posible con la implementación de este trabajo experimental, pero debe usarse sólo como un indicador rápido de la dinámica de las temperaturas y las determinaciones resultantes (perfiles de temperaturas) debe complementarse fuera de línea para poder tener y dar un criterio de la eficiencia térmica para los equipos de aire acondicionado bajo pruebas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Laboratorio Sistemas Energéticos de la Facultad de Ingeniería Región Veracruz de la Universidad Veracruzana, por dejarnos usar sus instalaciones, así como a la Dirección de Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias Navales del Programa Educativo Ingeniería Mecánica Eléctrica, también al cuerpo académico UV-541 por el apoyo brindado en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Rizzardi, S. Sicari, and A. Coen-Porisini, "Towards rapid modeling and prototyping of indoor and outdoor monitoring applications," *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 41, no. November 2023, p. 100951, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100951.
- [2] Y. Zhang et al., "Experimental study and performance evaluation of an air source heat pump (ASHP) system with a frost-free evaporator," *J. Clean. Prod.*, vol. 448, p. 141469, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141469.
- [3] F. D. Agbajor and M. C. Mewomo, "Green building research in South Africa: A scoping review and future roadmaps," *Energy Built Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 316–335, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2022.11.001.
- [4] L. O. Aghenta and M. T. Iqbal, "Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thinger.IO and ESP32 Thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, p. 822, Jul. 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [5] P. He, P. Liu, Y. (Lucy) Qiu, and L. Liu, "The weather affects air conditioner purchases to fill the energy efficiency gap," *Nat. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-33531-2.
- [6] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, S. Setunge, and L. Shi, "A review of internal and external influencing factors on energy efficiency design of buildings," *Energy Build.*, vol. 216, p. 109944, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109944.
- [7] T. C. Quevedo, M. S. Geraldi, A. P. Melo, and R. Lamberts, "Benchmarking energy consumption in universities: A review," *J. Build. Eng.*, vol. 82, p. 108185, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.job.2023.108185.
- [8] A. Nita, Y. Sunityoso, A. R. Tiara, and A. A. Kim, "Exploring decision making factors in public buildings' energy efficiency projects," *Energy Build.*, vol. 298, p. 113563, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113563.
- [9] D. L. Clark, R. H. Cockrum, E. T. Ibrahim, and R. F. Smith, "Simulation and emulation of biomedical instrumentation systems using object-oriented-programming," in *Proceedings of WESCON '94*, 1994, no. c, pp. 420–425, doi: 10.1109/WESCON.1994.403561.
- [10] NASA, "Prediction Of Worldwide Energy Resources," 2024. <https://power.larc.nasa.gov/> (accessed Feb. 20, 2024).
- [11] J. Yang, Y. Yang, D. Sun, C. Jin, and X. Xiao, "Influence of urban morphological characteristics on thermal environment," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 72, no. March, p. 103045, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103045.
- [12] M. Zhang, S. Tan, C. Zhang, and E. Chen, "Machine learning in modelling the urban thermal field variance index and assessing the impacts of urban land expansion on seasonal thermal environment," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 106, p. 105345, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105345.
- [13] M. Al-Azba, Z. Cen, Y. Remond, and S. Ahzi, "An Optimal Air-Conditioner On-Off Control Scheme under Extremely Hot Weather Conditions," *Energies*, vol. 13, no. 5, p. 1021, Feb. 2020, doi: 10.3390/en13051021.
- [14] D. Hu, C. Qiu, D. Lu, J. Wang, H. Huang, and H. Xue, "An intelligent thermal comfort control strategy for air conditioning of fuel cell vehicles," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 248, p. 123286, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123286.
- [15] A. Esmael Nezhad, A. Rahimnejad, and S. A. Gadsden, "Home energy management system for smart buildings with inverter-based air conditioning system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 133, no. June, p. 107230, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107230.

