



# REVISTA TÉCNICA

## DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada  
que está indizada en las publicaciones  
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABSTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

**Dr. Humberto Fernández Morán**  
"Mis luchas son las del Quijote,  
batallas que uno pierde, pero  
gana la causa".



# xyz Modelo de Optimización de Arreglos de Cometas Captadoras de Energías Sostenibles

Cecilia E. Sandoval-Ruiz 

Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, 2025, Carabobo, Venezuela.

\*Autor de correspondencia: [cesandova@gmail.com](mailto:cesandova@gmail.com)

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a01>

Recepción: 08 mayo 2023 | Aceptación: 29 enero 2024 | Publicación: 27 marzo 2024

## Resumen

Esta investigación plantea una actualización del modelo de captación de energía eólica, ya que actualmente no se considera la compensación de efectos ambientales, siendo requerido para la configuración de un arreglo inteligente de cometas eólicas. El objetivo fue definir un término de realimentación de flujo difractado, analizando su aporte en la optimización de eficiencia. El método se basó en la correspondencia entre un operador matemático y los elementos físicos del sistema. Se interpretó el concepto de filtro adaptativo con arquitectura LFSR configurable (del inglés *Linear Feedback Shift Register*), para el procesamiento de bloques discretos de energía, en un combinador xyz lineal de flujo de viento, a través de colectores flexibles y realimentación de flujo modulado. Como resultados de las pruebas del modelo en VHDL (del inglés *Very High Speed Integrates Circuit Hardware Description Language*) se obtuvieron los coeficientes óptimos para la convergencia de la señal de salida, con respecto a la referencia. Entre los principales aportes se encuentra la simplificación por etapas, reportando una mejora en la eficiencia del 11,08 %; lo que permite concluir que el término adaptativo propuesto representa una herramienta para avanzar en el concepto de sistemas configurables basados en modelos, para el desarrollo de nuevas tecnologías, máxima eficiencia, mínimo costo energético y mínimo impacto ambiental.

**Palabras clave:** arreglo de cometas eólicas; arquitectura LFSR; *hardware* reconfigurable; patrón de recirculación de flujo eólico; sistemas de energía renovable definidos por *software*.

## xyz Model Applied to Kites Collector Arrays of Sustainable Energy

### Abstract

This research proposes an update of the wind energy collection model, since compensation for environmental effects is not currently considered, being required for the configuration of an intelligent arrangement of wind kites. The objective was to define a diffracted flow feedback term, analyzing its contribution to efficiency optimization. The method was based on the correspondence between a mathematical operator and the physical elements of the system. The concept of an adaptive filter with configurable LFSR (Linear Feedback Shift Register) architecture was interpreted for the processing of discrete energy blocks in a linear xyz wind flow combiner, through flexible collectors and modulated flow feedback. As results of the model tests in VHDL (Very High Speed Integrates Circuit Hardware Description Language), the optimal coefficients for the convergence of the output signal, with respect to the reference, were obtained. Among the main contributions is the simplification by stages, reporting an improvement in efficiency of 11.08 %; which allows us to conclude that the proposed adaptive term represents a tool to advance the concept of model-based software configurable systems, for the development of new technologies, maximum efficiency, minimum energy cost and minimum environmental impact.

**Keywords:** wind kite array; LFSR architecture; reconfigurable hardware; wind flow recirculation pattern; software-defined renewable energy systems.

# Modelo de Otimização de Arranjos de Gerador Eólico para Captação de Energia Sustentável

## Resumo

Esta pesquisa propõe uma atualização do modelo de captação de energia eólica, uma vez que atualmente não é considerada a compensação pelos efeitos ambientais, sendo necessária a configuração de um arranjo inteligente de pipas eólicas. O objetivo foi definir um termo de feedback de fluxo difratado, analisando sua contribuição para a otimização da eficiência. O método baseou-se na correspondência entre um operador matemático e os elementos físicos do sistema. O conceito de filtro adaptativo com arquitetura LFSR (*Linear Feedback Shift Register*) configurável foi interpretado para o processamento de blocos de energia discretos em um combinador linear de fluxo de vento xyz, através de coletores flexíveis e realimentação de fluxo modulado. Como resultados dos testes do modelo em VHDL (*Very High Speed Integrates Circuit Hardware Description Language*), foram obtidos os coeficientes ótimos para a convergência do sinal de saída, em relação à referência. Entre as principais contribuições estão a simplificação por etapas, reportando uma melhoria na eficiência de 11,08%; o que nos permite concluir que o termo adaptativo proposto representa uma ferramenta para avançar no conceito de sistemas configuráveis baseados em modelos, para o desenvolvimento de novas tecnologias, máxima eficiência, mínimo custo energético e mínimo impacto ambiental

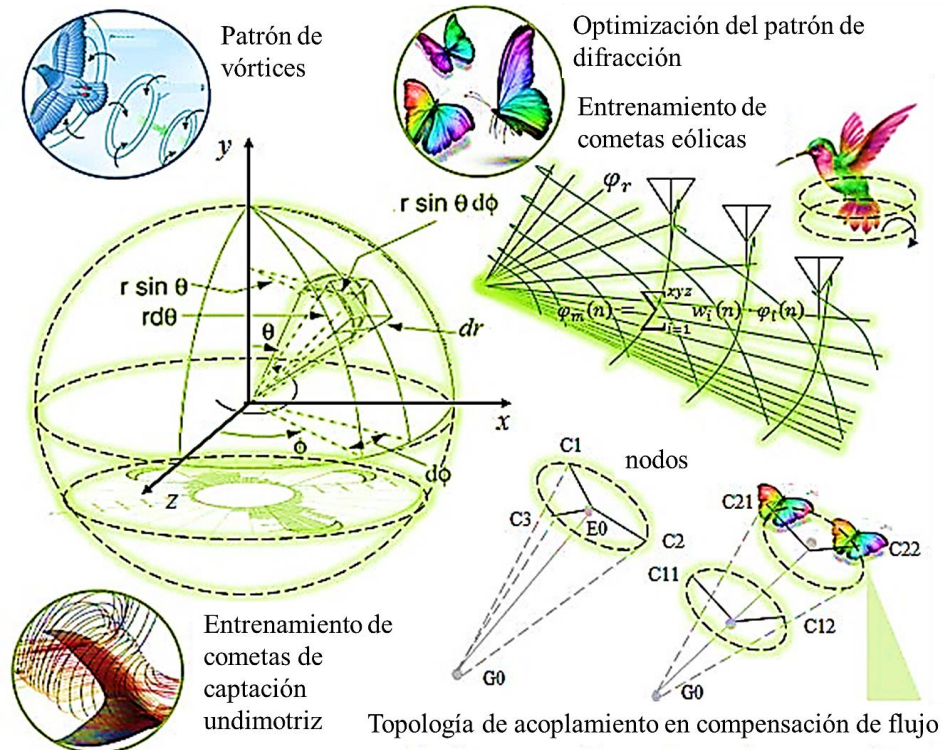
**Palavras chaves:** arranjo de pipa eólica; Arquitetura LFSR; *hardware* reconfigurável; padrão de recirculação do fluxo de vento; sistemas de energia renovável definidos por *software*.

## Introducción

Cada vez se requiere un mayor desarrollo de modelos para la migración a tecnologías sostenibles, a fin de optimizar la reutilización de *hardware* de captación de energía (Hagen *et al.*, 2023). Al respecto, en el trabajo de Sandoval-Ruiz (2023a) se presenta la observación de mecanismos de eficiencia energética de la flora y fauna, con el propósito de orientar los criterios de diseño de captación de energía hacia arreglos bioinspirados, en esta investigación se extiende el criterio para la corrección de patrones de interferencia. El reconocimiento de patrones se puede realizar aplicando aprendizaje automático por refuerzo (Sierra-García *et al.*, 2021), tomando como primera etapa la observación del sistema real. Así mismo, se puede implementar una técnica de modelado fractal (Sandoval-Ruiz, 2020a), donde se plantea la definición de componentes del modelo como *targets* por etapas y la optimización dinámica de respuesta de los actuadores por algoritmos adaptativos, para tecnologías orientadas a priorizar la protección de la biodiversidad y ecosistemas nativos (Sandoval-Ruiz, 2021b), soportadas sobre modelos matemáticos que permitan la actualización en el tiempo, aplicando el concepto de sistemas SDRE (del inglés *Software Defined Renewable Energy*), a fin de superar la obsolescencia programada y dependencia tecnológica. De tal manera, el arreglo de la etapa de captación en los sistemas de energías renovables se puede interpretar como una lente o red de difracción, aplicada sobre la onda de energía incidente en relación a patrones de interferencia: i) ondas constructivas, donde la onda se refuerza; y ii) ondas nodales, para la cancelación de perturbaciones. Estos patrones pueden ser configurados mediante arreglos geométricos, en función del ángulo y longitud de onda. Para lo que se plantea una ecuación, con parámetros de optimización, a fin de minimizar las pérdidas de energía residual y efectos ambientales, a la vez de maximizar los aportes de energía.

