

Turbinas eólicas con esquema de realimentación configurable para mínimo impacto ambiental y máxima eficiencia

Sandoval Ruiz Cecilia E

<http://orcid.org/0000-0001-5980-292X>

cesandova@gmail.com

Facultad de Ingeniería, Instituto de Matemática y

Cálculo Aplicado,

Universidad de Carabobo,

Valencia, Venezuela

Recibido (21/03/22) Aceptado (10/04/22)

Resumen: El presente trabajo consta de un estudio de configuraciones de turbinas eólicas, analizando su eficiencia y planteando etapas de optimización para las tecnologías de conversión de energía eólica. Lo que ha permitido establecer un modelo reconfigurable de turbinas adaptativas, bajo los criterios de mínimo impacto ambiental sobre la fauna, máxima eficiencia energética y actualización dinámica a las nuevas tecnologías. El método consistió en la identificación de los parámetros del sistema eólico, su análisis y generalización de la arquitectura. Se obtuvo un conjunto de variables de optimización, que permitieron proponer técnicas innovadoras, para la adaptación del modelo configurable del sistema. El modelo desarrollado aporta una base para identificación de parámetros, diagnóstico en línea, etapas de optimización configurables sobre las turbinas eólicas instaladas, mejora la eficiencia, remediación ambiental y regeneración de las condiciones de patrón de flujo y variables ambientales óptimas del sistema, además de reciclaje programado en la etapa de actualización tecnológica

Palabras Clave: Turbinas Eólicas, Optimización Dinámica, Sistemas Reconfigurables, Regeneración Ambiental.

Wind Turbine with Configurable Feedback Scheme for Minimal Environmental Impact and Maximum Efficiency

Abstract: This work consists of a study of wind turbine configurations, analyzing their efficiency and proposing optimization stages for wind energy conversion technologies. This has made it possible to establish a reconfigurable model of adaptive turbines, under the criteria of minimum environmental impact on fauna, maximum energy efficiency and dynamic updating to new technologies. The method consisted in the identification of the parameters of the wind system, its analysis and generalization of the architecture. A set of optimization variables was obtained, which allowed proposing innovative techniques for adapting the configurable model of the system. The developed model provides a basis for the identification of parameters, online diagnosis, configurable optimization stages on the installed wind turbines, improves efficiency, environmental remediation and regeneration of the flow pattern conditions and optimal environmental variables of the system, as well as recycling. programmed in the technological update stage.

Keywords: Wind Turbines, Dynamic Optimization, Reconfigurable Systems, Environmental Regeneration.



I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la energía eólica, [1] ha presentado un informe centrado en el desmantelamiento y reciclaje de las turbinas, donde se mencionan como últimas tendencias: la repotenciación y extensión del ciclo de vida de los equipos. Así mismo, [2] presenta una revisión del potencial para la recuperación de componentes. Lo que evidencia una necesidad de migración hacia sistemas reconfigurables, en el marco de las tecnologías emergentes y soluciones sostenibles, en todas las etapas de la industria eólica, a fin de disminuir su impacto ambiental.

En [3] se ha desarrollado un modelo de optimización basado en arquitectura LFSR (Linear Feedback Shift Register), interpretado como una unidad multi-etapa de bloques discretos de energía con realimentación lineal. La extensión del modelado ha sido considerado, en esta investigación, para aplicar la reconfiguración dinámica de la estructura, adaptación de los coeficientes del polinomio modelador, diagnóstico remoto y análisis de fallas.

En este orden de ideas se plantea un sistema eólico con esquema de realimentación configurable, que comprende el análisis del patrón de flujo de viento (laminar, turbulento), como un elemento de entrada al convertidor (flujo axial, radial o composición toroidal), toda vez que el efecto aguas debajo de los álabes pueda ser mitigado por el esquema de realimentación de energía residual: cinética, mecánica, térmica, eléctrica de la turbina.

Por todo lo anterior, es de interés establecer la compatibilidad entre el modelo de los sistemas eólicos, con conceptos de sistemas de potencia definidos por software y eólica cognitiva, para la configuración dinámica de los convertidores, en relación a las condiciones ambientales y patrones de viento. De manera tal de establecer la adaptación del sistema reconfigurable, basados en estructuras inteligentes. Lo que hace oportuno considerar técnicas de lazo en hardware y gemelos digitales [4], a través de dispositivos electrónicos conectados al sistema para su reconocimiento, cálculo y ajuste de parámetros de interés en el modelo, que logren proveer al sistema de la adaptabilidad requerida.

En [5] se presenta el diseño de un control para sistemas reconfigurables, aplicable a las investigaciones en modelado de turbinas eólicas [6] y en el presente estudio aborda una nueva técnica de modelado para turbinas eólica reconfigurables – TER, donde se plantea el análisis de aportes de los módulos del sistema. Partiendo de la interpretación de bloques de energía en las turbinas eólicas, concepto que se extrapola al sistema eólico.

Entre los módulos de optimización concatenados se consideran concentradores, acoplamientos mecánicos,

módulos de direccionamiento, mecanismo de plegado, sistema de protección ambiental (fauna aérea), configuración de álabes y adaptación de parámetros: altura, radio, perfil aerodinámico, inclinación, ángulo de pitch, configuración del eje, patrón de flujo, alineación entre turbinas, etapa de almacenamiento y realimentación de energía. Así como una etapa de remediación ambiental, a partir del filtrado y regeneración dinámica del patrón de flujo de viento. Todo esto a través de una plataforma de actualización y reutilización de componentes, en turbinas reconfigurables, así como los nuevos elementos que surjan de los avances científicos en el área.

De esta manera, tenemos que un aporte fundamental de la investigación es la estructura de concatenación de elementos del sistema eólico, a través de teoremas, operadores iterativos [7], aplicados al modelo matemático de las partes componentes, a fin de establecer la relación descriptiva con el sistema físico. Los componentes paralelos del esquema LFSR procesan la señal de entrada, cada rama del arreglo corresponde a un módulo de optimización, donde destacan el concentrador de perfil eólico, convertidor, mecanismos de protección de fauna, soportes de levitación magnética – MagLev.

Para el estudio del sistema se deben considerar técnicas de optimización en modelado de parques eólicos [8], [9], la interacción [10], modulación de patrón de flujo de viento y efecto de realimentación entre turbinas alineadas y sistemas de almacenamiento de energía de fuentes renovables [11] para realimentación en régimen permanente, lo que permite evidenciar la necesidad de modelos para sistemas compuestos, que en esta investigación se aborda como un arreglo eólico con estructura fractal LFSR.

El objetivo de la investigación es definir un método de modelado por correlación estructural, a través de ecuaciones descriptivas, basadas en la arquitectura LFSR, considerando el desplazamiento de bloques discretos de energía y realimentación de energía, para las turbinas y componentes del sistema eólico, a fin de soportar la configuración sobre hardware y la optimización dinámica de la eficiencia energética del sistema.

Las técnicas de mitigación propuestas en esta investigación para disminución del impacto ambiental de las turbinas eólicas, consta de tres ejes: (i) conservación de la fauna, mediante rejillas de protección, instalación mínimamente invasivas en los ecosistemas y regeneración de las condiciones del régimen de flujo de viento aguas abajo del arreglo eólico, así como control de vibraciones y ruido ambiental, inspirados en los mecanismos de vuelo de las aves nativa (ii) maximización de la eficiencia energética del convertidor, a través de técnicas de optimización dinámicas, ajustadas a las condiciones

ambientales y temperatura, a fin de hallar el mayor coeficiente de transferencia de energía cinética al mecanismo y minimizar pérdidas de conversión del sistema eólico y (iii) reconfiguración modular de las etapas y componentes funcionales de las turbinas, para extender su vida útil, recuperar componentes y actualizarlos a nuevas tecnologías, así como el diagnóstico remoto del sistema para su inspección en tiempo real, adaptación y mantenimiento oportuno de los mecanismos.