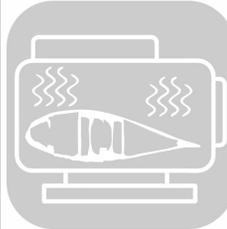




Multidisciplinario
e
ingenierías

Ingeniantes

Exploración de tecnologías para el reciclaje de palas de aerogeneradores



Colaboración

Reyes Antonio Vergara-Quezada; Felipe de Jesús Pozos-Texon, Tecnológico Nacional de México campus Veracruz; Juan Antonio Pinilla-Rodríguez Carlos Javier Gasca-Caballero; Claudia Reyes-Olán, Universidad Cristóbal Colón

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 03 de junio de 2024

RESUMEN: El presente estudio aborda el desafío de reciclar aspas de aerogeneradores al final de su vida útil a través de la pirólisis, una técnica prometedora para la recuperación eficaz de fibra de vidrio y carbono. Al enfocarse en la separación efectiva de estos materiales de las resinas termoendurecibles, el proceso propuesto no solo reduce significativamente los residuos, sino que también promueve la reintegración de materiales reciclados en la economía circular, especialmente dentro de la industria eólica. La investigación anticipa una alta pureza en las fibras recuperadas, conservando una considerable resistencia mecánica, lo que amplía su potencial de reutilización en diversas aplicaciones industriales. Además, el estudio destaca la posibilidad de aprovechar los subproductos de la pirólisis, como gases combustibles y residuos sólidos, para la generación de energía y la creación de nuevos materiales. Un análisis preliminar del ciclo de vida sugiere que este enfoque de reciclaje podría ofrecer una reducción notable del impacto ambiental en comparación con métodos de disposición convencionales, reafirmando el compromiso de la energía eólica con la sostenibilidad. Este estudio subraya el potencial transformador de aplicar técnicas de pirólisis en la gestión de desechos de la industria eólica, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: Reciclaje de palas eólicas, pirólisis, fibras de vidrio y carbono, economía circular, sostenibilidad en energía eólica.

ABSTRACT: The present study addresses the challenge of recycling end-of-life wind turbine blades through pyrolysis, a promising technique for the efficient recovery of glass and carbon fibers. By focusing on the effective separation of these materials from thermosetting resins, the proposed process not only significantly reduces waste, but also promotes the reintegration of recycled materials into the circular economy, especially within the wind industry. The research anticipates high purity in the recovered fibers, while retaining considerable mechanical strength, which expands their potential for reuse in various industrial applications. In addition, the study highlights the possibility of taking advantage of pyrolysis by-products, such as combustible gases and solid residues, for energy generation and the creation of new materials. A preliminary life cycle analysis suggests that this recycling approach could offer a notable reduction in environmental impact compared to conventional disposal methods, reaffirming wind energy's commitment to sustainability. This study underscores the transformative potential of applying pyrolysis techniques in wind industry waste management, aligning with global sustainability and climate change reduction goals.

KEYWORDS: Wind blade recycling, pyrolysis, glass and carbon fibers, circular economy, sustainability in wind energy.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el mundo está en búsqueda de generar la menor contaminación posible, con el objetivo de reducir el calentamiento global. Esto le abre las puertas cada vez más a las energías renovables y limpias, sin embargo, se conoce que no son 100% limpias, debido a los factores de fabricación, transporte, entre otros.

La energía eólica se refiere a aprovechar la energía cinética del viento, transformarla en energía mecánica y de esta forma, convertirla en energía eléctrica.

La energía eólica cada vez se expande más por todo el mundo, se espera que para el 2030, la energía eólica sustente el 30% de toda la demanda de electricidad en Europa, actualmente sustenta el 15% [1].

El Informe Eólico Global, publicado por el Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, 2023), reveló que la capacidad instalada global de energía eólica ha alcanzado los 906 GW. Esta capacidad instalada ha contribuido a la reducción anual de 1.2 billones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) [2].