Algunas investigaciones recientes (Liu *et al.*, 2023; Zehtabiyani *et al.*, 2023; Sandoval-Ruiz, 2024) se concentran en el estudio de la interferencia aerodinámica y los modelos para análisis de rendimiento de los parques eólicos, como VFMW (del inglés *Vortex Filament Wake Model*), para arreglos de colectores paralelos, tándem o concatenados, aplicando métodos numéricos de segmentos discretos de vórtices para la ecuación de transporte de vorticidad, dado que los elementos que operan aguas abajo presentan condiciones distintas de flujo incidente, teniendo un efecto sobre la eficiencia del arreglo entre el 5 y el 20 %. En este orden de ideas, Zhang *et al.* (2023) explican la dinámica de la estela cercana y lejana sobre el flujo eólico, proponiendo una fórmula empírica para describir sus variaciones a favor del viento en diferentes posiciones de la envergadura de los captadores. Entre las alternativas de solución, se tiene que López *et al.* (2023) realizaron un análisis numérico de torque en turbinas con modificaciones denominadas generadores de vórtice (VGs), bioinspirados en las plumas del halcón peregrino y mediante el uso de simulación computacional de la dinámica de fluidos en 3D, logrando validar el aumento de producción energética de los aerogeneradores al generar vórtices turbulentos de baja intensidad que evitan el desprendimiento de la capa límite ante cambios bruscos de dirección del viento entrante.

La presente investigación parte del estudio del modelo fractal, tal como la formación de espirales Fibonacci por efecto del flujo difractado, lo que permite reconocer una estructura LFSR (del inglés *Linear Feedback Shift Register*) en la generación de patrones de compensación Fibonacci/Galois (Sandoval-Ruiz, 2013). Para la interpretación del arreglo eólico como una red de difracción, se plantea un modelo unificado de relación onda-partícula, incorporando términos descriptivos de fenómenos ondulatorios como difracción y reflexión de onda. La propuesta de optimización biomimética introduce el concepto de los patrones de vórtices, para la realimentación de flujo a favor de disminuir el impacto ambiental y maximizar la eficiencia, de esta manera, se consideró como referencia un patrón Fibonacci para establecer la relación de recirculación de flujo y un criterio de diseño colaborativo entre captadores. En la Figura 1 se presenta el modelado geométrico en xyz para el arreglo inteligentes de captadores de energía, el cual considera trayectorias orbitales, recirculación de flujo, compensación del efecto de los patrones de interferencia, a partir de la propuesta de optimización, basada en conceptos de biomimética (Benyus, 1997), en la aplicación de ingeniería inversa (Lehn *et al.*, 2012).



**Figura 1.** Modelo xyz para sistemas de energías sostenibles a partir de criterios biomiméticos.

Para el modelo del arreglo captador se consideraron principios biomiméticos, según la fuente de energía: i) eólica, inspirado en el vuelo del colibrí, se considera el movimiento de arriba hacia abajo de las cometas eólicas, para formar vórtices en los espacios traseros y delanteros del aire, y después se forma un solo vórtice que crea un área de baja presión, lo que facilita el ascenso y el mantenimiento de su posición semifija, adaptándose a la dirección del viento, ya que así el flujo de aire puede sustentar su posición (National Geographic, 2023); ii) undimotriz, inspirado en los vórtices formados por las aletas de las ballenas para captación de energía (González *et al.*, 2019); igualmente, se considera la modificación de parámetros de flotabilidad en la hidrodinámica, a través de un coeficiente de densidad configurable en función de la profundidad, como ocurre en la bioquímica de ciertas especies marinas (Nelson *et al.*, 2009), como los cachalotes (*Physeter macrocephalus*); y iii) fotovoltaica, inspirado en la coloración estructural de las plumas de aves y polinizadores para polarización de lente óptica. Un fenómeno físico similar, pero no idéntico, produce colores iridiscentes, como en las plumas de colibrí, con estructuras microscópicas reflejan la luz solar con una forma natural de nanotecnología. Lepidóptera identifica a las mariposas de alas nanoestructuradas, que reflejan selectivamente componentes de la onda de luz solar. Un ejemplo de coloración estructural corresponde a las alas de una mariposa morfo azul, nativa de Centro y Sudamérica, que sirve de inspiración para tecnología (BBC, 2023).

Se estudió el esquema LFSR(n,k), a fin de relacionar los coeficientes matemáticos con parámetros de dinámica de fluidos clásica y cuántica (relación onda-partícula), para la optimización de eficiencia de captación de energía y mitigación de impacto ambiental, en función del número de etapas del arreglo, radio, altura, distancia y topología, identificando una correspondencia estructural en la progresión geométrica de la ecuación y principios de compensación

simétrica por geometría proyectiva (Sandoval-Ruiz, 2023d). Al abordar los sistemas sostenibles de energías renovables, se deben considerar aspectos como la reducción de insumos, selección de materiales sostenibles, técnicas de instalación, eficiencia de operación y mantenimiento (Hagen *et al.*, 2023), y reciclaje de componentes. Esto a través de un modelo de migración-actualización tecnológica y minimización de perturbaciones e impacto de la tecnología sobre las variables secundarias (calor residual, flujo eólico aguas abajo del arreglo captador) por intervención de espacios, como criterios de impacto ambiental en el ciclo de vida del proyecto, estos últimos aspectos son poco abordados, para lo cual resulta necesario definir la infraestructura energética, como una matriz reconfigurable de elementos de captación de energía, representados estos por coeficientes de optimización en ecuaciones matemáticas parametrizables, para el soporte de adaptación del *hardware* (Sandoval-Ruiz, 2021a). En respuesta a esta necesidad, se propone formular un modelo para un arreglo adaptativo de captadores de energía renovable aplicando el operador matemático de convolución (Sandoval-Ruiz, 2021c), que permita establecer una relación entre la energía incidente (considerando la energía reflejada por otros elementos del arreglo), energía captada, recirculación de energía residual y compensación, en un mecanismo regenerativo a la salida del arreglo, optimizando la eficiencia, a partir de los componentes instalados.

Algunos aspectos que representan retos para la tecnología actual de energías renovables no convencionales corresponde a establecer una relación de recirculación de flujo, a fin de optimizar la eficiencia del sistema. Otro inconveniente que se identifica viene dado por la falta de un compromiso de remediación del patrón de salida (en el modelo matemático), de los sistemas captadores de energía, el cual se propone mediante un generador LFSR de patrones de vórtice de compensación para el efecto de la red de difracción del captador de energía. Entonces el modelo quedará definido a través de 3 componentes principales: i) la combinación lineal de los componentes xyz en la trayectoria del captador de energía (cometa eólica), con implementación de variables geométricas y físicas, para la definición de los parámetros de optimización, a través del algoritmo adaptado; ii) un componente de recirculación de energía, con un criterio de eficiencia del 61,8 % del flujo incidente en  $t - 1$ , introduciendo el concepto de memoria estructural, lo que define una red recurrente; y iii) un término de corrección, a partir de la observación de patrones biomiméticos, establecidos como *target* para su caracterización, a través del algoritmo adaptativo (ajuste fino de compensación del error). La evolución de los sistemas eólicos comprende: i) turbina de eje horizontal HAWT (del inglés *Horizontal Axis Wind Turbine*), ii) turbina de eje vertical VAWT (del inglés *Vertical Axis Wind Turbine*), iii) colectores de vórtice, iv) AWES (del inglés *Airborne Wind Energy Systems*), v) cometas eólicas de configuración flexible, vi) convertidor de energía eólica electrostática EWEC (del inglés *Electrostatic Wind Energy Conversion*), vii) convertidores eólicos de iones, y viii) inducción magnetoeólica y avances de tecnologías híbridas.

Según estudios previos, las cometas eólicas pueden alcanzar mayor potencia que los aerogeneradores (Lellis *et al.*, 2016), además de requerir menor cantidad de material y recursos, lo que lo convierte en una tecnología atractiva y eficiente. Chowdhury *et al.* (2022) presentaron las ventajas de las cometas eólicas: i) mitigación del impacto ambiental de los parques de aerogeneradores convencionales, ii) mecanismos menos complejos, iii) aumento de eficiencia por la flexibilidad (se pueden utilizar patrones de flujo incidente de diferentes direcciones y un amplio rango de altitudes), y iv) compensación de efectos del viento sobre el sistema, entre otras ventajas. Asimismo, el control dinámico de la cometa es más desafiante debido al mayor grado de libertad; incluye el control de tensión de la cuerda, así como los parámetros del perfil aerodinámico de la cometa (Zempoalteca *et al.*, 2021), estudios de coeficientes de arrastre en tunel de viento (Martín *et al.*, 2019) y dinámica de fluidos (Marturet *et al.*, 2023). Todo esto reflejado sobre un modelo del sistema para el control avanzado de trayectoria del captador (Mathis, 2022).

El modelo planteado en este trabajo requiere el estudio del control de flujo activo para revalorizar los vórtices de presión y temperatura, que se crean cuando éste pasa a través de la estructura captadora, sintonizando la frecuencia de oscilación del arreglo captador (sistema físico) o su equivalente matemático, mediante una secuencia de compensación, para la cancelación de interferencias. Aplicando el reconocimiento de patrones geométricos existentes en la naturaleza, en formaciones de espiral Fibonacci (Grant *et al.*, 2021), se pueden considerar alternativas de diseño con base en el generador de secuencia correspondiente, para una solución del efecto del arreglo captador. La investigación introduce un modelo basado en el circuito LFSR, representado por el operador matemático de convolución  $\otimes$ , que permite realizar filtrado espectral por transformada de Fourier, para arreglos captadores de energía, aportando una simplificación matemática. Comprende los productos algebraicos en campos finitos de Galois GF (Sandoval-Ruiz, 2021c), y realimentación lineal para la generación de una secuencia:  $C(x) = D(x) + R(x)$ , valorizando el flujo de salida (un bloque de  $n$  elementos discretos, con  $n-k$  patrones de compensación). Este patrón describe un entrelazamiento de la secuencia de flujo incidente, con el polinomio generatriz de la red de difracción de la estructura captadora  $G(x)$ , lo que permite incluir términos de generalización de las dimensiones físicas, que en condiciones específicas tienden a anularse y de esta forma se amplía el alcance para los sistemas dinámicos. Un aspecto innovador corresponde a la

interpretación del bias (sesgo, que orienta a la salida a un valor independiente de las variables directas del modelo), como término de compensación paramétrico en función de conceptos de física moderna y ondas, que comúnmente no es ponderado con las variables mecánicas del sistema, que logra aportar un componente para alcanzar minimizar el error estimado respecto al comportamiento del modelo. No obstante, para lograr un control más eficiente, resulta de interés establecer la relación a variables de dimensiones fractales en la descripción de elementos finitos del sistema (Sandoval-Ruiz, 2021c).