II. DESARROLLO

A. Estudio de componentes del Sistema Eólico Configurable.

El modelo planteado aplica procesamiento concurrente, a partir del rango de comportamiento lineal donde se superponen los efectos de la optimización de cada módulo, con el propósito de simplificar el proceso de identificación del sistema / configuración dinámica de parámetros sobre hardware en el FPGA optimizador, acoplando/desacoplando módulos de forma selectiva. Se busca el equilibrio entre el aporte de cada componente, en la etapa inicial por componentes linealmente

independientes, seguido de la entonación (sintonización fina) del conjunto, a fin de validar la configuración óptima del convertidor y configuración del arreglo colaborativo.

En la Figura 1 se plantea el esquema de modelado por etapas, se definen los módulos a estudiar (a través de un decodificador de habilitación) y se selecciona el método de estimación de coeficientes del sistema, a través de una red neuronal artificial – ANN. Para ello, se pueden establecer ganancias óptimas de acuerdo a datos conocidos de módulos específicos y habilitar etapas para su análisis, configuración dinámica y optimización de eficiencia, ciclo rotores de geometría fractal Fibonacci por movimiento helicoidal, maximizar ganancia cinética y restablecimiento de condiciones óptimas del fluido (en turbinas eólicas o turbinas marinas), aplicando coeficientes adaptativos para el modelo de configuración del hardware, considerando movimiento toroidal entre álabes configurables, turbinas sin hélices (sumideros de presión en espacio vacío central) accionadas por el vector de empuje, sistemas cerrados accionados por inducción, para interacción mínima con el entorno.

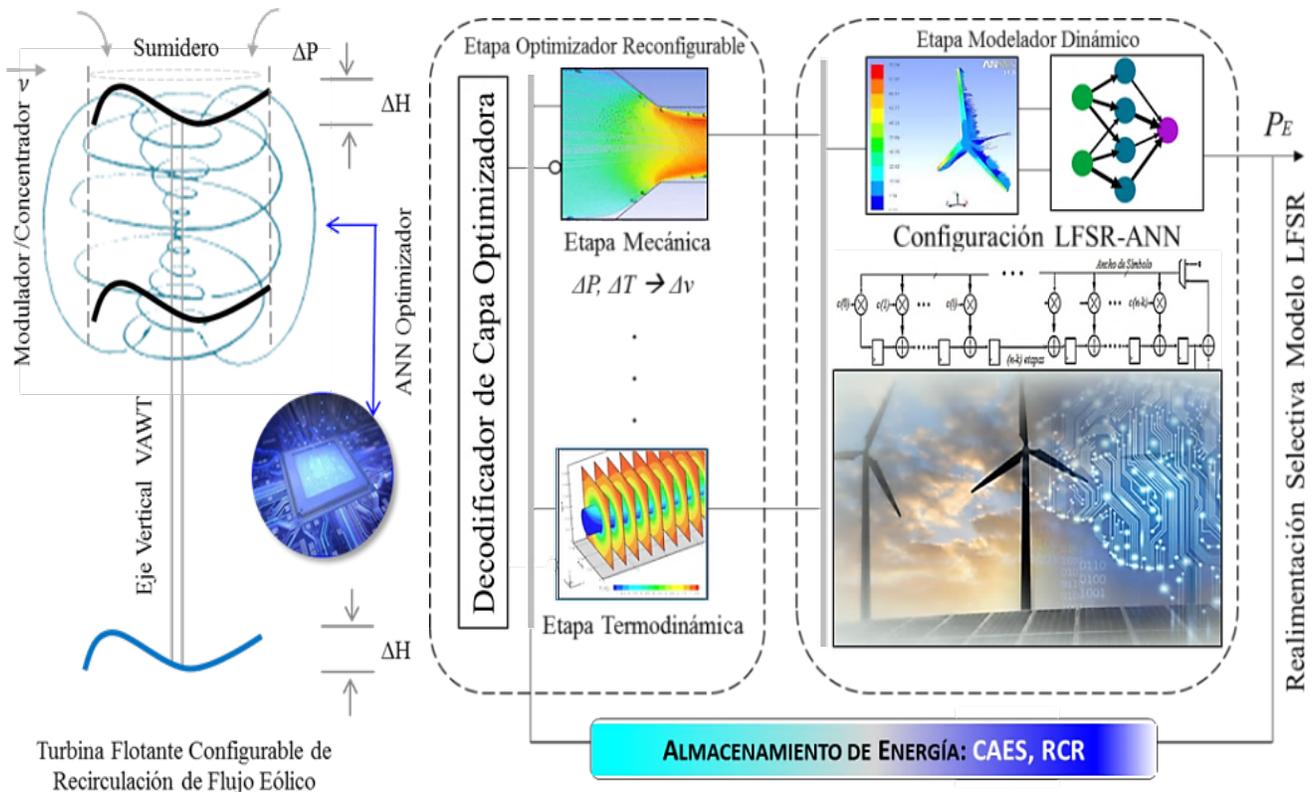


Figura 1. Esquema Conceptual de Eólica Reconfigurable

El decodificador permite habilitar el modo de configuración de cada etapa o subred modeladora y los coeficientes específicos del polinomio descriptor, con el propósito de simplificación. Finalmente, durante la etapa de operación se pueden integrar módulos en simultáneo, para un ajuste complementario de las variables de control. Las salidas del optimizador son las señales de configuración de los módulos diseñados para optimización del arreglo eólico.

Si bien la tecnología eólica configurable no está ampliamente desarrollada, el modelado de etapas parametrizables permitirá registrar el impacto de cada uno de los cambios en la configuración sobre el rendimiento total del sistema, con lo que se pueden reemplazar componentes de ciertas etapas y optimizar de forma modular el esquema diseñado del arreglo de convertidores eólicos. Para soportar posibles cambios, reemplazos y partes intercambiables como concentradores de perfil de viento, elementos aerodinámicos, tecnología de soportes, álabes y accesorios en las estructuras, se plantea el modelado dinámico de la planta y su optimización in situ. Actualmente existe un gran avance en el modelado de álabes para turbinas así como muchos diseños de aerogeneradores (AG) que convierten la energía mecánica a eléctrica con una gran eficiencia, a través del con-

trol de pérdidas por fricción en el eje de acoplamiento, siendo de interés el estudio de nuevas tecnologías como rodamientos de levitación magnética (MagLev), los cuales pueden influir considerablemente en la eficiencia total de la máquina.

B. Estrategia de Optimización con Tecnología FPGA

La integración de tecnologías de alto costo computacional representa un reto para los sistemas eólicos, donde se plantea la configuración del esquema de control y optimización, a través de tecnología FPGA, para la extensión del concepto de hardware reconfigurable, hasta los componentes del arreglo eólico. De esta forma, se puede reconfigurar la arquitectura del modelo para aplicaciones de control y optimización (Ver Tabla 1), aplicando algoritmos adaptativos para el cálculo de coeficientes dinámicos, a través de métodos de estimación por aproximaciones sucesivas, gradiente descendiente, diferencias finitas, entre otros. De forma tal que los cambios en el sistema eólico puedan ser seguidos por el modelo matemático para la identificación de sistemas, diagnóstico de condiciones por comparación con los parámetros de diseño del modelo, optimización y reconfiguración dinámica.