En Estados Unidos, se remueven aproximadamente 8000 palas cada año del 2021 al 2025. En Europa se remueven alrededor de 3,800 palas anualmente.

Las turbinas eólicas están diseñadas para tener una vida de 20 a 25 años. Estas están formadas por los cimientos, una torre, las tres palas, un subsistema de transmisión y un generador. El 85% de una turbina eólica está constituida por materiales metálicos que pueden ser reciclados, el otro 15% lo constituyen las palas, que están hechas de compuestos de polímeros reforzadas con fibra de vidrio. Estas palas están fabricadas para funcionar por décadas, sin embargo, no se pueden reciclar fácilmente, lo que las convierte en desechos. Un MW de capacidad instalada puede generar de 12 a 15 toneladas de desechos. Lo que hace muy complicado el reciclar las palas de las turbinas, es justamente su proceso de fabricación, pues en el procedimiento de curado de las palas, la resina termoendurecible se entrecruza inevitablemente con las fibras de refuerzo, lo que dificulta su recuperación [3].

En este contexto, la mayoría de las partes de una turbina eólica (góndola, cimientos y la torre) están fabricadas de concreto y metales, estas pueden ser reciclados con un riesgo ambiental bajo. Por otra parte, aun no hay un método de reciclaje establecido o estandarizado para las palas que comúnmente están fabricadas de fibra de vidrio reforzada con compuestos de polímero [4].

Cuando hablamos de parques eólicos, hay que tener en cuenta que estos no están formados solo de 1 o 2 turbinas eólicas. El parque eólico La Venta II, ubicado en Oaxaca (Figura 1), cuenta con una potencia nominal total de 83,300 kW, lo que se traduce a 98 turbinas eólicas de la marca Gamesa con una potencia de 850 kW cada una. Teniendo en cuenta que México cuenta con 8 parques eólicos, y solo La Venta II tiene 294 palas, ¿Cuántas palas se tendrán actualmente en todos los parques eólicos de México?, o incluso, ¿Cuántas palas existirán en todo el mundo?



Figura 1. Parque eólico La Venta II - Oaxaca, México.

Fuente: El Universal, 2021.

Una vez cumplido su tiempo de vida útil, a las palas eólicas se les considera desechos (Figura 2), esto debido a que están fabricadas de materiales que son difíciles de reciclar; considerando también que no tienen las mismas características dimensionales debido a que varían debido a su capacidad de empuje y marca del fabricante, por ejemplo, las de parque de La Venta II pesan 1,900 kg según la hoja de datos, el modelo del aerogenerador es G52-850 kW [5]. Por lo que podemos deducir que dentro de unos años el parque de La Venta II producirá una cantidad de 558.6 toneladas de desechos.



Figura 2. Pala de aerogenerador eólico.

Fuente: BBVA, 2023.

Por todo lo anterior, consideramos que es de gran importancia la presente investigación para aportar bases teóricas para reciclar todas estas palas, o al menos, una gran cantidad de ellas, y de esta forma se dejen de considerar desechos y que la energía eólica se siga considerando una energía limpia [5].

Uno de los mejores años en la industria de la energía eólica ha sido el 2020, se registró la capacidad instalada en turbinas eólicas de más de 110 GW, logrando así una capacidad instalada total de 732 GW [6].

Estas turbinas eólicas suelen instalarse en conjunto, formando un sistema de una gran cantidad de turbinas eólicas, dando el nombre de parques eólicos. Estos obviamente se instalan en ubicaciones favorables, detrás de cada parque eólico hay un sinnúmero de investigaciones, como: potencial eólico, rentabilidad, impacto ambiental, impacto social, entre otros.

La generación de electricidad mediante la tecnología eólica produce una contaminación mucho menor que una generación de electricidad con fuentes convencionales [7]. Durante los últimos años se han instalado muchos parques eólicos, los cuales han dado de que hablar, ya que mucha gente está en desacuerdo con estos, ya que creen que las turbinas eólicas tienen un gran impacto visual negativo al paisaje; sin embargo, no todos tienen esta forma de ver las cosas, ya que otra gran parte de la población les parece que los parques eólicos se ven hermosos.