El objetivo de la presente investigación fue definir un término de realimentación de flujo difractado, identificando la correspondencia entre esquemas matemáticos y el sistema físico estudiado, para definir las ecuaciones del modelo. El estudio de los sistemas eólicos abarca desde el diseño de colectores de geometría variable (Hagen *et al.*, 2023), ajuste de parámetros de dinámica de fluidos, control de flujo y optimizaciones de eficiencia. Estudios recientes se centran principalmente en el control del ángulo y los parámetros aerodinámicos (González *et al.*, 2016), con el fin de aumentar el factor de planta. En condiciones normales, un fluido ondula alrededor de cualquier perturbación o estructura que interfiera su trayectoria, tal es el caso del captador de energía, presentando vórtices con patrones de flujo fractal. En un superfluido (BEC – condensado de Bose Einstein) esta turbulencia se suprime alrededor de los obstáculos, lo que hace que el fluido siga su camino sin alteraciones, disminuyendo pérdidas (por coeficientes de fricción) y mejorando el rendimiento del sistema. Con base en esto, se plantea una ecuación de modelo unificado (Baker *et al.*, 2019) que sea válida para todos los mecanismos fluidodinámicos, tanto para sistemas macroscópicos como para un arreglo de osciladores acoplados y ondas (French, 1974), donde la generalización por correspondencia con el modelo LFSR permita establecer conjeturas para describir el término de realimentación del campo de energía (no considerado en investigaciones previas). Se propone un control de flujo activo, sobre el modelo holográfico xyz, analizando la dualidad onda-partícula de la energía y el estudio de la interferencia del captador sobre el flujo modulado (aguas abajo), a través de técnicas de regeneración en relación de proporciones geométricas PE( $\pi, \varphi, \varepsilon$ ) de patrones de flujo de energía lineales, bidimensionales y tridimensionales; presentados en la Figura 2.

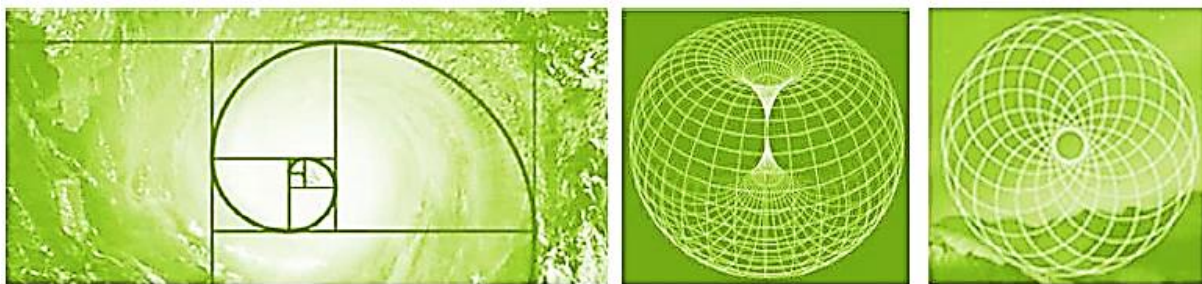


Figura 2. Patrones dimensionales del flujo de energía eólica (Grant *et al.*, 2021).

## Materiales y Métodos

Los pasos de la investigación consistieron en: i) la identificación de la arquitectura de soporte, ii) la descripción en VHDL del modelo estructural (Sandoval-Ruiz, 2019), iii) desarrollo del algoritmo adaptativo para la configuración de los parámetros óptimos, iv) pruebas y ajustes en relación a los *targets* seleccionados como criterio en cada una de las etapas, y v) generalización del método a través de una ecuación modeladora sobre la arquitectura LFSR.

### Modelado del arreglo adaptativo xyz de captadores de energía eólica

El arreglo de captadores puede ser interpretado como un filtro lineal para la estimación del flujo de salida ( $\varphi_m$ ), torque mecánico ( $T_m$ ) y potencia eólica ( $P_v$ ). Para obtener los valores optimizados de los coeficientes del modelo, se requiere implementar una matriz adaptativa xyz, las variables definidas para el modelo se presentan en la Tabla 1.

Se identificó la analogía del sistema captador con arreglos de antenas inteligentes (Castellanos *et al.*, 2014) y se interpretó el concepto para el arreglo de cometas eólicas como una red de difracción que considera la interferencia de las ondas generadas por los  $n$  elementos del arreglo, donde el factor de arreglo depende del ángulo  $\theta_i$ ,  $\theta_m$ , índice de difracción  $m$  y el inverso del factorial de la distancia:  $1/r!$ . Es importante señalar la correspondencia entre conceptos de antenas inteligentes y corrección de errores, con aplicaciones como lentes de dispersión, técnicas de *beamforming*, filtrado selectivo de componentes espectrales, compensación de patrones de interferencia, que pueden ser extrapolados a aplicaciones en energías sostenibles.

**Tabla 1.** Nomenclatura de variables del modelado del sistema eólico desarrollado.

$w_c(n)$	W·s/m	Coefficientes físicos dinámicos del captador, en función de la velocidad.
$T_m(n)$	N·m	Torque mecánicos en el eje o cuerda de transmisión del captador.
$C_p$	-	Coefficiente de potencia del modelo aerodinámico del captador eólico.
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del aire en el modelo aerodinámico del captador eólico.
$v_i(n)$	m/s	Entrada de la velocidad de viento incidente sobre el sistema captador.
$\pi, \rho, \epsilon$	-	Coefficientes geométricos: relación Fibonacci y espiral logarítmica $1/n!$ .
$\Delta x,y,z$	-	Diferencial espacial para el análisis de los bloques discretos de energía.
$w_{xyz}(n)$	-	Matriz de coeficientes de difracción sobre el flujo eólico incidente.
$\Delta\varphi_r(n)$	m <sup>3</sup> /s	Variación neta del flujo reflejado por los elementos del parque eólico.
$\Delta T(n)$	°C	Variación de temperatura para recuperación de calor regenerativo.
$\mu(n)$	-	Coefficiente de aprendizaje (velocidad de convergencia del algoritmo).
LMS	-	$w_{xyz}(n)=\mu(n)\cdot e(n)+w_{xyz}(n-1)$ y $\mu(n)=LFSR(\mu(n-1))$

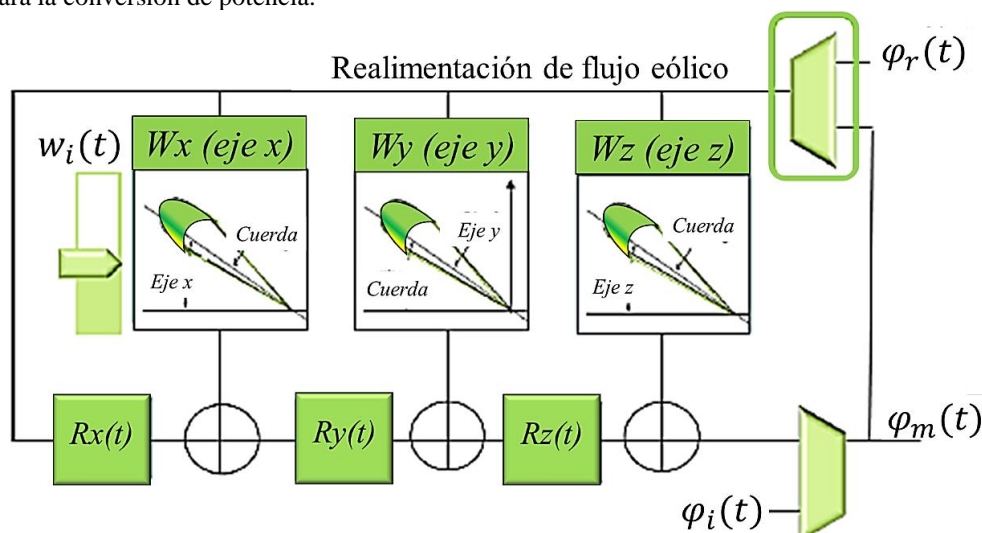
A partir de la arquitectura se definió la fórmula matemática del modelo, donde se relacionan las variables de velocidad de entrada x,y,z a través de coeficientes adaptativos, aplicando un algoritmo de adaptación, para el cálculo de los parámetros físicos del sistema eólico generalizado en la Ecuación 1:

$$P(n)=\alpha \sum_{i=1}^n w_{x,y,z}(n) \cdot \varphi_i(n)+\beta P(n-1)+\gamma \Delta_{ij} P(n) \tag{1}$$

Siendo P(n) la potencia de salida del arreglo captador, wxyz la matriz de coeficientes adaptativos del arreglo y  $\varphi_i(n)$  el flujo incidente, término asociado a la energía cinética del flujo incidente, en función de la velocidad  $v_i(n)$  a través de sus componentes vx, vy, vz. Los coeficientes de proporcionalidad  $\alpha, \beta, \gamma$  están definidos por el patrón geométrico del modelo.  $P(n - 1)$  es la potencia inercial y un componente de potencia residual por fenómeno ondulatorio, que considera el flujo del elemento i reflejado sobre el elemento j del arreglo de colectores (como una red de osciladores acoplados) del sistema eólico total. En una primera etapa se definió la combinación lineal óptima de los componentes espectrales y la geometría del arreglo para la captación de energía eólica incidente en los ejes xyz y su equivalente en ángulos respecto al eje coordenado (RPY), en función del radio y ángulo de balanceo (roll), ángulo de cabeceo (pitch) y ángulo de guiñada (yaw).