Tabla 1. Aplicaciones del Modelo LFSR-ANN sobre FPGA

Configuración Parcial Dinámica del Dispositivo FPGA				Configuración Dinámica del Mecanismo de la Turbina Eólica	
Etapa previa	Parámetros variables		Arquitectura Dinámica		
Aplicación	Configuración Dinámica, Optimización, Repotenciación				
	↑ Del Modelo al Sistema				
Concentrador LFSR _C	J _{ÁLABES} Radio	J _{EJE} Acoplamiento	Coeficientes adaptativos Coef. Modelo		
Regulador Doble Flujo Axial/Radial	Nro. álabes Altura Geometría	Soporte Posición Diseño	Nro. de ramas del LFSR Fibonacci Galois Modelo Modelo		
	↓ Del Sistema al Modelo				
	Identificación de Sistema, Diagnóstico por modelo				
Algoritmo Adaptativo	Parámetros físicos del mecanismo de la Turbina Eólica				
	$w_i \leq w_i(t-1) + \mu e(t)$; calculando $e(t) \leq T_m(t) - T_d(t)$				

EJE CAPTADOR: $T_m = \sum_{i=1}^N w_A(i) * x_i(t) + x_R(t-1)$

En [12] se definió una red neuronal fractal, entre sus principales ventajas se tiene la flexibilidad para modelar sistemas compuestos, a través de subredes. Ahora bien, un aspecto importante consiste en definir una función de transferencia que permita establecer la relación entre variables físicas, siendo esto uno de los aportes del presente trabajo, específicamente en el caso de las turbinas eólicas. Haciendo una consideración de la realimentación de energía potencial al sistema. El modelo permite así definir sistemas de control de paso y velocidad variable, para adaptar el desempeño de la turbina eólica.

En este trabajo se presenta el desarrollo de las ecuaciones de soporte de operación LFSR, estableciendo

la descripción la dinámica del proceso de conversión eólica. Así mismo, se propone un algoritmo de estimación de coeficientes adaptativos orientado a hardware, al cual se le pueden incluir variantes específicas para los módulos de optimización de los sistemas eólicos, desde un planteamiento de etapas funcionales, con estructura fractal, a fin de aprovechar la auto-similitud entre el esquema de control, optimización, las estructuras del mecanismo y sus componentes, desde una interpretación de cada parámetro, para simplificar las técnicas de optimización dinámica del recurso eólico, de manera de establecer la configuración más eficiente según las condiciones ambientales y la carga del sistema, su co-

respondencia en el modelo desarrollado, desde el nivel de osciladores acoplados [13], hasta los avances en turbinas eólicas (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Técnicas de Optimización y Conceptos de Tecnologías Eólicas Estudiadas

Conceptos Adaptados	Innovación Tecnológica	Aporte en Criterios Ambientales
Materiales y Estructuras Reconfigurables Control activo de flujo	Estudio de perfiles basados en ecuaciones de variables físicas (viscosidad dinámica, cantidad de movimiento lineal) y métodos de volúmenes finitos [14].	Reutilización de materiales de los álabes de las turbinas. Regeneración del patrón de flujo de viento aguas abajo de la turbina.
Concentradores de flujo	Técnicas de turbina eólica aumentada por conductos [15], en lentes de viento recta, curvada y generadores de vórtice.	Mejoras de eficiencia a través de estructuras cerradas para protección.
Turbinas Híbridas Sist. Regenerativos	Mecanismo de accionamiento mecánico: eólico - neumático (aire comprimido CAES) al eje de la turbina híbrida [16].	Almacenamiento por aire comprimido, con mínimo impacto ambiental.
Turbinas doble rotor	Turbinas secuenciales con etapas en contragiro, para anular el efecto entre si y obtener una salida de flujo laminar.	Turbina externa crea un sumidero eólico. Turbina Interna que aprovecha los vórtices.
Turbinas Concatenadas	Etapas modular exterior Rotor de álabes interno	Protección a las aves.
Turbinas Bi-Rotor	Eólica - Mareomotriz	Bi-Rotor Mareomotriz
Turbinas Reconfigurables	Impresión 3D de componentes, parámetros configurables	Modelo LFSR-Eólico [3]
Turbinas Realimentadas	LFSR de etapas secuenciales de la turbina. Tobera (Magnética o Wind Lens) – Turbina Eólica y Compresor realimentado. Se plantea el acoplamiento de los ejes para obtener las etapas de forma directa. Sistema de Realimentación de la turbina Modelos LFSR eólico-solar [2]	Tobera - Turbina - Compresor. Eje de compresión para realimentación lineal de aire comprimido a la entrada de la tobera de la turbina multi-etapa
Cometas Eólicas Turbinas eólicas flotantes (BAT dirigibles)	Menor huella de carbono, no requieren cimientos de concreto, ni transporte de piezas. Configuración de la altura de la turbina eólica	Son móviles y de simple implementación. No degrada el hábitat y no representa riesgo para las aves.
Convertidores no rotativo Configuración inercial	Resonancia de frecuencia, piezoeléctrico y vórtices [17] Balance de fuerzas inerciales, elásticas y aerodinámicas.	Teoría de osciladores acoplados y conversión por resonancia aeroelástica.
Turbinas Fractales	Aplicación de concepto Fibonacci del LFSR	Turbinas tipo tornillo [18]
Co-generación eólica	MPPT para control de asignación de carga Wind – Solar. Turbinas que aprovechan la convección por diferencia de temperatura [19].	Eólica / Aero-térmica Recuperación de calor ambiental.
Lentes Eólicas	<i>Wind Lens</i> , Turbinas con concentradores de flujo, las cuales alcanzan altos coeficientes de potencia [20-21]	Concentrador por lentes de potencial eólico, aplicado por etapas LFSR.
Turbinas Alineadas	Realimentación en cada esquema bi-estable.	Recuperación de energía cinética
Turbinas direccionales HAWT/VAWT	Modelo de Anillos de Vórtices, sin control de ángulo. Configuración geométrica de Flujo Toroidal por composición de flujo Radial/Axial incidente.	Menos pérdidas de energía cinética, recirculación de flujo de viento, concepto de turbina regenerativa.

C. Control Adaptativo y Optimización basados en Modelo

En [22] se aplican redes neuronales de tercera generación SNN (Spiking Neural Network) a sistemas eólicos, en atención a las limitaciones de las redes MPL – Multiple Perceptron Layer y requerimientos del cálculo del número de capas y neuronas óptimo. Por otra parte, la aplicación de redes profundas para extraer características con diferentes niveles de abstracción presenta desvanecimiento del gradiente, en relación al número de capas de la red neuronal, según se explica en [23], por lo son necesarios nuevos métodos y conceptos de modelado de sistemas eólicos, para alcanzar reducir los costos de actualización y desarrollo de las energías verdes.

Se deberá establecer los criterios de optimización, en base a una mejora del rendimiento del sistema, para

alcanzar la eficiencia óptima. A esta propuesta se propone incorporar un observador de referencia, en base a comportamiento de elementos naturales, que permitan establecer los modelos de optimización (equilibrando todos los componentes), así como una configuración parcial de la arquitectura dinámica y parámetros del sistema, en relación a la matriz de hardware.