Dentro de la energía eólica, tenemos distintas divisiones de instalaciones de turbinas eólicas: las turbinas eólicas de eje vertical y las turbinas eólicas de eje horizontal Figura 3, siendo esta última la más popular en todo el mundo.

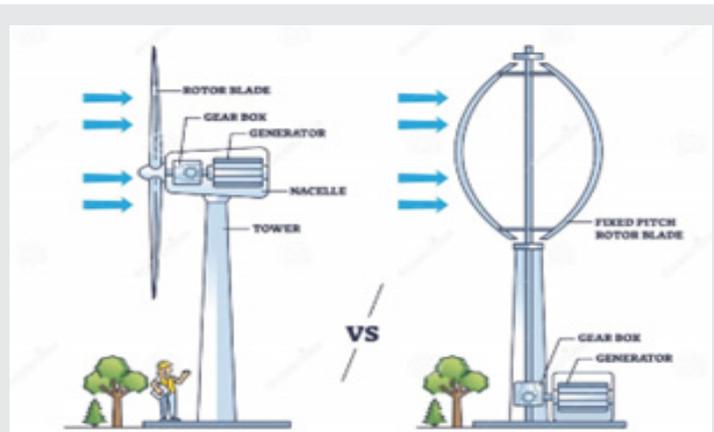


Figura 3. Aerogenerador eólico horizontal (izq) y vertical (der). Fuente: Dreamstime, 2024.

Las turbinas eólicas de eje horizontal son las más populares debido a que son más factibles a la hora de generar energía en grandes cantidades. Estas turbinas son las que conforman la mayoría de los parques eólicos alrededor del mundo; los parques eólicos conformados por este tipo de turbinas pueden ser de dos tipos: offshore y onshore.

Los parques eólicos onshore son los más comunes hasta la fecha, estos son los que se instalan sobre tierra. Mientras que los parques eólicos offshore son aquellos que se instalan sobre el mar.

Como se ha mencionado, el planeta está en un momento crucial donde se busca reducir la contaminación

debido al calentamiento global que está viviendo el mundo. La energía eólica cuenta con la gran ventaja que su generación tiene emisiones de gases de efecto invernadero prácticamente nulas comparada con otro tipo de generación de energía [8].

Dentro de las normas y certificaciones de las turbinas eólicas se debe tener en cuenta que los parques eólicos deben funcionar sin supervisión y permanecer dentro de sus límites de diseño durante 20 años bajo una amplia gama de condiciones, incluyendo eventos extremos. Además de que cada sitio cuenta con eventos distintos que hay que tener en cuenta a la hora de hacer la selección de turbina eólica más conveniente para el lugar.

El gran tamaño de las palas genera desventajas que se mencionan a continuación:

- Dificultad para hacer pruebas de calibración y de vida útil.
- Dificultad de transporte, debido a su peso y dimensiones.
- Dificultad geográfica de manejo (montañas en tierra o el oleaje en el mar).

Estas desventajas, dificultan el reciclado de las palas de los aerogeneradores cuando cumplen su tiempo de vida, aunado a que los métodos de reciclado aun son complejos y costosos.

La descripción de materiales de que constituyen un aerogenerador es crítica para analizar diferentes opciones de gestión, una vez alcanzado el final de su vida útil. Hoy en día, la mayoría de los componentes de las turbinas eólicas son reciclables, con una tasa de reciclabilidad que equivale al 85-90%. El metal de las torres se puede procesar como materia prima para la fabricación de acero, mientras que el hormigón de los cimientos se utiliza para materiales de construcción, construcción de carreteras o incluso se recicla para construir nuevas turbinas eólicas [9]. Sin embargo, lo que es un desafío es el reciclaje de las palas de los aerogeneradores.