**Interpretación de patrones de flujo: arquitectura LFSR(n,k)**

El modelo del arreglo captador puede ser reinterpretado (Figura 3) como un circuito secuencial, donde la función de optimización está relacionada con la trayectoria de la cometa eólica, descrita por el operador de convolución  $\pi$ -LFSR(n,k), procesando la onda de flujo incidente  $\varphi_i$  en bloques discretos de transporte de energía (Bird *et al.*, 2013). Para cada elemento del arreglo xyz, se realimentó un flujo modulado  $\varphi_m$  (por difracción de la onda incidente a través del arreglo captador) y un flujo reflejado  $\varphi_r$  entre los k elementos del arreglo, cada uno aportando en la estimación del flujo captado para la conversión de potencia.



**Figura 3.** Reinterpretación del arreglo captador de energía con realimentación lineal.

Los registros de energía RX,RY,RZ representaron el volumen del espacio confinado por la trayectoria descrita por los elementos del arreglo captador o cámaras conformadas entre elementos del arreglo por los acoplamientos aeroelásticos, que interactúan en la dinámica total del sistema mecánico. El multiplexor de entrada de flujo reflejado permitió incorporar al modelo matemático el término de relación de ondas, con los patrones de compensación autogenerados.

Se identificó una correspondencia estructural entre las etapas del arreglo captador de energía eólica, respecto al sistema físico, los operadores matemáticos estudiados y los filtros adaptativos, lo que permitió proponer la adaptación de parámetros mecánicos a partir de un algoritmo de optimización para turbinas, cometas eólicas y nuevas tecnologías. Se proponen inferencias entre la similitud de comportamiento del sistema y fenómenos ondulatorios, para definir conjeturas aplicables a la síntesis de las operaciones en lenguaje descriptor de *hardware* VHDL. La relación de componentes del modelo son presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Análisis de los componentes del modelo matemático aplicado.

<b>Interpretación geométrica de los modelos de los patrones espaciales</b>		
Modelo de trayectoria $xyz$	Modelo de área proyectada	Modelo de difracción
Sólido en revolución	$x=(R+r\cos\theta)\cos\phi$	$x(n+1)=x(n)+x(n-1)$
$x,y,z=R\sin\theta$	$y=(R+r\cos\theta)\sin\phi$	$x_n=\Phi^n+(1-\Phi)x_{n-1}$
<b>Interpretación física de los modelos de los patrones espaciales</b>		
Modulación de flujo	Recirculación de flujo	Patrones de ondas reflejadas
$\varphi_m(n) = \pi \cdot w_i \otimes \varphi_i(n)$	$\varphi_r(n)=(1-\Phi) \cdot \varphi_m(n-1)$	$\varphi_C(n)=1/r! \cdot w_i \otimes \varphi_D(n)$
$\varphi_m(n)$ , flujo modulado $\pi$ -LFSR, con ganancia del arreglo sobre flujo captado $f(\varphi_i(n),x,y,z)$ .	$\varphi_r(n)$ flujo realimentado en registros de las etapas del arreglo (volumen confinado).	$\varphi_C(n)$ patrón corregido $\Delta\varphi_C=\varphi_D(n)+R(x)$ patrones de flujo difractado.

LFSR: *Linear Feedback Shift Register*.

La inferencia de términos de compensación se desarrolló por análisis de modelos previos (Sandoval-Ruiz, 2021a), donde cada elemento tuvo una ganancia de captación respecto a la variable de entrada  $x(t)$ , un registro para almacenamiento de energía ESS (del inglés *Energy Storage System*) por aportes de la señal en  $t-1$  (Sandoval-Ruiz, 2023b) y un componente relacionado con el flujo proyectado por el arreglo de captadores. Para conceptualizar el modelo se introdujo la interpretación de entrelazamiento cuántico (onda-partícula), sin desestimar la interacción entre los elementos del arreglo y el efecto de interferencia. Al estudiar dos elementos discretos la relación viene dada por la Ecuación 2:

$$I_{i,j}=k_e \cdot \frac{c_i \cdot c_j}{d^2} \quad (2)$$

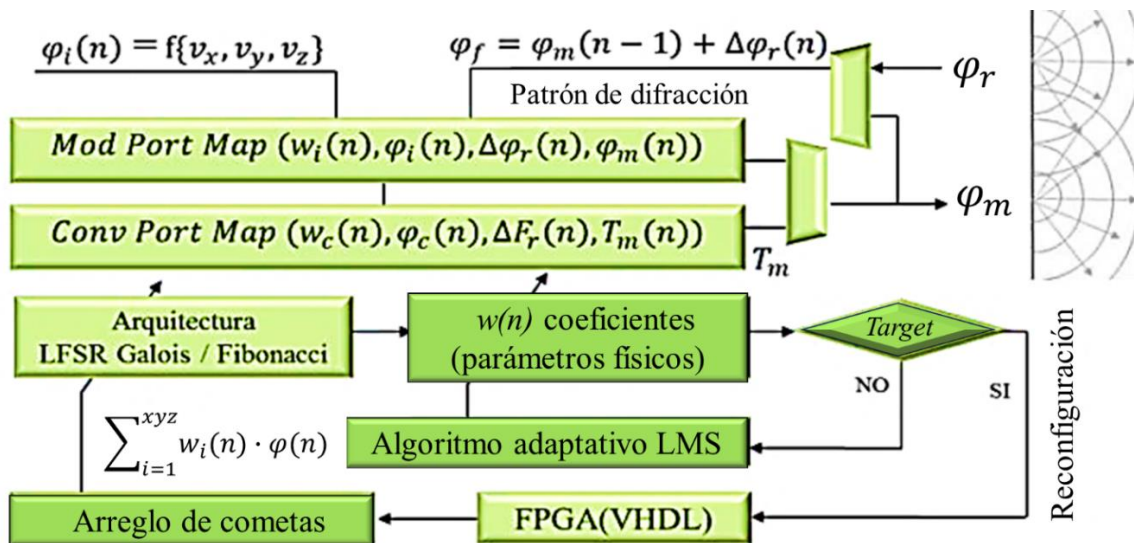
Siendo  $I_{i,j}$  el impacto del elemento  $j$  sobre el elemento  $i$ ,  $c_i$  el patrón de difracción proyectado por el elemento  $i$  y  $c_j$  el patrón de difracción reflejado por el elemento  $j$  para los nodos de la red de difracción del sistema eólico. La constante  $k_e$  es una proporción en relación al estudio de interacción, que en un sistema mecánico correspondería al coeficiente de elasticidad entre los elementos. Este efecto se extrapoló a todos los elementos del conjunto, introduciendo una dimensión fractal solapada de información, de la forma (Ecuación 3):

$$I_{i,j}=\sum_{j=1}^m k_e \cdot \frac{c_i(n) \cdot c_j(n)}{(r_i-r_j)^2} + k_e \cdot \frac{c_i \cdot c_j(n-1)}{(r_i-r_j)^2} \cong \frac{k_e}{\Delta r!} c_i \otimes c_j \quad (3)$$

Esta ecuación se estimó a partir de la convolución de componentes espectrales de interferencia (difracción) entre los elementos, lo que se puede interpretar como una dimensión de información comprimida que se despliega al recibir la onda de energía incidente, como un estado latente de energía potencial que se encuentra sintonizada a la frecuencia de resonancia del sistema, a través de un código de malla holográfico. Esto se aplica de manera similar para arreglos de cometas en sistemas ópticos definidos por lentes de difracción de plasma (configurables por ionización), para concentración solar y turbina holográfica por arreglo de cometas eólicas alineadas (con captadores comprimidos que se despliegan por energía) en modo de resonancia mecánica, autosustentada por conversión de energía cinética a potencial y restauración de energía cinética, de manera cíclica. La configuración del arreglo eólico adaptativo permitió establecer los parámetros del modelo a partir de la entrada  $\varphi_i$  de flujo incidente. El procesamiento de las señales



permitió obtener el modelo de las etapas del arreglo de cometas eólicas para estimar así la salida del filtro, conformada por el torque mecánico  $T_m$ , la potencia eólica  $P_v$  y el flujo modulado  $\varphi_m$  para los coeficientes óptimos calculados. En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo y ecuaciones asociadas a las etapas del filtro adaptativo modelador.



**Figura 4.** Diagrama de bloques del arreglo inteligente de captadores. LFSR: *Linear Feedback Shift Register*, LMS: *Least Mean Square*, FPGA: *Field Programmable Gate Arrays*, VHDL: *Very High Speed Integrates Circuit Hardware Description Language*.

