

***e-KiteLab*: INVESTIGACIÓN EN FÍSICA APLICADA PARA MANTENIMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES**

***e-KiteLab*: RESEARCH IN APPLIED PHYSICS FOR MAINTENANCE AND OPTIMIZATION OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS**

**Cecilia Sandoval-Ruiz**

*Facultad de Ingeniería*

*Dirección de Postgrado*

*Universidad de Carabobo, Venezuela*

cesandova@gmail.com

(Recibido el 11 de febrero 2024, aceptado para publicación el 10 de agosto 2024)

## RESUMEN

La investigación tiene como objetivo desarrollar una teoría de aplicabilidad del operador matemático de convolución, como modelador de sistemas físicos. El método comprende un análisis de compatibilidad entre el modelo matemático y las etapas del sistema, interpretando el significado de los componentes y las variables físicas. Se obtiene como resultado una matriz de soporte, para el abordaje de investigación, mantenimiento y optimización de sistemas, a través de un laboratorio móvil de arreglos de cometas proyectivas, para identificación de patrones y desarrollo de tecnología en el área de mitigación de impacto en parques de energías renovables, lo que permite aportar una técnica de configuración dinámica de parámetros del modelo.

**Palabras Clave:** Investigación Energética, Sistemas Resonantes, Patrones de Difracción, Simetría Geométrica, VHDL.

## ABSTRACT

The research aims to develop a theory of applicability of the mathematical convolution operator, as a modeler of physical systems. The method includes a compatibility analysis between the mathematical model and the stages of the system, interpreting the meaning of the components and physical variables. As a result, a support matrix is obtained to address research, maintenance and optimization of systems, through a mobile laboratory of projective kite arrangements, for identification of patterns and development of technology in impact mitigation of the renewable energy parks, which allows providing a technique for dynamic configuration of model parameters.

**Keywords:** Energy Research, Resonant Systems, Diffraction Patterns, Geometric Symmetry, VHDL.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las situaciones recurrentes en el estudio de la física se corresponde con identificar un patrón para la generalización paramétrica de las etapas que componen los sistemas. En tal sentido desarrollar un método de inferencia basado en un operador matemático, resulta una estrategia interesante para lograr la unificación de los modelos con estructura autosimilar, en el contexto de cada escala y nivel de abstracción. Este enfoque puede solventar de forma eficiente, la necesidad de optimizadores dinámicos sobre ecuaciones matemáticas, para sistemas de energías renovables.

En este sentido, se ha considerado teóricamente el filtro de convolución como modelador de la red de difracción de ondas de energía incidente y proyectada, mediante el cual se puede implementar un lente de concentración definido por *software* en VHDL –VHSIC (*Very High Speed Integrated Circuits*) *Hardware Description Language*–, a través de la reconfiguración de parámetros de un arreglo de cometas proyectivas.

Por este motivo, se seleccionó un operador de producto de convolución, a través de un circuito LFSR –*Linear Feedback Shift Register*– Figura 1, donde los retardos son interpretados como elementos de memoria, para almacenamiento de energía potencial.

*Osciladores acoplados y ondas mecánicas:* En la interpretación de los osciladores armónicos sobre el modelo de registro desplazamiento se asume que cada elemento captador está acoplado al arreglo, de forma que el movimiento de uno influye en todos los demás. El efecto neto del acoplamiento de dos o más osciladores se puede describir como un intercambio de energía entre ellos. El movimiento ondulatorio debe su existencia a sistemas vibrantes próximos, que son capaces de transmitir su energía unos a otros. En este caso, se analiza por el efecto de flujo reflejado entre los elementos.

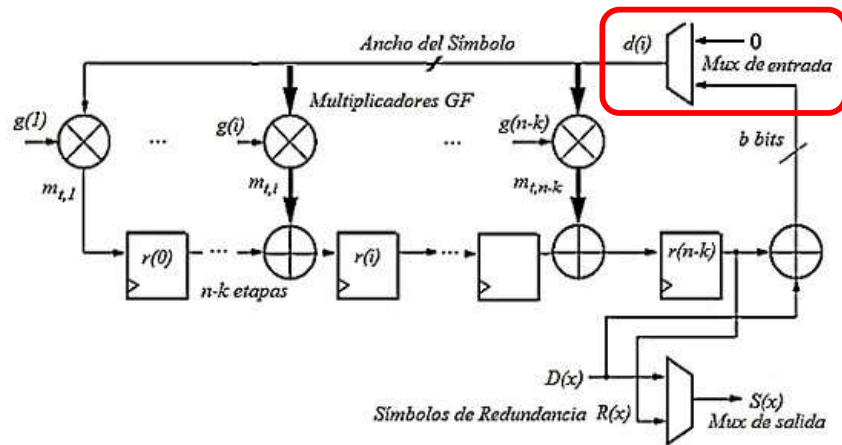


Figura 1: Arquitectura del Operador LFSR( $n, k$ ).

Desde el punto de vista físico, se consideran las vibraciones de los sistemas mecánicos, originadas por fuerzas restauradoras proporcionales a los desplazamientos respecto al equilibrio [1], lo que permite deducir un término de energía regenerativa en el modelo. Desde la perspectiva matemática, las oscilaciones presentan componentes armónicos de la frecuencia fundamental, donde el análisis de Fourier permite el filtrado de frecuencia para compensar el efecto sobre otros elementos del sistema.