Las palas de las turbinas eólicas se construyen a partir de laminados multicapa, hechas de fibra de vidrio o de carbono, y una matriz de polímero termoestable, unidas por capas adhesivas y parcialmente rellenas de espuma. El material termoendurecible dificulta el reciclaje de estas. El que sea tan difícil poder reciclar las palas de los aerogeneradores se ha vuelto un temor, ya que pueden generar un impacto negativo al cambio climático. Por esta misma razón plantea riesgos de contaminación del suelo y del agua durante cientos de años, ya que las palas contienen materiales no biodegradables.

Las palas tienen una estructura compuesta de resinas poliméricas reforzadas con fibras. Según los datos reportados en literatura, la fibra de vidrio y la

fibra de carbono son los tipos de fibras más comunes utilizadas en la producción de palas debido a su alto rendimiento mecánico y alta estabilidad térmica y química. Este tipo de fibras se pueden utilizar en una matriz separada o como compuestos híbridos para dotar a las palas de nuevas propiedades. Sin embargo, y debido a la preocupación ambiental de este tipo de fibras, las fibras naturales como la madera de balsa han recibido cierta atención recientemente debido a su bajo costo, disponibilidad y eco ambientales. Sin embargo, la madera de balsa todavía no se utiliza mucho debido a limitaciones relacionadas con la capacidad de carga, la baja estabilidad térmica y química y la alta absorción de humedad. Por lo tanto, la fibra de vidrio sigue siendo el tipo de fibra más utilizada en la fabricación de palas, seguida de la fibra de carbono. Aunque la fibra de carbono tiene una fuerza de resistencia a la abrasión excepcionales en comparación con la fibra de vidrio, es más caro en comparación con la fibra de vidrio, por eso la fibra de vidrio es la mejor opción para las palas [10].

La resina representa la materia responsable del ensamblaje y adhesión de las capas de fibra entre sí. La resina de poliéster insaturado se encuentra entre las resinas más utilizadas en esta aplicación debido a su bajo costo, rentabilidad y durabilidad. Sin embargo, la resina de poliéster insaturado contiene principalmente un compuesto de estireno altamente tóxico (según los definidos por la Agencia Europea de Productos Químicos y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) que puede causar contaminación del suelo durante su eliminación en vertederos.

Aunque no hay estadísticas específicas disponibles sobre palas de turbinas eólicas que contengan una configuración de fibra de carbono con resina de poliéster insaturado, la situación está empeorando con el tiempo debido al aumento de la demanda de energía eólica, esto implica un aumento de acumulación de palas de turbinas eólicas. Se espera que para 2050 se alcancen los 43 millones de toneladas de desechos de palas de turbinas eólicas.

Según las soluciones de reciclaje de palas de turbinas eólicas desarrolladas recientemente, la fracción de fibras, incluida la fibra de carbono, generalmente se extraen de estos desechos quitando la resina que cubre la superficie de las fibras mediante enfoques mecánicos, térmicos y químicos.

Es importante mencionar que aún no existen soluciones de reciclaje bien establecidas para determinadas piezas. Según GenVind, se desmantelan aproximadamente 10 toneladas de palas de turbinas eólicas cuando se desinstala 1 MW de capacidad instalada de energía eólica. Para poder combatir este desafío, se tiene como propuesta principal la

pirólisis, ya que, dado al proceso, se piensa que se puede llegar a separar la fibra de vidrio de la resina y de esta forma, darle una segunda vida a la materia utilizada. En este sentido, la pirólisis surge como la técnica de reciclado óptimo debido a que es un tipo de conversión termoquímica que implica la conversión de hidrocarburos complejos en compuestos de valor agregado utilizando calor y poco o nada de oxígeno [11].

MATERIAL Y MÉTODOS

El enfoque propuesto se centra en el diseño y mejora de un sistema de reciclaje para palas de turbinas eólicas utilizando el método de pirólisis. Este estudio se enfocará tanto en la recuperación efectiva de materiales como en la evaluación de la factibilidad técnica y ambiental del método.