Se partió de una reinterpretación del modelo del sistema eólico, definiendo un arreglo con coeficientes adaptativos asociados a los coeficientes físicos del arreglo captador. Se desarrolló el código en lenguaje descriptor de *hardware* VHDL para el cálculo de coeficientes óptimos, que se realiza mediante el algoritmo adaptativo LMS-AH (del inglés *Least Mean Square-Adapted to Hardware*), tal como se presenta en la Tabla 3, con una etapa de aproximaciones sucesivas sobre el arreglo lógico por corrimiento de bits en el ajuste, a fin de alcanzar con menor número de iteraciones la convergencia. Se incorporó a la descripción el generador de patrones de compensación por polinomio  $G(x)$  en algebra de campos finitos de Galois, a través del operador LFSR. Se seleccionó el control de flujo activo mediante un arreglo adaptativo, combinador (filtro) lineal, con 3 entradas y realimentación ponderada, a fin de establecer los coeficientes óptimos  $w_{xyz}$ , dando como resultado las señales de control de la matriz de configuración geométrica. La optimización comprendió un tratamiento de las señales, con operaciones sobre un circuito de *hardware* LFSR reconfigurable.

**Tabla 3.** Algoritmo adaptativo LMS-AH para estimación de parámetros del arreglo eólico.

---

Inicialización de variables y coeficiente de aprendizaje  $\mu$   
 While  $\epsilon(n) >$  tolerancia do;  
 Actualizar coeficiente de aprendizaje adaptativo:  
 If  $\epsilon(n) >$  mín\_global then; definido en el ensayo.  
 $\mu = \mu \gg 1$ ; corrimiento del bit más significativo MSB  
 Factor de Adaptación de los i coeficientes:  
 $\text{factor}(n) = \mu * \epsilon(n) * v(n)$ ; For  $i=1$  to 4 (orden del filtro 4).  
 Operación lógica de conversión la longitud del vector de ajuste (MSB)  
 $\text{ajuste}(n) (7 \text{ downto } 0) = \text{factor}(n) (12 \text{ downto } 4)$ ;  
 Actualización de los i coeficientes del filtro adaptativo xyz:  
 $w_i(n) = w_i(n-1) + \text{ajuste}(n)$ ; ajuste con signo en función del error.  
 Actualización de la salida con los coeficientes adaptativos y error:  
 $P(n) = w_x(n) * v_x(n) + w_y(n) * v_y(n) + w_z(n) * v_z(n) + w_r(n) * v_r(n-1)$ ; -- LFSR  
 $\epsilon(n) = P(n) - d(n)$ ;  
 End; Se obtiene la combinación de coeficientes óptimos del filtro adaptativo.

---

**Ensayo teórico del arreglo de captadores eólicos**

Se seleccionó una ubicación con un rango de velocidad de viento de 2,50 a 8,60 m/seg, según reporte del

explorador de la Universidad de Chile (2023). Se formuló un arreglo teórico de  $k$  etapas de cometas eólicas (Figura 5), con alcance de área de barrido de 158 m, para una velocidad media de viento  $v_i$  de 7,88 m/seg. La potencia de salida del modelo teórico fue de 23,20 MW. En el ensayo se estableció la variable de realimentación del circuito LFSR en función de la entrada  $v_i$  y se identificó el factor de proporcionalidad, el cual coincidió con la razón de Fibonacci:  $\Phi = 1,681$ . Para los datos del caso de estudio, se definió un *target* de potencia eólica de salida de 25,88 MW, como alternativa de reemplazo de las fuentes de energía convencionales, por etapa de la unidad de generación en la migración a energías renovables.

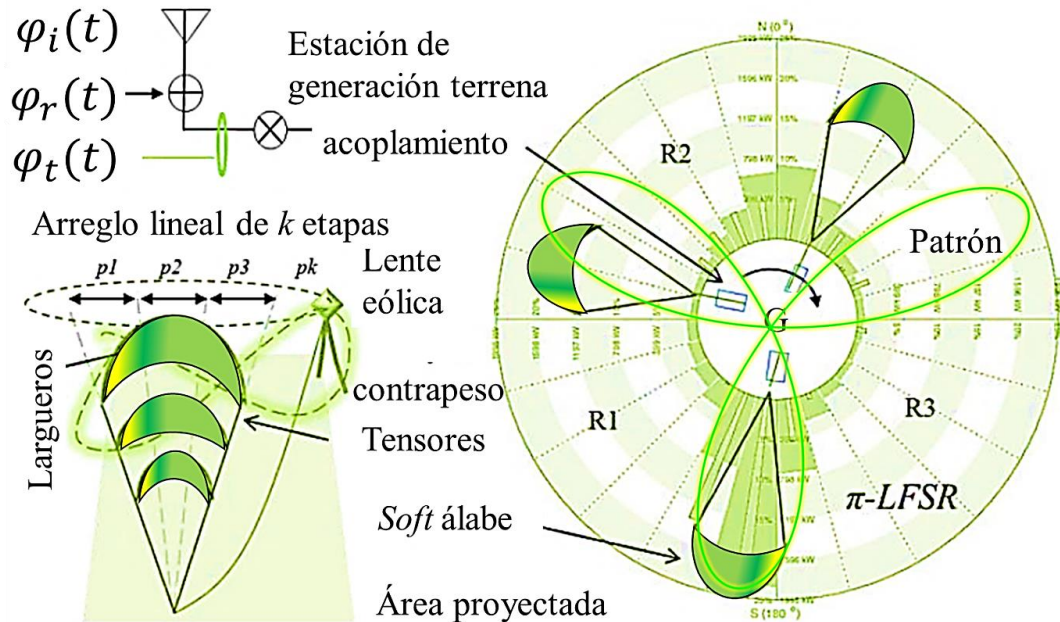


Figura 5. Arreglo geométrico adaptativo de cometas eólicas desarrollado.

En el arreglo geométrico se presenta el modelo equivalente de una antena de comunicación para representar el comportamiento del elemento de captación (cometa eólica), lo que permite aplicar los conceptos de arreglos de antenas inteligentes para optimizar el patrón de radiación y cancelación de ruido del canal. Se representa un arreglo de cometas eólicas parametrizado en función de las etapas del LFSR y una rosa de viento sobre la que se establece el patrón de captación eólica óptica.

## Resultados y Discusión

Se ha alcanzado la definición del modelo a partir de un par de inferencias sobre la base de la interpretación orientada al esquema LFSR, tal como se presenta a continuación:

**Inferencia 1.** Los captadores xyz permiten describir trayectorias 3D definidas sobre el modelo, equivalentes al área de barrido de los elementos captadores, interpretando el arreglo configurable de cometas captadoras como pseudoturbinas eólicas aplicando SDRE.

**Conjetura 1.** Se pueden desarrollar modelos matemáticos holográficos incorporando una dimensión adicional sobre las ecuaciones descriptivas, compensación del patrón geométrico y aplicación de filtrado espectral selectivo, para mejorar la eficiencia del sistema y minimizar el impacto ambiental.

**Demostración.** Se obtuvo la respuesta del sistema eólico a través de la herramienta ModelSim XE para un test\_bench, sobre el modelo VHDL, donde se observó un error de 0,38 y un tiempo de convergencia de la salida 370 nseg del arreglo de cometas (Figura 6).

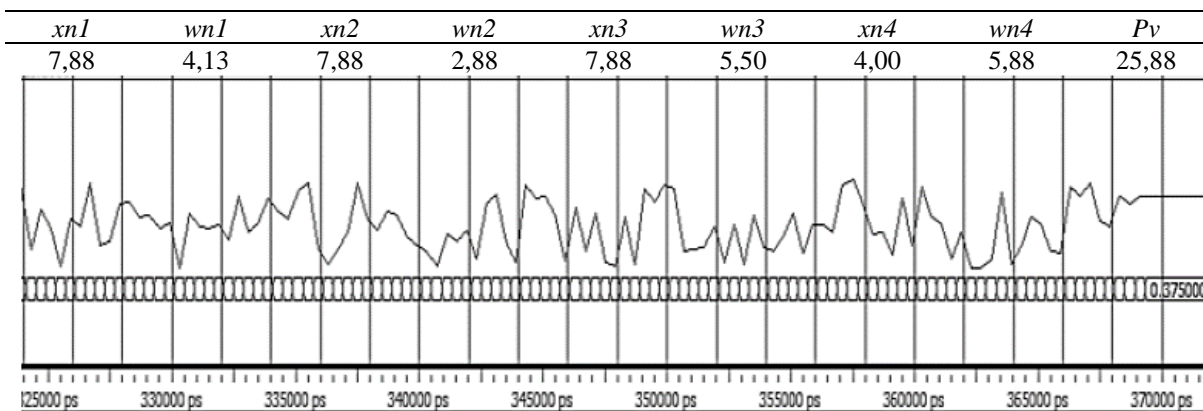


Figura 6. Respuesta del modelo xyz con recirculación de flujo incidente.

El modelo puede ser reentrenado para la compensación del error (bias), por combinación de la secuencia del patrón de interferencia. El arreglo de captadores eólicos de 3 elementos y término de realimentación, permitió evaluar el algoritmo adaptativo con un paso de adaptación (factor de convergencia)  $\mu$  variable, obteniéndose como respuesta el seguimiento de la potencia optimizada. Para  $dn1 = 25,5$ , la señal estimada se estabilizó en  $Pv = 25,5$  MW, el algoritmo convergió en 112 muestras, como se presenta en la Figura 7.