El estudio de tecnologías (Ver Tabla 3) los perfiles aerodinámicos, los ángulos óptimos, posiciones del arreglo colaborativo de turbinas y elementos de conversión eólica, modulación eólica por geometría fractal de los álabes y distribución pueden ser modelados de forma dinámica, a través de los coeficientes de configuración, siempre que se disponga de los datos para el entrenamiento, manejando el nivel de abstracción y profundidad lógica de la red neuronal, para modelos con manejo de diversos niveles de abstracción.

Tabla 3. Adaptación de Tecnologías para maximizar la eficiencia del convertidor eólico

Tecnologías	Principio	Descripción de la propuesta de innovación
Turbinas Eólicas Marinas Flotantes (ondas)	Mov. de olas ΔH vertical	Columna de aire Bi-rotor flujo axial vertical generado
	Se aprovecha el diferencial de altura ΔH y presión ΔP para crear un flujo vertical para la turbina	
Control LFSR de aproximaciones sucesivas de variable ángulos óptimos	Control de ángulo góndola	Las variables de ángulos se registran en el LFSR de control $w=f(\alpha)$ Ángulo α : m bits (MSB) góndola (LSB) pitch, se aproximan de MSB a LSB en LFSR y observa P (KW) óptima y ajusta $\alpha=f^1(w)$.
	Control de ángulo pitch	
	Control de ángulo concentrador	
Se evalúa el modelo con respecto a una función objetivo de potencia y las restricciones establecidas de variables ambientales.		
Control MPPT para Almacenamiento intermedio (cambio UC x Energía Potencial elástica)	MPPT con UC inercial	Algoritmo MPPT para cargar un dispositivo de almacenamiento o sistema CAES y luego acoplar el circuito de carga eléctrica.
	PWM torque-potencia (KW)	
	Energía Cinética óptima (Ec. Conservación de energía)	Energía regenerativa por almacenamiento mecánico en potencial elástico: Cilindro neumático (pistón), volante de inercia, resorte.
Turbina HAWT - VAWT	Turbina de eje configurable	Configuración del patrón de flujo Axial / Radial.

III.METODOLOGÍA

El método de modelado se basa en la identificar la relación de parámetros físicos, flujo de energía y modelo neuronal, en una tabla de correspondencia entre los coeficientes de configuración y habilitadores de accionamiento, para el manejo selectivo de los módulos optimizadores y capas de la ANN, en el cálculo de los parámetros del modelo.

Se inicia por la identificación de parámetros reconfigurables y análisis de eficiencia de las turbinas de eje Horizontal HAWT / Vertical VAWT.

-Se propone una red neuronal multicapa LFSR (LSTM) de aprendizaje profundo como técnica de identificación del sistema, correlación del modelo y parámetros adaptativos.

-Se plantea la correspondencia de parámetros para la identificación y análisis de fallas, de forma dinámica, a fin de simplificar los procedimientos de inspección, diagnóstico y mantenimiento en línea del arreglo de turbinas.

-Se ha considerado una técnica de optimización concatenada y diseño de turbinas reconfigurables de alta eficiencia y bajo impacto ambiental.

oLa estructura de etapas secuenciales: álabes planos y álabes cóncavos.

oRelación Fibonacci en la distribución (distancia óptima) entre las turbinas de un arreglo de turbinas del parque eólico.

oRegulador de flujo de entrada con escotillas de seguridad para la protección de la fauna aérea.

oDiseño de álabes livianos y flexibles (cuerdas, semi-estructurado), para la conversión de energía por resonancia programable, entre la frecuencia de oscilación y la estructura.

oComposición del arreglo binario (turbinas concatenadas y turbinas alineadas).

-Se plantea la reconfiguración de la masa (inercia) del mecanismo, a través de técnicas de configuración por campo magnético. Se considera el efecto aguas debajo de las turbinas, sobre el modelo del patrón de flujo de viento.

En primer lugar, se inicia por el estudio de las etapas mecánica y eléctrica, analizando la interacción dinámica de los bloques discretos de energía, en los elementos aerodinámicos de conversión, a fin de establecer una relación de ganancia por elemento, etapas secuenciales y realimentación entre la etapa final del convertidor y la inicial, donde se tiene un esquema que coincide con la arquitectura LFSR generalizada. Así se establece la relación de la señal de entrada de viento incidente y la salida de par mecánico en el eje de la turbina, expresada en (1).

$$y(t) = w_{OPT}(t) * w_{MOD}(t) * x(t) + w_{FB}(t) * y(t-1) \quad (1)$$

Entre las alternativas de estimación de los coeficientes de correlación se tiene ANN-Fractal, diferencias finitas [24]. A partir del modelo se pueden considerar técnicas de control de cargas. Control del rotor: Álabes telescópico, control del álabes: alerón, control de ángulo pitch individual. Solapa del álabes. Álabes adaptativo, control de torque, para ello se considera la definición de la arquitectura de la turbina, se plantea el diseño bajo el mismo modelo para las piezas funcionales, eje, álabes, soportes. La ecuación modeladora (1) ha sido reescrita en término de las etapas: eólica, mecánica y eléctrica del sistema eólico, para definir un conjunto de criterios de optimización de las turbinas reconfigurables, basadas en el modelo matemático LFSR (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Criterios de Diseño del Sistema Eólico Modelado por ANN-LFSR

<p>Modelado ANN</p> <p>Variables del Optimizador: w_k óptimo \rightarrow ángulo wind configuración <i>wind lens</i>, concentrador, modulador, tobera magnética. w_j óptimo \rightarrow ángulo α (LSB) w_i óptimo \rightarrow ángulo α (MSB)</p>	<p style="text-align: center;">Modelo: $P_e(t) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \sum_{j=1}^n w_j (\sum_{k=1}^l w_k \cdot x(t) + x(t-1)) + T_m(t-1) + P_e(t-1)$</p>
<p>Criterios de Diseño</p>	
<p>Minimizar el Impacto Ambiental del Convertidor</p>	<p>Elementos de protección, tales como rejillas de turbulencia. Se plantean rejillas piezoeléctricas y estructuras geométricas inteligentes, para conformación del patrón de flujo óptimo. Modelo de los sistemas físicos para análisis de interacción de los convertidores con las aves. Delimitación de la turbina para no causar impacto sobre la fauna que circula en los espacios naturales intervenidos. Mantenimiento preventivo por diagnóstico con ANN, reciclaje de álabes programado por software. Regeneración de flujo eólico aguas abajo del parque de aerogeneradores. Técnicas de filtrado de aire. Sistemas aero-térmicos, recuperación y control de índice de energía térmica disipada.</p>
<p>Maximizar la eficiencia del arreglo eólico</p>	<p>Control activo de flujo eólico (toberas magnéticas, <i>wind lens</i>). Modulación Eólica (nuevo concepto de geometría fractal, concatenación de LFSR de convertidores). Control de Pérdidas, técnicas de control de soportes con levitación magnética activos Realimentación de energía (Almacenamiento de energía eólica, CAES-Mecánica, Eléctrica).</p>
<p>Reconfiguración del equipo</p>	<p>Índice de Reconfiguración de partes del equipo > 80% basada en parámetros hardware del modelo.</p>

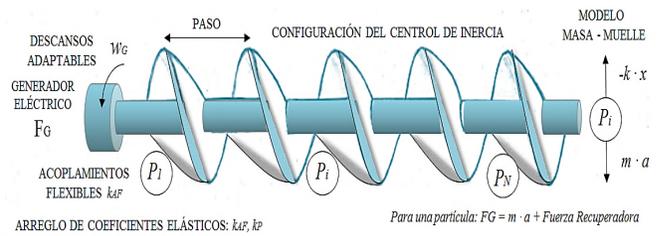
El soporte de la turbina eólica, donde se pueden considerar desde cometas eólicas (flotantes), arreglos funcionales de captadores no rotacionales (materiales livianos y flexibles), conversión piezoeléctrica de vibración por presión de aire y posicionamiento dinámico, aplicando posicionador de inclinación y altura (extensión telescópica). De manera de definir una matriz de componentes modulares y elementos funcionales configurables, a partir de un modelo básico para la auto-organización, basada en el modelo.