Se escogerán palas de turbinas eólicas que hayan terminado su ciclo de vida, en particular modelos habituales como el G52 de 850 kW, que pesan cerca de 1,900 kg cada una. Estas palas se componen principalmente de resina termoestable y fibras de refuerzo, tales como fibra de vidrio o carbono.

Se empleará un reactor de pirólisis apto para el tratamiento térmico de las palas sin presencia de oxígeno. Este equipo deberá ser capaz de alcanzar y sostener las temperaturas necesarias para la descomposición adecuada de los compuestos poliméricos y la extracción de las fibras de refuerzo.

Para analizar los materiales recuperados y los subproductos del proceso de pirólisis, se utilizarán técnicas como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR), la cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) y análisis termogravimétricos (TGA).

Las palas serán primeramente seccionadas en partes manejables mediante herramientas industriales de corte. Luego, estas secciones serán limpiadas y preparadas para garantizar la uniformidad en el tamaño de las muestras para la pirólisis.

Se realizarán diferentes pruebas a diferentes temperaturas para obtener la optimización de recuperación de fibras y la minimización de desechos. Este proceso será monitoreado de cerca para evaluar la eficiencia en la separación y la calidad de los materiales obtenidos.

Las fibras de vidrio y carbono recuperadas serán examinadas para valorar su pureza, resistencia mecánica y viabilidad para ser reutilizadas en nuevos productos o aplicaciones. Igualmente, los subproductos de la pirólisis, como gases y residuos sólidos, serán estudiados para entender su impacto ambiental y potencial de reutilización.

Se llevará a cabo un análisis del ciclo de vida para medir el impacto ambiental del sistema de reciclaje sugerido, comparándolo con el depósito habitual de las palas en vertederos. Este análisis servirá para hallar puntos de mejora y confirmar la viabilidad del método de reciclaje propuesto Figura 4.

como metano y etano, que podrían utilizarse como fuentes alternativas de energía. Además, se espera que los residuos sólidos, compuestos mayormente por cenizas carbonosas y trazas de metales, encuentren usos en sectores como la construcción o en la creación de nuevos compuestos.

Desde una óptica ambiental, el esquema de reciclaje propuesto promete ser una alternativa más ecológica en comparación con el depósito tradicional en vertederos. Los estudios preliminares del análisis de ciclo de vida indican una disminución notable en el impacto ecológico, atribuible en gran medida a la reutilización de materiales y la valorización de los subproductos, aspecto vital para reducir la huella de carbono vinculada al ciclo de vida de las infraestructuras eólicas.

En cuanto a la eficacia global del proceso de reciclaje, se anticipa una tasa satisfactoria que refleje tanto la calidad de los materiales obtenidos como la reducción de desechos producidos. Esta eficiencia, proyectada en un 75%, señalaría un método de reciclaje efectivo y sustentable para las palas de turbinas eólicas Tabla 1.

Tabla 1 Estratificación por grupos

Tipo de Material	% de eficacia del proceso de pirólisis	% de Extracción	% de conservación de propiedades mecánicas	Subproductos de la pirólisis
Fibra de vidrio	75	95	85	Metano, etano y cenizas.
Fibras de carbono		98	90	

Fuente: Elaboración propia (2020).

Estas expectativas destacan el potencial de la estrategia planteada para enfrentar el reto del reciclaje de componentes eólicos al término de su vida útil, marcando un progreso significativo hacia la gestión sustentable de residuos en el sector eólico y contribuyendo a los esfuerzos globales por fomentar prácticas renovables más respetuosas con el medio ambiente.