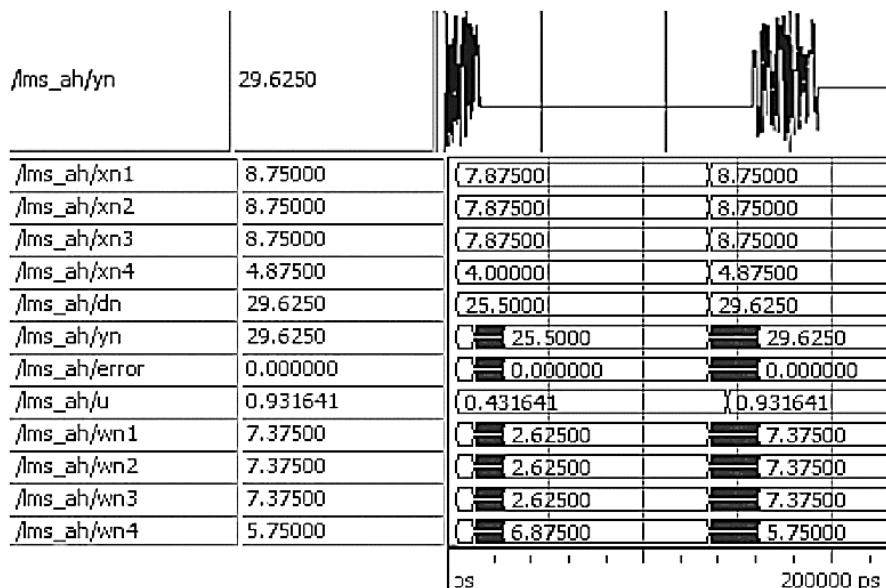


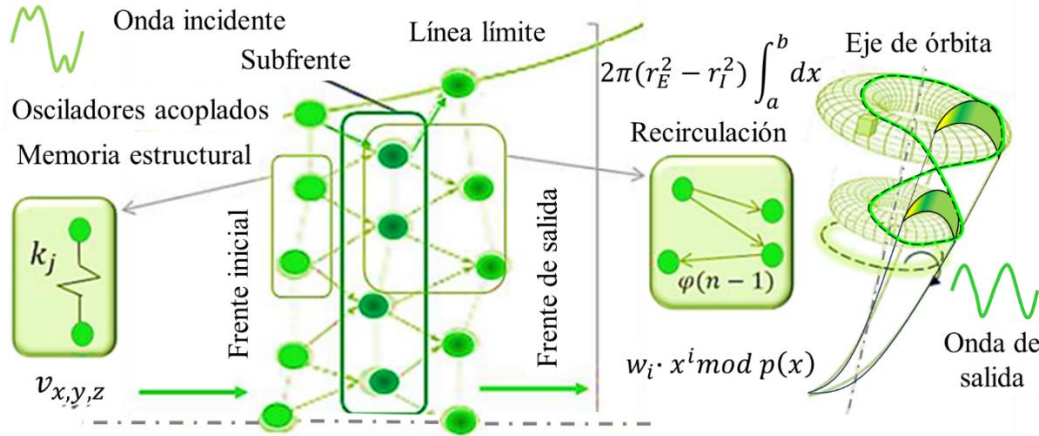
Figura 7. Respuesta del modelo adaptativo para optimización del arreglo de cometas eólicas.

La matriz geométrica  $wn$  develó los coeficientes físicos y el vector  $xn$  de la velocidad de viento. Al cambiar la señal de referencia a 29,625 MW, a partir de 15 nseg, se adaptó en 250 muestras, obteniéndose como resultados los pesos sinápticos  $wn$  actualizados. Esto demuestra que el modelo en VHDL logró optimizar un 11,08 % (relación entre la potencia del cálculo teórico respecto al *target* de optimización) de potencia eólica, por recirculación de flujo, además de presentar un buen comportamiento en escenarios dinámicos, lo que es fundamental para la adaptación a las condiciones ambientales (Sandoval-Ruiz, 2022).

**Inferencia 2.** Se reconoce un patrón de vórtices a la salida del captador que debe ser compensado por un generador de secuencia, para alcanzar su equilibrio dinámico.

**Conjetura 2.** Se establece un patrón de compensación para corrección de patrón de interferencia en VHDL:  $C(x) = \sum_{i=1}^k g_i \cdot \varphi(x)x^i \text{ mod } p(x)$ , tal que:  $\Delta x_r(n) = x_r(n) \oplus C(x)$ .

**Demstración.** El modelo estuvo relacionado con geometría variable, ángulo de posición y perfil aerodinámico de los colectores, lo que permitió establecer el cálculo reversible de los coeficientes estimados, con el fin de analizar el desempeño de cada elemento para la reconfiguración y optimización colaborativa (Howland *et al.*, 2022). Se propone la aplicación de técnicas de compensación de patrones de vórtices en el flujo, a través de Galois-LFSR, por progresión geométrica espacial, presentado en la Figura 8.



**Figura 8.** Alineación de patrones de flujo eólico regenerativo en el arreglo eólico.

Se presenta la onda incidente con componentes armónicos en la entrada de la red de difracción, donde se ha representado el arreglo captador como un sistema de osciladores acoplados, desde el enfoque aerodinámico se tiene los elementos de comportamiento de flujo eólico, la capa límite con el lente eólico que define la dinámica y recirculación de flujo regenerativo. Finalmente, se representa el movimiento del arreglo captador proyectando un patrón 3D (toroidal) por nivel de altura y la compensación simétrica para la restauración de la onda de salida. El frente inicial se interpretó como el flujo incidente, en la etapa intermedia fue modulado por el arreglo captador y compensado a la salida; es decir, regenerado para minimizar el impacto aguas abajo del arreglo, donde el lente de difracción correspondió al polinomio generador  $G(x)$ , con coeficientes del polinomio generador  $g_i$ , sobre los nodos en un diferencial de volumen, aplicando técnicas de mitigación códec para la cancelación de los patrones de interferencia. Este último término se incorporó a la descripción del comportamiento del sistema, destacando que  $\varphi D$  fue el flujo difractado por el captador estudiado y reflejado en el siguiente elemento, siendo  $\varphi_i$  la entrada al operador de convolución  $\otimes$  del arreglo, proporción de atenuación, la constante elástica de energía potencial en  $j$  (Figura 8) y  $\varphi$  la variable de flujo reflejado neto.

El estudio de la interacción de bloques discretos de energía en los elementos de conversión aerodinámica y mecánica, permitió estimar las ecuaciones del modelo matemático para la configuración del *hardware*, a través del sistema de ecuaciones descriptivas en las Ecuaciones 4 a 7:

$$\varphi_i(n) = f_a(v_x, v_y, v_z) \quad (4)$$

$$T_m(n) = \sum_{i=1}^n w_{x,y,z}(n) \cdot \varphi_i(n) + (1-\Phi) \cdot T_m(n-1) + \text{bias} \quad (5)$$

$$\varphi_m(n) = \pi \sum_{i=1}^n w_{x,y,z}(n) \cdot \varphi_i(n) + (1-\Phi) \cdot \varphi_m(n-1) + \epsilon \Delta_{i,j} \varphi_m(n) \quad (6)$$

$$P_m(n) = w_{\text{conv}} \sum_{i=1}^n w_i(n) \cdot \varphi_m(n) + (1-\Phi) \cdot \varphi_m(n-1) + \epsilon \Delta_{i,j} \varphi_m(n) \quad (7)$$

Las ecuaciones del modelo con parámetros adaptativos fueron compatibles, tanto para cometas eólicas como nuevas tecnologías. Se incorporó un término  $\epsilon \Delta_{i,j} \varphi_m(n)$ , en el cual se pudo aplicar álgebra de campos finitos para el control del efecto de difracción de los captadores sobre la distribución de elementos en el parque eólico, por compensación geométrica LFSR.

### Realimentación de flujo, energía remanente y dinámica de información

La recirculación de flujo a la salida del arreglo se pudo realizar mediante lentes eólicas, por configuración geométrica (Sandoval-Ruiz, 2023c) del radio y ángulo de apertura respecto a los ejes YPR (Sandoval-Ruiz, 2023d), en un patrón de proyección toroidal (Sandoval-Ruiz, 2023e), a fin de atenuar el índice de turbulencia por control de flujo proyectado. Es importante mencionar que se extrapoló la aplicación del operador de convolución de teoría de la información, lo que permitió simplificar el modelo de forma generalizada. Como resultado de lo anterior, se consideraron factores que el modelo teórico convencional de mecánica de fluidos no incorporaba.


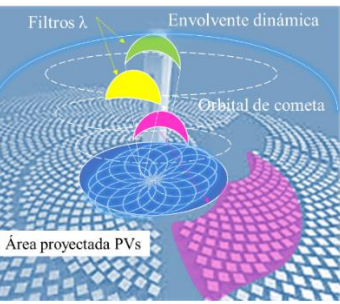
### Aplicabilidad del modelo sobre sistemas de conversión de energía instalados

En primer lugar, se planteó la recolección de datos de potencial energético en la zona de estudio, para contar con la rosa de viento del sistema eólico y los reportes del sistema instalado. A estos datos se adicionó la medición de variables de salida, como la temperatura, presión, índice de turbulencia, etc. Se definió el patrón de difracción del elemento sobre la superficie proyectada del captador y su efecto sobre los otros elementos y el entorno, para establecer la configuración óptima variando parámetros geométricos, posición de captadores, trayectoria y compensación simétrica entre los patrones de proyección-captación, para anular los efectos de la estela de viento. Con los parámetros teóricos calculados sobre el algoritmo en VHDL, se realizó la configuración de la lente eólica (que corresponde a los coeficientes del modelo), a fin de lograr la optimización del sistema SDRE sobre la infraestructura instalada, mediante el cálculo de los coeficientes del modelo matemático.