En la Tabla 5 se observa la coincidencia a los diversos niveles de abstracción del sistema. En el modu-

lador eólico se encuentran elementos coincidentes con el convertidor, los soportes de ejes o discos (caso de eje vacío), acoplamientos magnéticos y perfiles aerodinámicos. Para esto se enfoca el análisis de osciladores acoplados, interpretado bajo el enfoque de arquitectura LFSR: ganancias paralelas, elementos de almacenamiento entre etapas y realimentación lineal, resaltando la versatilidad de estudiar los álabes no como estructuras rígidas, sino como elementos flexibles: cuerdas, membranas, donde se pueda incluir una conversión por diferencia de potencial.

Tabla 5. Niveles de Abstracción del Sistema Eólico

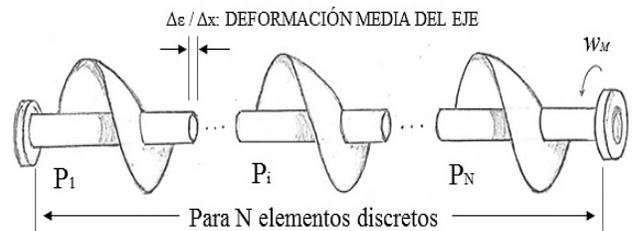
Coefficiente de Ganancia	Descripción	Realimentación	
	Osciladores Acoplados: En las estructuras (álabes, ejes) se puede considerar la interacción de fuerzas sobre una partícula discreta.		
$m \cdot k$	Elementos flexibles acoplados	Potencial Elástico	
Entrada	Elementos del Modelo Mecánico – Etapas LFSR		
	Coef.	Descripción	
Flujo de viento ²	m	Masa	
	k	Acoplamiento	
		Centro de Inercia del eje	
		Acoplamientos dinámicos	
/ Etapas	Operador	Registro	Sumador
Masa-Muelle	$m \cdot a$	$k \cdot x$	F_G
Interpretación mecánica ¹	Transmisión de Energía Cinética	Almacenen E. Potencial	F_R Fuerza Resultante
Energía Cuántica: Spines de energía orbitando respecto a un núcleo.			
QW	Unidades discretas de energía	Energía Residual	
Turbina Eólica de Flujo Axial, Radial o Toroidal: Corresponde al mecanismo del eje y álabes para aprovechamiento del flujo incidente.			
C_i	Álabes de Captación	Energía Cinética	
K_g	Acoplamientos magnéticos	F.E.M.	
K_{CAES}	Entropía	Aire Comprimido	
K_T	Gradiente Térmico	Energía Térmica	
K_{UC}	Ultra-Condensadores	Energía Almacenada	
Arreglo Eólico: Cada turbina tiene una función que define la ganancia y el arreglo establece la interacción entre turbinas de acuerdo a la Alineación del diseño, con realimentación de flujo de viento.			
T_i	Torque mecánico convertido	Energía Eólica	



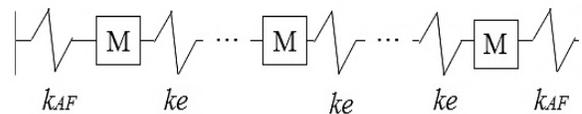
Balace de Fuerzas del Modelo de Osciladores Acoplados

$$F_R = \sum_{i=1}^N m \cdot a + \sum_{i=1}^N -k \cdot x(t - 1)$$

$$F_R = \sum_{i=1}^N \rho_{\phi A} \cdot A_R(i) \cdot a + \sum_{i=1}^N -k \cdot x_i(t - 1)$$



MODELADO POR OSCILADORES ACOPLADOS DEL EJE CONTINUO:



IV.RESULTADOS

A. Caso de Estudio. Modelado LFSR-ANN de Turbinas Eólicas

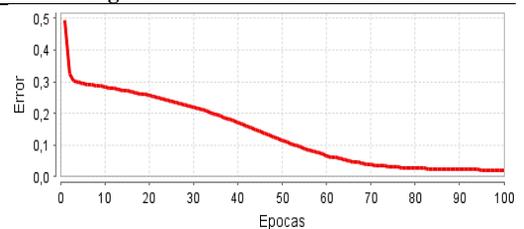
Turbina Eólica Comercial de las siguientes características: Diámetro 116.00 m y Potencia 5000 KW (para

velocidad de viento > 12 m/s y densidad de aire referencial de 1.225 Kg/m³). Datos de la ubicación seleccionada para el ensayo: Densidad de aire (ρ) 1.21 Kg/m³ y rango de velocidad de viento de 2.50 a 8.60 m/s. En la Tabla 6 se tiene el modelo de la turbina de eje horizontal con el generador eléctrico.

Tabla 6. Parámetros de la ANN Modeladora de la Turbina

Entrenamiento de la ANN Modeladora de Turbina ¹				Etapas MEC-ELE	
Capa Oculta 1 (Mec)		Capa Oculta 2 (Eléctrica)		Capa Salida	
2 N Identidad		2 N Sigmoide		1 N Identidad	
Pesos	Umbral	Pesos C.O.2	Umbral	Pesos C.S	Umbral
0.57	-0.73	-0.7	1.01	-0.71	0.76
1.86	0.83	-1.12	-2.12	0.55	-1.84
Resultados del entrenamiento gradiente descendiente				Error 0.0108	
-- cálculo VHDL de salida neurona X capa oculta Y: $NXCOY \leq w * ent_vv - umbral$;					

Convergencia del Entrenamiento de la ANN



* Datos de la salida de potencia de la turbina obtenidos de la herramienta explorador de sistemas eólicos [25]. Los datos de entrada en entrenamiento de la MPL han sido normalizados. Cálculo de la Potencia de Viento por unidad de área. Expresión Matemática de la ANN: $y(t) = 0.76 \text{Sig}(-0.7(0.57 * x(t) - 0.73) + 1.01(1.86 * x(t) + 0.83) - 0.71) - 1.84 \text{Sig}$

$$m((-1.12(0.57*x(t)-0.73)- 2.12(1.86*x(t)+0.83)+0.55))+1.74$$

Para el modelado de la etapa mecánica, se parte de los datos estimados para el cálculo de torque mecánico como señal de entrenamiento (target de la etapa mecánica), a fin de establecer las relaciones con las variables de control físicas, como se presenta en la (Tabla 7).

Tabla 7.A. Cálculo de Torque Mecánico como señal intermedia

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \rightarrow T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \frac{C_p}{\lambda}, \text{ con } C_p = \frac{P_m}{P_v}$$

ρ	1.21 Kg/m ³	π	3.14	R	58.00 m	v	2.50 a 8.60 m/s
φ	0.26V/rad/s	K	23.31	C_p	0.44	J	118.35 Kg m ²
F	$\overset{G}{0.025 \text{ N m/rad/s}}$		T_m	0.21 x 10 ⁶ Nm a 1.61 x 10 ⁶ Nm			

Tabla 7.B. Matriz de correlación de funciones con la ANN Modeladora de la etapa de conversión mecánica T_m.