CONCLUSIONES

El innovador proyecto de investigación propone un enfoque novedoso para reciclar aspas de aerogeneradores mediante pirólisis, ofreciendo una posible solución a uno de los principales retos en la sostenibilidad de la energía eólica. Los anticipados resultados teóricos se resumen de la siguiente manera:

- Se prevé que el método de pirólisis para recuperar fibras de vidrio y carbono de aspas eólicas sea prometedor, con una pureza proyectada que indica una exitosa separación de las resinas termoendurecibles.
- Este avance no sólo fomenta la minimización de desechos, sino que también, facilita la reintegración de materiales valiosos en el mercado, impulsando la economía circular en la industria eólica.
- Se espera que la integridad de las fibras recuperadas conserve gran parte de su resistencia mecánica original.

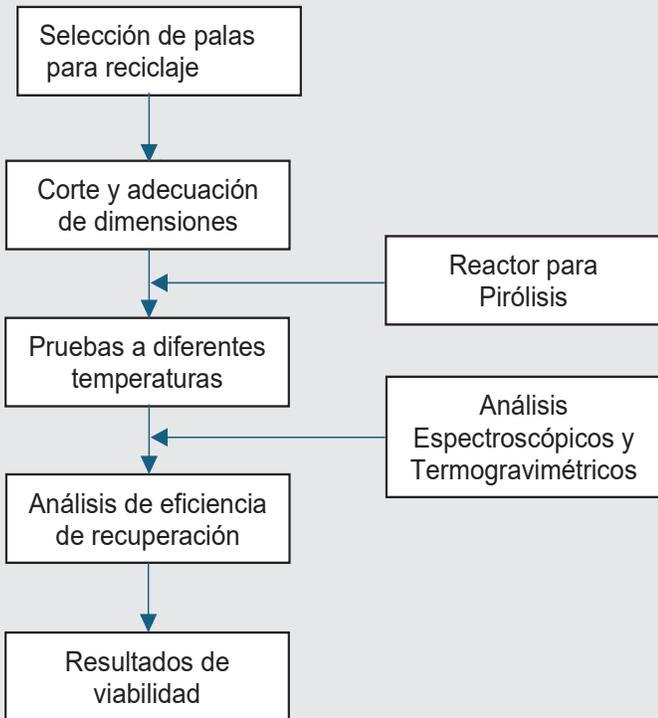


Figura 4. Propuesta metodológica para el reciclaje de palas eólicas.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A través del marco planteado para el reciclaje de palas eólicas mediante pirólisis, encontramos resultados alentadores en aspectos fundamentales.

Lograríamos una extracción exitosa de fibras de vidrio y carbono con una pureza sobresaliente, previéndose un 95% para la fibra de vidrio y un 98% para las fibras de carbono. Este alto nivel de pureza muestra una separación eficaz de las fibras del compuesto termoestable, resaltando la eficiencia del proceso de pirólisis sugerido.

En cuanto a la calidad de las fibras extraídas, se proyecta que conserven una parte considerable de su resistencia mecánica original. Las estimaciones apuntan a que las fibras de vidrio mantendrían alrededor del 85% de su fortaleza, mientras que las de carbono preservarían hasta el 90%. Estas expectativas abren la posibilidad de reincorporar las fibras en usos secundarios o en la fabricación de nuevos materiales compuestos.

El análisis de los subproductos de la pirólisis indica el potencial de generar gases combustibles, tales

Esto podría reducir la dependencia de materiales nuevos y estimular el desarrollo de innovaciones en materiales y productos en industrias afines.

- Los subproductos resultantes, incluidos gases combustibles y residuos sólidos, ofrecen oportunidades para la generación de energía y la producción de nuevos materiales.
- Este enfoque holístico en el reciclaje resalta la necesidad de considerar el ciclo de vida completo de los materiales para maximizar los impactos positivos tanto ambientales como económicos.

Un análisis preliminar del ciclo de vida sugiere que este método de reciclaje podría significar una notable reducción del impacto ambiental en comparación con la convencional disposición en vertederos. Esta mejora en la huella de carbono refuerza el posicionamiento de la energía eólica como una fuente renovable genuinamente sostenible, enfrentando las críticas sobre los efectos ambientales al final de la vida útil de sus componentes.