Hasta ahora los modelos matemáticos habían estudiado la realimentación de energía potencial por volante de inercia en el eje del convertidor eólico (Sandoval-Ruiz, 2022), sin embargo, los efectos de flujo reflejado por las cometas eólicas (aerogeneradores), lente eólica y elementos de la red de difracción, no se habían considerado. En esta investigación se propone una técnica novedosa para establecer la recirculación de flujo eólico a favor de la realimentación de un componente en el modelo matemático, dotando así al sistema instalado en el parque eólico de un término paramétrico adicional para el control selectivo de los componentes de difracción de la red de captadores eólico, a fin de mitigar el impacto ambiental. Se logró definir un término de realimentación de flujo difractado, que además de considerar la compensación de forma cualitativa, definido en función de parámetros físicos como la distancia entre elementos del arreglo, logró demostrar de forma cuantitativa la mejora de eficiencia, mediante el ajuste del coeficiente de realimentación ( $w_r$ ), a través del algoritmo adaptativo.

El esquema planteado, minimiza el consumo de recursos y permite la adaptación de la capacidad instalada para la migración y optimización con diseño de tecnología biomimética. Resulta importante mencionar que en los modelos neuronales se reporta un término de holgura (bias) que no está relacionado con el sistema físico, en este modelo se logró correlacionar este término con variables del sistema, lo que introduce un parámetro de optimización adicional. A partir de la contribución alcanzada de optimización por compensación de impacto del sistema aplicando modelado matemático, se amplían las herramientas de ingeniería CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) a dinámica cuántica de fluidos, para la restauración del patrón de flujo eólico, control inteligente y geometría configurable, entre otras aplicaciones sostenibles, del modelo desarrollado, lo cual se resume en en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Postulado de aplicaciones a sistemas de energías renovables sostenibles.

Tecnología	Descripción de aplicaciones del modelo propuesto
	<p>El diseño de un arreglo de cometa captador de energía, inspirado en la arquitectura de la flor de diente de león. Consideraciones de captadores solares: i) geometría fractal del arreglo captador, ii) guía de onda (fibra óptica) para disminuir pérdidas por dispersión en la atmósfera, y iii) estudio de compatibilidad de los ensayos para arreglos fotovoltaicos instalados (Sandoval-Ruiz, 2020b) y desarrollo de nuevas tecnologías. Consideraciones de arreglos eólicos <math>\pi</math>-LFSR: modelos <math>F(f(t), x, y, z, t)</math> en 5D (Cardesa <i>et al.</i>, 2017), donde las limitaciones dimensionales se solventan por variables acotadas en campos finitos GF (del inglés <i>Galois Fields</i>), así como la aplicación de técnicas de control adaptativo (Dief <i>et al.</i>, 2020), configuración de topología (Castelino <i>et al.</i>, 2022) y trayectoria del arreglo de cometas captadoras (Schutter <i>et al.</i>, 2023).</p>
	<p>Diseño de cascada de fotones, aplicando tecnología de receptores de caídas de partículas (Mills <i>et al.</i>, 2020), basado en un arreglo de cometas de redireccionamiento de radiación solar, sobre un área de barrido en distribución Fibonacci, seguimiento y concentración solar, como un lente de difracción holográfico, con selectividad de longitud de onda, parámetros ópticos, control de trayectoria, índice de difracción. Arreglos fotovoltaicos LFSR, con registro de desplazamiento entre capas polarizadas (Sandoval-Ruiz, 2020 b,c,d), y recirculación de fotones a través de espejos cíclicos (infinitos) para onda difractada y reflejada.</p>

Con respecto a las recomendaciones para trabajos futuros, el estudio puede ser extrapolado a otras aplicaciones, por ser compatible para soluciones de sistemas fotovoltaicos convencionales, a partir del modelado del sistema y la incorporación de una solución flexible de optimización, como es el caso de cometas ópticas (lentes holográficos por ionización de plasma para concentración, transmisión o reflexión selectiva) sobre las superficies proyectadas de plantas fotovoltaicas instaladas, donde el código desarrollado puede ser aplicado para el modelo de un arreglo inteligente de seguimiento solar y redireccionamiento de haz de fotones, simplificando el mantenimiento de la matriz fotovoltaica, por disminución de piezas móviles y ahorro energético. Se plantea así la incorporación en los arreglos captadores de nuevas tecnologías: filtros ópticos ultravioletas e infrarrojos para protección de glaciares, bosques y áreas forestales en las áreas proyectadas de cobertura del arreglo de cometas captadoras, filtros de aire para captación de CO<sub>2</sub> y material particulado, así como fotovoltaica incorporada al arreglo de cometas y el aprovechamiento de potencial térmico residual, entre otras ventajas.

## Conclusiones

Gracias a la identificación de un patrón de correspondencia entre el sistema físico y su equivalente matemático, se logró el objetivo de generalizar un modelo de arreglo inteligente de captadores de energía. De la reinterpretación del arreglo como un lente de difracción, se obtuvo una descripción del comportamiento mediante la combinación lineal de las variables de entrada y realimentación ponderada de energía residual. Incorporar los términos de energía acumulada y coeficientes de compensación de patrones de interferencia, permitió establecer un modelo escalable, por concatenación de etapas autosimilares, aportando así las ecuaciones descriptivas para la evaluación de reemplazo de tecnologías en el tiempo, hacia sistemas de energías sostenibles en Latinoamérica. Otro aporte fue la simplificación de complejidad de la estructura del circuito  $\pi$ -LFSR, que permite establecer un “entretejido” matemático de los bloques discretos de energía, dados por la memoria del sistema, los coeficientes del arreglo, sucesiones y progresiones geométricas, donde se observó la proporción geométrica  $\Phi$  en la realimentación y en el tratamiento de los patrones de interferencia. Se logró obtener un incremento de 11,08 % de la eficiencia, reportando en el ensayo de validación un error medio en el orden de 0,38 del modelo teórico del arreglo xyz de cometas eólicas, a partir de la configuración de flujo a la salida del arreglo, siendo este criterio un componente fundamental en la optimización dinámica del modelo sostenible.

## Referencias Bibliográficas

- Baker, A. K., Hamein, N., Alirol, O. (2019). The electron and the holographic mass solution. *Physics Essays*, 32(2), 255-262.
- BBC. (2023). *El asombroso fenómeno que nos hace ver colores que no existen* [en línea] disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/articulos/ckre2gnvpkzo> [consulta: 12 octubre 2023].
- Benyus, J. (1997). *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: William Morrow.
- Bird, B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N., Klingenberg, D. J. (2013). *Introductory transport phenomena*. New York: Wiley.
- Cardesa, J. I., Vela-Martín, A., Jiménez, J. (2017). The turbulent cascade in five dimensions. *Science*, 357(6353), 782-784.
- Castelino, R., Kashyap, Y., Kosmopoulos, P. (2022). Airborne kite tether force estimation and experimental validation using analytical and machine learning models for coastal regions. *Remote Sensing*, 14(23), 6111.
- Castellanos, J., Sandoval, C., Azpúrua, M. (2014). Implementación sobre FPGA de un Algoritmo LMS para un arreglo de antenas inteligentes. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(3), 270-278.
- Chowdhury, N., Shakib, M. A., Xu, F., Salehin, S., Islam, M. R., Bhuiyan, A. (2022). Adverse environmental impacts of wind farm installations and alternative research pathways to their mitigation. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100415.
- Dief, T., Fechner, U., Schmehl, R., Yoshida, S., Rusdi, M. (2020). Adaptive flight path control of airborne wind energy systems. *Energies*, 13(3), 667.
- French, A. P. (1974). *Vibraciones y ondas. Curso de Física del M.I.T.* Primera edición. Barcelona: Editorial Reverté.

González, L. G., Figueres, E., Garcerá, G., Carranza, O. (2016). Diseño de un emulador para sistemas de conversión de energía eólica. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 38(2), 159-168.

González, A., Hinojosa, J. (2019). Study of the influence of protuberances in the trailing edge of airfoils and determination of their aerodynamic efficiency through CFD using Ansys Fluent. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 35(3), 1-6.

Grant, R., Ghannam, T., Kennedy, A. (2021). *A novel geometric model of natural spirals based on right triangle polygonal modular formations* [on line] disponible en: <https://arxiv.org/abs/2111.02895> [consulta: 12 octubre 2023].

Hagen, L., Petrick, K., Wilhelm, S., Schmehl, R. (2023). Life-cycle assessment of a multi-megawatt airborne wind energy system. *Energies*, 16(4), 1750.

Howland, M., Quesada, J., Martínez, J. (2022). Collective wind farm operation based on a predictive model increases utility-scale energy production. *Nature Energy*, 7, 818-827

Hu, Y., Huang, Z., Cao, Y., Sun, Q. (2021). Kinetic insights into thrust generation and electron transport in a magnetic nozzle. *Plasma Sources Science and Technology*, 30(7), 075006.

Lara, M., Garrido, J., Ruz, M. L., Vázquez, F. (2021). Adaptive pitch controller of a large-scale wind turbine using multiobjective optimization. *Applied Sciences*, 11(6), 2844.