Etapa OPT.	ANN Modeladora del Mecanismo Turbina Capa Oculta Lineal – Capa Salida Lineal					Salida: T _m
w_{OPY}	$w_{\text{Álabes}}$	$u_{\text{Álabes}}$	w_{Eje}	u_{Eje}		
$w_{CONC.}$	$F(v1, \alpha1, \tau1)$	$F(\mu, hf)$	$F(Lm1)$			
w_{MAGLEV}	$F(v2, \alpha2, \tau2)$	$F(\mu, hf)$	$F(Lm2)$	$F(\beta)$	Modelo Conversor Eléctrico	
w_{MPPT}	$F(v3, \alpha3, \tau3)$	$F(\mu, hf)$	$F(Lm3)$			

* Se resalta el Implicante del módulo de concentración sobre la etapa mecánica de la Turbina, es decir, el efecto del coeficiente w_{conc} sobre el mecanismo de conversión.

Donde v es la constante de viscosidad cinemática, α ángulo de pitch de cada álabe, τ esfuerzo cortante, v viscosidad absoluta, hf pérdidas por fricción, Lm momento de inercia, β ángulo de góndola. Los acoplamientos entre el eje y los soportes son función de la etapa de optimización de soportes MegLev y la etapa MPPT para optimización de variables eléctricas. En [3] se especifica la selección del tipo de red por etapa, número de neuronas según los elementos mecánicos-eléctricos del conjunto, con el objetivo de establecer una tiene una ANN modeladora del mecanismo eje-turbina, donde se logra simplificar el procedimiento de estimación de coeficientes y optimizar la complejidad computacional en la etapa de optimización reentrenando unicamente la subred sobre la cual se aplica el módulo de optimización. Se puede aplicar experimentos compuestos, para establecer una base de fallas y análisis estadístico de

varianza para identificar la significancia de cada factor (coeficientes del polinomio modelador), a través de términos independiente, (interacción o por coeficientes cuadráticos, para otros esquemas de modelado).

B. Análisis de Fallas de la Turbina a partir del modelo.

El modelo permitirá la inspección dinámica del sistema a partir de la estimación de coeficientes (modo identificación de sistema), comparando con los valores de diseño (Tabla 8). Una variación de los parámetros de diseño, puede ser aplicado para el diagnóstico, en relación al coeficiente alterado por debajo del valor del modelo, así un valor menor corresponde a desgaste y por encima se interpretará como una condición anormal que genera recalentamiento.

Tabla 8. Análisis de Fallos por Coeficientes del Modelo

Análisis / Parámetro	Valor del Coeficiente		Tipo de Falla Detectada				FALLA	DIAGNOSTICO	MANTENIMIENTO
	Modelo	Actual	HIPOVALOR	DA	AC	FS	DG	Desgaste de perfil de álabes	Inspección para reemplazo
Condiciones modelo:	Aisladas	del	DG	DA	AC	FS	DA	Desacoplado de transmisión	Acoplado y Ajustes
$w_{\text{ÁLABE}}$	0.28	0.21 ↓	●				AC	Acumulación de material	Limpieza e Inspección
w_{EJE}	1.25	1.28 ↑				●	FS	Falla de Soportes	Corregir alineamiento

Algoritmo de detección y aislamiento de fallas del sistema: *If $w_{\text{idsist}_\text{álabe}} > w_{\text{diseño}_\text{álabe}}$ then: Rutina de Ajustes Mecánicos; If $w_{\text{idsist}_\text{álabe}} < w_{\text{diseño}_\text{álabe}}$ then: Rutina por Reemplazo x Desgaste Else: Pruebas de lógica y ensayos de campo; Endif;*

*Ante una condición de desbalance en el rodete, se requiere realizar ajustes del conjunto, corrección de fricción, soportes, inspección de descansos, etc.

En [26] se presenta un algoritmo de detección de fallos, a partir de señales medidas, en este caso se propone a partir del modelo por comparación de coeficientes y en el caso de los componentes modelados por polinomios característicos LFSR, en lugar de coeficientes escalares, se deberá descomponer el análisis a los coeficientes del polinomio. De esta manera, se pueden aislar fallas por análisis de componentes principales [27], específicas a partir de los rangos de desviación de los coeficientes respecto al valor de diseño. Esto aporta una herramienta

de inspección a través del modelo.

C.Optimización Dinámica de Turbinas Eólicas por Esquemas de Realimentación Configurables.

Un primer elemento para la optimización del sistema eólico corresponde a las estructuras de realimentación y los coeficientes de los habilitadores de estos elementos en la ecuación modeladora, tal como se presentan en la descripción de la Tabla 9.

Tabla 9. Estructuras de Realimentación Consideradas para el modelo optimizador de los Convertidores de Energía Eólica

Álabes de la turbina	Realimentación de flujo de viento almacenado en las cámaras o registros entre álabes $v(t-1)$
Modulador de patrón	Recirculación de flujo de viento, por modulación de patrón de flujo toroidal
Anillo de vórtices toroidal	Una turbina de anillos generadores de patrón de flujo toroidal (anillos de vórtices), externa que genere un sumidero para concentrar el patrón de flujo hacia la turbina interna. “el flujo poloidal del vórtice disminuye la fricción entre el núcleo y el fluido estacionario circundante, lo que le permite recorrer una gran distancia con una pérdida relativamente pequeña de masa y energía cinética”, mejora la eficiencia con respecto a un flujo direccional. Recirculación de flujo. Se pueden generar entre un flujo a mayor velocidad que un flujo estacionario.
Parque Eólico	Realimentación de flujo de viento entre turbinas del parque eólico $> 15\%$ en VAWT [10].
Regeneración del patrón de flujo	aguas abajo para protección de las aves y minimizar el impacto ambiental de la turbina.
Línea neumática	Realimentación de flujo de aire comprimido a la entrada de la turbina
Volante de Inercia	Realimentación de torque almacenado en volante de inercia (Lm).
CAES – motor neumático	Realimentación de torque del sistema de aire comprimido por eje de la turbina
CAES – compresor eléctrico	Realimentación de torque del sistema de aire comprimido por potencia eléctrica
Recuperadores de calor	Realimentación de calor regenerativo del sistema de conversión eólica (sistema aero-térmico)
Celdas de combustible Producción de H ⁺ verde	Baterías electroquímicas recargables de Hidrógeno. Captación de moléculas suspendidas en el aire, filtrado y reacciones catalíticas para descomponer Hidrógeno (H ⁺) y obtención de consumibles para celdas de combustibles.
Regeneración de calidad de la composición química del aire	para mejorar las condiciones ambientales y seguridad.

Se considera el efecto de cada coeficiente de optimización sobre el modelo. Los coeficientes de optimización están relacionados con los pesos de la red mode-

ladora para: (1) los elementos captadores ($w_{\text{ÁLABES}}$) para el caso del concentrador y (2) el acoplamiento de la turbina (w_{EJE}). De esta manera, ante la posibilidad de

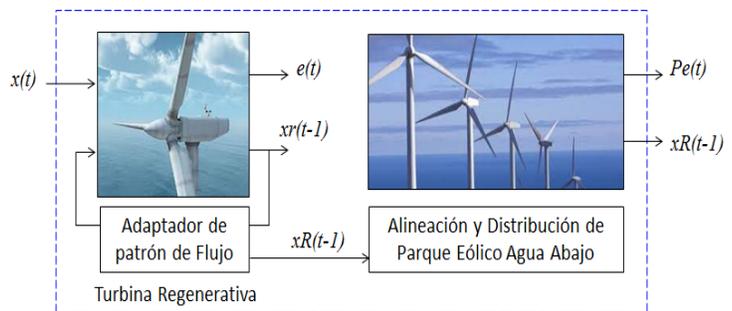
optimización de la etapa mecánica, se activa el módulo optimizador, se ajusta el target de potencia de salida P, se calcula el par Tm, se estiman los coeficientes del modelo de la planta y se ajustan las variables de control.