A nivel global, estos hallazgos subrayan el potencial revolucionario de la pirólisis en la gestión de residuos de aspas eólicas, alineándose con objetivos de sostenibilidad más amplios y la lucha contra el cambio climático. La eficiente implementación de tales técnicas podría definir nuevos paradigmas para el sector eólico, garantizando que su aporte a la matriz energética global sea no solo libre de carbono, sino también responsable en términos de gestión de ciclo de vida.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Mishnaevsky Jr. Leon, *Recycling of wind turbine blades: Recent developments*, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 39, 2023, 100746, ISSN 2452-2236, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100746>.

[2] Weiwei Zhang, Hao Yu, Binbin Yin, Arslan Akbar, K.M. Liew, *Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 426, 2023, 139184, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139184>.

[3] Ming-xin Xu, Hai-wen Ji, Xiang-xi Meng, Jie Yang, Ya-chang Wu, Jin-yi Di, Hao Jiang, Qiang Lu, *Effects of core materials on the evolution of products during the pyrolysis of end-of-life wind turbine blades*, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Volume 175, 2023, 106222, ISSN 0165-2370, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106222>.

[4] Wooyoung Yang, Ki-Hyun Kim, Jechan Lee, *Up-cycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 376, 2022, 134292, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134292>.

[5] Rahmani, F. M., & Zohuri, B. (2022). *Knowledge is power in four dimensions: Models to forecast future paradigm with artificial intelligence integration in energy and other use cases*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780323951128/knowledge-is-power-in-four-dimensions-models-to-forecast-future-paradigm>.

[6] Belachew Desalegn, Desta Gebeyehu, Bimrew Tamrat, Tassew Tadiwose, Ababa Lata, *Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments*, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 17, 2023, 100691, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100691>.

[7] Erik Lundtang Petersen, Peter Hauge Madsen, *Wind Farms*, Editor(s): Cutler J. Cleveland, *Encyclopedia of Energy*, Elsevier, 2004, Pages 449-463, ISBN 9780121764807, <https://doi.org/10.1016/B012-176480-X/00337-5>.

[8] Muhammad Irfan Sohail, Aisha A Waris, Muhammad Ashar Ayub, Muhammad Usman, Muhammad Zia ur Rehman, Muhammad Sabir, Tehmina Faiz, *Chapter One - Environmental application of nanomaterials: A promise to sustainable future*, Editor(s): Sandeep Kumar Verma, Ashok Kumar Das, *Comprehensive Analytical Chemistry*, Elsevier, Volume 87, 2019, Pages 1-54, ISSN 0166-526X, ISBN 9780128213209, <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2019.10.002>.

[9] Francesca Spini, Paolo Bettini, *End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies*, *Composites Part B: Engineering*, Volume 275, 2024, 111290, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111290>.

[10] Samy Yousef, Justas Eimontas, Inga Stasiulaitiene, Kęstutis Zakarauskas, Nerijus Striūgas, *Recovery of energy and carbon fibre from wind turbine blades waste (carbon fibre/unsaturated polyester resin) using pyrolysis process and its life-cycle assessment*, *Environmental Research*, Volume 245, 2024, 118016, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118016>.

[11] Vikesh G. Lade, Sanjeevani K. Chavhan, Sanjay P. Shirsat, Bharat A. Bhanvase, *6 - Processes for the treatment of biomedical wastes: challenges and issues*, Editor(s): Nishikant A. Raut, Dadasaheb M. Kokare, Bharat A. Bhanvase, Kirtikumar R. Randive, Sanjay J. Dhoble, *360-Degree Waste Management*, Volume 2, Elsevier, 2023, Pages 123-138, ISBN 9780323909099, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90909-9.00007-1>.



Congreso Internacional
de Instalaciones
ELECTROMECANICAS
2024