Lehn, J., Benyus, J. (2012). *Bioinspiración y biomimética en química: naturaleza de ingeniería inversa*. New York: John Wiley & Sons.

Lellis, M., Mendonga, A., Saraiva, R., Trofino, A., Lezana, A. (2016). Electric power generation in wind farms with pumping kites: an economical analysis. *Renewable Energy*, 86, 163-172.

Liu, H., Tian, Y., Liu, W., Jin, Y., Kong, F., Chen, H., Zhong, Y. (2023). Aerodynamic interference characteristics of multiple unit wind turbine based on vortex filament wake model. *Energy*, 268, 126663.

López, A. C., Parra, H. G., Guacaneme, J. A. (2023). Análisis de torque en turbinas eólicas con generadores de vórtice y variaciones de temperatura mediante volúmenes finitos. *Información Tecnológica*, 34(3), 11-20.

Martín, P., Elena, V., Fernández, I. Loreda-Souza, A. (2019). Coeficientes de arrastre de torres reticuladas con antenas VHF mediante ensayo en túnel de viento. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 42(3), 118-125.

Marturet Pérez, G. J., Marturet García, G. E., Guerra Silva, R. A., Torres, M. J., Torres Monzón, C. F. (2023). Análisis CFD sobre la influencia del ángulo de ataque en el coeficiente de potencia de turbinas helicoidales Gorlov. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 46(1), e234609.

Mathis, R., Fagiano, L. (2022). *Production cycle optimization for pumping airborne wind energy systems*. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Airborne Wind Energy Conference (AWEC 2021). Milano: Delft University of Technology, 97.

Merino, M., Nuez, J., Ahedo, E. (2021). Fluid-kinetic model of a propulsive magnetic nozzle. *Plasma Sources Science and Technology*, 30(11), 115006.

Mills, B., Shaeffer, R., Yue, L., Ho, C. K. (2020). *Improving next generation falling particle receiver designs subject to anticipated operating conditions*. Proceedings of ASME 2020 14<sup>th</sup> International Conference on Energy Sustainability. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1-8.

National Geographic. (2022). *Desvelando los secretos del vuelo de los colibríes en súper 'slow motion'* [en línea] disponible en: [https://www.nationalgeographic.com/es/naturaleza/desvelando-vuelo-colibris-super-slow-motion\\_15701](https://www.nationalgeographic.com/es/naturaleza/desvelando-vuelo-colibris-super-slow-motion_15701) [consulta: 12 octubre 2023].

Nelson, L., Cox, M. (2009). *Lípidos, Lehninger principios de bioquímica*. Madison: Universidad de Wisconsin, 347.

Ohya, Y., Karasudani, T., Nagai, T., Watanabe, K. (2017). Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 2(2), 1-6.

Qais, M. H., Hasanien, H. M., Alghuwainem, S. (2021). A novel LMSRE-based adaptive PI control scheme for grid-integrated PMSG-based variable-speed wind turbine. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106505.

Prado, R., Storti, M., Idelsohn, S. (2002). Modelo de interacción viscosa-invíscida para turbinas eólicas de eje horizontal. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 204650512.

Prado, R. A., Storti, M. A., Idelsohn, S. R. (2002). Numerical simulation of the 3D laminar viscous flow on a horizontal-axis wind turbine blade. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 16(4), 283-295.

Richmond-Navarro, G., Casanova-Treto, P., Hernández-Castro, F. (2021). Efecto de un difusor tipo wind lens en flujo turbulento. *Uniciencia*, 35(2), 1-18.

Sandoval-Ruiz, C. (2024). ZPF para arreglo de proyección de onda:  $\phi$ -LFSR en modelado  $F_p[x]/f(x)$  de sistemas de energías renovables. *Revista de la Universidad del Zulia*, 15(42), 281-305.

Sandoval-Ruiz, C. (2023a). Biomimética aplicada a modelos de sistemas de energías renovables reconfigurables, basados en estructuras autosimilares. *Revista Técnica Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 46(1), e234602.

Sandoval-Ruiz, C. (2023b). JK-ESS para energías renovables con realimentación híbrida. *Ciencia e Ingeniería*, 44(3), 287-296.

Sandoval-Ruiz, C. (2023c). Kirigami, estructuras geométricas fractales y ondas de luz. *Perspectiva*, 1(21), 44-58.

Sandoval-Ruiz, C. (2023d). YPR-ángulos de alineación para arreglo de cometas de captación de energía eólica:  $\alpha, \beta, \gamma$ -coeficientes de control y mantenimiento de patrones de flujo regenerativos. *Revista Científica UCSA*, 10(3), 3-15.

Sandoval-Ruiz, C. (2023e). Regeneración de espacios basada en geometría proyectiva sobre modelos de envolvente arquitectónica. *Perspectiva*, 2(22), 6-19.

Sandoval-Ruiz, C. (2022). Wind turbine with configurable feedback scheme for minimal environmental impact and maximum efficiency. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 26(112), 123-136.

Sandoval-Ruiz, C. (2021a). LFSR optimization model based on the adaptive coefficients method for ERNC reconfigurable systems. *Ingeniare Revista Chilena de Ingeniería*, 29(4), 743-766.

Sandoval-Ruiz, C. (2021b). Smart systems for the protection of ecosystems, flora and fauna. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 25(110), 138-154.

Sandoval-Ruiz, C. (2021c). Fractal mathematical over extended finite fields  $F_p[x]/(f(x))$ . *Proyecciones Journal of Mathematics*, 40(3), 731-742.

Sandoval-Ruiz, C. (2020a). LFSR-rfactual ANN model applied in RIEDs for smart energy. *IEEE Latin America Transactions*, 18 (4), 677-686.

Sandoval-Ruiz, C. (2020b). Arreglos fotovoltaicos inteligentes con modelo LFSR-reconfigurable. *Revista Ingeniería UCR*, 30(2), 32-61.

Sandoval-Ruiz, C. (2020c). Proyecto Cometa Solar-CS para optimización de sistemas fotovoltaicos. *UCT*, 24(100), 74-87.

Sandoval-Ruiz, C. (2020d). Arreglo inteligente de concentración solar FV para MPPT usando tecnología FPGA. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 43(3), 122-133.

Sandoval-Ruiz, C. (2019). Modelo VHDL de control neuronal sobre tecnología fpga orientado a aplicaciones sostenibles. *Ingeniare Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 383-395.



Sandoval-Ruiz, C. (2013). *Optimized model of the reed-solomon encoder (255,k) in VHDL through a parallelized LFSR*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad de Carabobo.

Schutter, J., Leuthold, R., Bronnenmeyer, T., Malz, E., Gros, S., Diehl, M. (2023). AWEbox: an optimal control framework for single-and multi-aircraft airborne wind energy systems. *Energies*, 16(4), 1900.

Siddiqui, M. S., Khalid, M. H., Zahoor, R., Butt, F. S., Saeed, M., Badar, A. W. (2021). A numerical investigation to analyze effect of turbulence and ground clearance on the performance of a roof top vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy*, 164, 978-989.

Tomás Rodríguez, M., Santos, M. (2019). Modelado y control de turbinas eólicas marinas flotantes. *RIAI*, 16(4), 381-390.

Tong, R., Li, P., Lang, X., Liang, J., Cao, M. (2021). A novel adaptive weighted kernel extreme learning machine algorithm and its application in wind turbine blade icing fault detection. *Measurement*, 185, 110009.

Universidad de Chile. (2023). *Explorador eólico* [en línea] disponible en: <https://eolico.minenergia.cl/inicio> [consulta: 12 octubre 2023].

Villavicencio Quezada, I. (2015). *Niveles de agregación de parques eólicos con capacidad de regulación de frecuencia*. Tesis de grado. Santiago: Universidad de Chile.

Watanabe, K., Takahashi, S., Ohya, Y. (2016). *Application of a diffuser structure to vertical-axis wind turbines*. *Energies*, 9(6), 406.

Wu, H., Wang, Z., Hu, Y. (2010). *Study on magnetic levitation wind turbine for vertical type and low wind speed*. Proceedings of 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu: IEEE, 1-4.

Zempoalteca-Jimenez, M., Castro-Linares, R., Alvarez-Gallegos, J. (2021). Trajectory tracking flight control of a tethered kite using a passive sliding mode approach. *IEEE Latin America Transactions*, 20(1), 133-140.

Zhang, Y., Li, Z., Liu, X., Sotiropoulos, F., Yang, X. (2023). Turbulence in waked wind turbine wakes: Similarity and empirical formulae. *Renewable Energy*, 209, 27-41.

Zehtabiyani-Rezaie, N., Iosifidis, A., Abkar, M. (2023). Physics-guided machine learning for wind-farm power prediction: toward interpretability and generalizability. *PRX Energy*, 2(1), 013009.

**Editor Asociado:** *Jorgenson José Zambrano Arenas*  
Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica  
de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia  
Maracaibo, 4001, Zulia, Venezuela  
[jorgensonz@gmail.com](mailto:jorgensonz@gmail.com)



UNIVERSIDAD  
DEL ZULIA

---

## **REVISTA TECNICA**

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

**Volumen 47. Año 2024, Edición continua**\_\_\_\_\_

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en marzo 2024, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.** Maracaibo-Venezuela*

[www.luz.edu.ve](http://www.luz.edu.ve) [www.serbi.luz.edu.ve](http://www.serbi.luz.edu.ve)  
[www.produccioncientificaluz.org](http://www.produccioncientificaluz.org)