En relación a los habilitadores de las etapas configuraciones, se propone una matriz de ensayos (presentada en la Tabla 10) para caracterización del arreglo eólico, de forma de realizar un conjunto de medición de aporte

de eficiencia para cada una de los módulos de optimización, sus combinaciones y concatenación de las opciones sobre el efecto total, para la locación de arreglo de eólico objeto de estudio. A través de los habilitadores, se pueden desacoplar las etapas del sistema, para el estudio de una función específica, a fin de obtener los coeficientes de cada módulo de optimización del modelo.

Tabla 10. Matriz de Configuración Dinámica y Esquema del Sistema Eólico.

Optimización	Relación de Eficiencia (<i>wopt</i>)	Diseño Conceptual del Esquema de Realimentación Reconfigurable
	Traslación (libre)	
Configuración NO convencional	Traslación sobre órbita	<input type="checkbox"/> Muestreo de la calidad de aire, análisis de componentes en PPM del aire <input type="checkbox"/> Medición de la temperatura, control de disipación de calor ambiental. <input type="checkbox"/> Medición de campo electromagnético y efectos de F.E.M. <input type="checkbox"/> Estudio del régimen / patrón de flujo de viento aguas abajo. Medición de Energías en las variables ambientales de entrada – salida.
	Traslación - Rotación	
	Rotación Fractal	
	Péndulo oscilante (osciladores acoplados)	
	Fijo – Vibración	
	VAWT	HAWT
Configuración Rotatoria (por eje)	Savonius	Orientado a Barlovento
	Giromill	Orientado a Sotavento
	Darrieus	Bipala
	Darrieus - Savonius	Tripala
	Panémona	Multipala
	Esférico	
Altura	Rango Curva de H ($W_{Hmin} - W_{Hmax}$)	
Configuración de álabes (aerodinámica)	Replegables	
	Bordes Dientes de Sierra	
Soportes	Espiral Fibonacci	
Configurables	LM Pasivo	LM Híbrido
	LM Activo	Nuevas tecnologías
Generador	CC (Inducción EM)	
Adaptativo	AC síncrono	AC asíncrono
MPPT	Configuración Eléctrica	
Δ Presión	Realimentación entre captadores	
Arreglo TER	Turbinas colaborativas	
Calor residual	Recuperación de calor regenerativo	
CAES	Realimentación aire comprimido	



- ✓ Etapa de Recuperación de Subproductos. Filtrado y descomposición de moléculas de componentes que alteran la composición del aire.
- ✓ Etapa de Recuperación de Energía Residual
 - Cinética, regeneración del patrón de flujo de viento aguas debajo de la turbina para disminuir el impacto sobre la trayectoria de vuelo de las aves.
 - Potencial, recuperación de energía almacenada en los elementos de inercia del sistema eólico.
 - Térmica, recuperadores de calor regenerativo para la regeneración de la temperatura ambiental.
- ✓ Etapa de Regeneración por conversión inversa del efecto de la turbina
- ✓ Etapa de Realimentación para reciclaje de recursos, energía, y componentes

Se han definido circuitos independientes en cada etapa de energía, esto con el objetivo de restablecer las señales y disminuir las pérdidas de conversión de los mecanismos, así mismo se busca proteger a la fauna en la interacción con los convertidor, a través de alternativas de desacoplado inteligente de etapas del sistema, para mantener un rango seguro de operación (adaptándose de forma eficiente a los cambios de velocidad del viento, los flujos de aire turbulento y perturbación de la corriente de viento aguas abajo), en la etapa eólica-neumática, de conversión de presión, cambio del eje de rotación de la turbina, a favor de prevenir colisiones

con aves [28], turbinas sin hélices y motor neumático de accionamiento. Así mismo, se consideran los convertidores no rotativos, donde el flujo de viento es transformado en una variable alternativa, bajo principios de fluido-dinámica, coeficientes aerodinámicos, resonancia aeroelástica; parámetros electromagnéticos, electrónicos y termodinámicos, bloques discretos de energía, mecánica cuántica y orbitales en relación a un núcleo o eje de conversión (Ver Tabla 11), a fin de disminuir las pérdidas en los ejes y rodamientos, estableciendo una tecnología similar a los principios de la tecnología solar fotovoltaicos [29-30].

Tabla 11. Correlación de etapas de la Arquitectura LFSR

Recurso Natural	Flujo de entrada	de Elementos de conversión del Modelo LFSR	Operador (*)	Etapas	Sumador
Solar PV	Fotones	Órbitas (spin)		Capas PV	Núcleo de átomos
Eólico	¹ Viento (v)	² álabes ω_i coef. conversión		Cámara de almacenamiento.	³ Eje: Discreto por acoplamiento.
Gen. EM	Cinética	⁴ Bobinas (L)		⁵ Eje	Estator

1 Modelo del viento. Sea ρ la densidad del medio (aire), V es el volumen del cilindro de radio r y altura $v\Delta t$, que conforma el rotor de la turbina. R_{cil} es la resistencia del cilindro está dada por $R_{cil} = 2\pi\rho v 2r^2$ (para el concentrador cónico eólico). 2 Captadores del recurso eólico: Modelo Convencional: La potencia del viento por unidad de área en función de la velocidad está descrita por $P = A \frac{1}{2} \rho v^3$, siendo $P[W]$ la potencia que atraviesa el área $A[m^2]$, $\rho [kg/m^3]$ la densidad del aire, y $v[m/s]$ la velocidad del viento. Modelado por osciladores acoplados (French, 1974) para extender el alcance a diversos diseños. Cámaras entre álabes área (A) $ci(\pi 2r)$ y 3 Eje de la turbina modelado por elementos finitos. 4 Secuencia Inductiva. 5 Diferencia de Potencial entre elementos por la Fuerza Electromotriz.

Se plantea el ajuste de parámetros como la inercia del montaje, viscosidad cinemática y dinámica, aplicando principios de fluido-dinámica, para mejorar la eficiencia del convertidor. La incorporación de tecnología de levitación magnética [31] es soportada por el modelo y disminuye procedimientos de lubricación, mantenimiento y desgaste de componentes rotativos. La inspección remota con tecnologías emergentes [32-34], todas las técnicas de optimización y reciclaje soportadas sobre tecnologías sostenibles [35] y modelos matemáticos [7].

Finalmente, se define una expresión del modelo con discontinuidad que representa la conversión y régimen de carga del sistema de almacenamiento $y(t) = \sum_{n=1}^m y_n(t) + \sum_{n=1}^k y_n(t) + \dots$, lo que permite independizar la salida convertida de las condiciones climáticas, con lo que se simplifica el esquema de control de las variables mecánicas. Un aporte importante es el modelado ANN-LFSR del concepto de almacenamiento continuo y régimen de conversión. De esta manera, se logra un sistema autónomo con control y amplias ventajas, para definir en detalle el sistema y etapas de optimización, con una función objetivo de minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia del arreglo eólico configurable, a partir de combinación de componentes.

V. CONCLUSIONES

Gracias al estudio de las tecnologías de aerogeneradores y análisis de parámetros desde un enfoque de esquema realimentado, se ha logrado desarrollar un modelo de convertidores eólicos configurables, sobre

el cual se pueden establecer las funciones de (i) minimización del impacto ambiental, a partir de modelo físico de sistemas complejos de alineación en el vuelo de las aves, remediación e incorporación de elementos pasivos, rejillas de protección para la fauna aérea, y (ii) maximización de la eficiencia, considerando coeficientes fluido-dinámicos en la transferencia de energía cinética al convertidor y control de pérdidas mecánicas y térmicas. Así como lentes eólicas para aumentar la producción de energía y regeneración de flujo, soporte por modelo ANN para la definición 3D de la geometría del concentrador de flujo de aire y la propuesta de etapas adaptativas; modulador / concentrador / regenerador de flujo eólico, así como la alineación configurable del arreglo de convertidores.

Dada la capacidad instalada en tecnología eólica según estimaciones de [36], resulta fundamental desarrollar soluciones tecnológicas de modelos reciclables, lo que comprende desarrollos en el área de la estructura química de los materiales componentes e impresión 3D de estructuras por software con acoplamientos magnéticos inteligentes. Se plantea el análisis de los esfuerzos cortantes y rango de velocidad de deformación dv/dy en el diseño de álabes, para extender su vida útil y la conceptualización de etapas discretas de wind lens, turbina multi-etapa, multiplexores de acoplamiento dinámico entre etapas del modelo LFSR, ante el comportamiento dinámico se presenta el modelo adaptativo, con los coeficientes calculados en el sitio (algoritmo adaptativo sobre hardware), para optimizar la respuesta del sistema eólico.

Igualmente, se ha propuesto el modulador de flujo toroidal en sistemas eólicos compuestos por estructuras concatenadas, tecnología de turbinas híbridas concatenadas, alineadas y elementos moduladores de flujo eólico, lo cual es novedoso en esta área de estudios. Se estudian sistemas de convertidores no convencionales: sistemas planetarios con catenarias magnéticas de guías de inductores móviles desplazados por energía eólica, así como convertidores no rotatorios, como son sistemas pendulares, por vibración, resonantes, vórtices y piezoeléctricos y etapa de compresión de aire por acoplamiento de eje para realimentación de energía.

Otro aspecto, corresponde al reciclaje de componentes, basados en el modelo matemático desarrollado y la configuración adaptativa de las etapas y componentes, según las condiciones de viento incidente al arreglo eólico, acoplado de concentradores, filtros regenerativos, elementos de levitación magnética. Lo que se combina con el soporte de optimización dinámica [3], análisis de fallas [37], diagnóstico de turbinas a través de modelo, vehículos aéreos no tripulados (drones) de inspección técnica y monitoreo de variables ambientales, para minimizar el impacto ambiental del sistema eólico.

Se aporta un modelo físico interpretado, como una construcción teórica de sistemas complejos, para turbinas eólicas HAWT/VAWT, lo que permite configurar la estructura mecánica y los parámetros asociados. A partir de ejes de optimización en base a control de flujo activo para maximizar eficiencia y minimizar impacto ambiental por cambios en las trayectorias y patrones de flujo a la salida del arreglo eólico, control óptimo, control neuro-difuso [38] y seguimiento del punto de máxima potencia MPPT para la etapa de torque mecánico T_m y potencia, estudio de régimen de almacenamiento inteligente y realimentación programable, arquitectura de estructuras flotantes sobre superficie oceánica, para optimizar carga, flexibilidad del sistema y aislación eficiente, implementando para conversión eólica la técnica de columnas de aire que permita obtener mayor potencia convertida en el cambio de dirección del eje, geometría y tecnología del rotor configurable, a través de flujo inducido por estructuras dinámicas, moduladores de flujo y diferencial de altura, presión y control activo de flujo-eólico.

REFERENCIAS

- [1] WindEurope Sustainability – Cefic – EuCIA. “Accelerating Wind Turbine Blade Circularity”. 2020
- [2] C. Psomopoulos, K. Kalkanis, S. Kaminaris, G. Ioannidis, & P. Pachos. “A Review of the Potential for the Recovery of Wind Turbine Blade Waste Materials”. *Recycling*, vol. 4, no. 1, pp. 7. 2019 <https://www.mdpi.com/2313-4321/4/1/7>
- [3] C. Sandoval-Ruiz, “LFSR Optimization Model based on the Adaptive Coefficients method for ERNC Reconfigurable Systems”. *Ingeniare*, vol. 29, no. 4, pp. 743-766, 2021
- [4] B. Bossoufi, M., Lagrioui, et. al. “Observer backstepping control of DFIG-Generators for wind turbines variable-speed: FPGA-based implementation”. *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 903-917. 2015.
- [5] H. Sun, C. Qiu, L. Lu, X. Gao, J. Chen, & H. Yang. “Wind turbine power modelling and optimization using artificial neural network with wind field experimental data”. *Applied Energy*, vol. 280, 115880. 2020.
- [6] C. Sandoval-Ruiz. “Fractal Mathematical over Extended Finite Fields $F_p[x]/(f(x))$ ”. *Proyecciones Journal of Mathematics*, vol. 40, no. 3, pp. 731-742. 2021. doi.org/10.22199/isnn.0717-6279-4322.
- [7] C. Sandoval-Ruiz “LFSR-Fractal ANN Model applied in R-IEDs for Smart Energy”. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 4, pp. 677-686. 2020. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082210>
- [8] C. Sandoval-Ruiz, “Quantum architecture: Osciladores acoplados, dinámica y ERNC”, *Perspectiva*, vol. 1, no. 19, pp. 86-99. 2022. Disponible en [on line] <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/perspectiva/article/view/38184>
- [9] K. Prasad, V. Kumar, G. Swaminathan, & G. Loganathan. “Computational investigation and design optimization of a duct augmented wind turbine (DAWT)”. *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 1186-1191. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.116>
- [10] H. Jang, D. Kim, Y. Hwang, I. Paek, S. Kim, & J. Baek. “Analysis of Archimedes Spiral Wind Turbine Performance by Simulation and Field Test”. *Energies*, vol. 12, no. 24, pp. 4624. 2019. [https:// dx.doi.org/10.3390/en12244624](https://dx.doi.org/10.3390/en12244624)
- [11] N. Keramat, G. Najafi, T. Tavakkoli, B. Ghobadian, & E. Mahmoodi. “Mathematical modeling of a horizontal axis shrouded wind turbine”. *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 856–866. 2020. <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.022>
- [12] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto, & F. Hernández-Castro. “Efecto de un difusor tipo wind lens en flujo turbulento”. *Uniciencia*, 35(2), 1-18. 2021.
- [13] Universidad de Chile. “Explorador Eólico”. 2021. <http://ernc.dgf.uchile.cl:48080/inicio>.
- [14] C. Sandoval-Ruiz. “Smart systems for the protection of ecosystems, flora and fauna”. Universidad Cien-

cia y Tecnología, vol. 25, no. 110, pp, 138-154. 2021.
[15]C. Sandoval-Ruiz. “Arreglos Fotovoltaicos Inteligentes con Modelo LFSR-Reconfigurable”. Revista

Ingeniería, vol. 30, no. 2, pp. 32-61. 2020. <https://doi.org/10.15517/ri.v30i2.39484>.