La interpretación de estas oscilaciones mediante la proyección de un vector rotatorio, ejemplo la trayectoria 3D de la órbita de un captador eólico se corresponde con un patrón de curva cíclica. Este término puede ser expresado como un exponente complejo, por la propiedad de la función de volver a aparecer en cada operación de derivación o integración, aplicado en las variables físicas [1], relación geométrica o como una serie (suma de términos) con denominador en secuencia factorial, lo que describe la relación física de interacción, como un producto de efectos por el recíproco del radio al cuadrado. En esta oportunidad también se cumple para definir el efecto de dos captadores entre el inverso ponderado de la distancia entre estos. Se puede definir como  $r^2$ , pero en el modelador fractal [2] se aproxima al factorial de la distancia,  $r!$ .

Las granjas eólicas, por su tamaño, pueden alterar significativamente la dinámica del viento que las atraviesa [3]. Uno de los requerimientos en los sistemas de energías renovables, corresponde a la caracterización de la red de captación instalada y la adaptación del arreglo para compensación simétrica del patrón de reflexión, difracción e interferencia de los captadores sobre los otros elementos del arreglo y el entorno. Donde se destaca un componente del modelador mediante el circuito LFSR, tal es el caso del multiplexor externo a la línea de realimentación, el cual puede ser configurado como entrada del flujo reflejado, en aplicaciones eólicas o bien radiación reflejada en fotovoltaica bifacial.

Hasta este punto el análisis corresponde al efecto de un captador sobre otro en el parque eólico, se deben considerar el conjunto total, por lo que aplica el concepto de superposición [1] pp.21, que incide en los patrones de proyección, por lo que el análisis se extiende a todos los elementos que interactúan y las distancias en la distribución óptima del parque eólico. Adicionalmente, los parques industriales de energías renovables requieren un estudio de compatibilidad electromagnética EMC, para garantizar el correcto desempeño de los equipos, tomados en cuenta en la interferencia electromagnética –EMI– diversos factores: condiciones propias de la zona asociados al potencial energético, los campos generados por tecnología de levitación magnética en rodamientos de turbinas, electrónica de control y comunicaciones en los accionamientos tele operados, etc., por lo que se propone un estudio de interferencia in situ, así como el diseño de compensaciones del patrón de proyección: radiación/captación, por medio de elementos inteligentes, para conformación de haces *Beamforming* –técnica de filtrado direccional adaptativo, que permite atenuar la interferencia entre elementos del arreglo, para una mejor relación señal a ruido y menor potencia de activación, aplicada sobre la ecuación de haz que relaciona el perfil de desplazamiento y dinámica de la onda, tanto en la optimización de EMI como en patrones característico de captadores de energías renovables, por la analogía de estos con los arreglos de antenas–.

De todo lo anterior se plantea un e-laboratorio móvil para mantenimiento y optimización por *software*, esto considerando las ventajas relacionadas con el ahorro de materiales, reutilización de componentes y minimización de residuos, para estudio en zonas potenciales. Basado en el principio de modelado diferencial, con arreglo simétrico de compensación, analizando la configuración de un circuito de control de ganancia y un circuito de realimentación por campo. Lo que comprende una etapa diferencial acoplada mediante espejos de flujo eólico de entrada (sumidero de energía para su amplificación en la etapa diferencial). Un circuito de inducción de plasma con realimentación, sin intervención con el arreglo captador. A fin de maximizar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental de las instalaciones, sobre estimaciones del patrón de viento y turbulencia creada por los parques eólicos.

## 2. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIA ENTRE LOS SISTEMAS FÍSICOS

Para esto resulta oportuno revisar la correspondencia entre parámetros presentada en [1] entre los osciladores acoplados mecánicos y eléctricos. Finalmente, se plantea la posibilidad de aplicar la misma analogía para circuitos resonantes en arreglos mecánicos de captadores de energía eólica y arreglo de antenas inteligentes.

$$F(t) = \sum_{i=1}^m k_i \cdot x_{mi}(t) + \sum_{i=1}^m k_i \cdot \Delta x_{mi,j}(t) \quad (1)$$

siendo  $k_i$  el coeficiente elástico,  $x_{mi}(t)$  el desplazamiento de la partícula  $i$  y  $\Delta x_{mi,j}(t)$  el diferencial de desplazamiento entre las partículas  $i$  y  $j$  respectivamente, de manera tal que los términos de corresponden a las fuerzas elásticas (según la ley de Hooke) entre los osciladores acoplados y la sumatoria permite estimar la fuerza total sobre el sistema de estudio, esto con el objetivo de interpretar los términos de compensación, a fin de no alterar el entorno fuera de una superficie imaginaria del arreglo de captadores. Igualmente, en lugar de escribir la fuerza total en (1) se puede definir la función hamiltoniana de este sistema, para su descripción física formal.

Para el estudio entre los captadores de energía eólica, se considera el arreglo como un sistema mecánico con acoplamiento de rigidez: captadores iguales de masa  $m$  acopladas, cada una de ellas, a un muelle, de constante elástica  $k$ . Es decir, un sistema mecánico con micro acoplamientos elásticos en el captador y acoplamientos elásticos a través de la dinámica de flujo. Donde el modelo de osciladores acoplados se puede aplicar tanto a sistemas mecánicos como a modelos atómicos de sólidos. La energía total del sistema corresponde a la suma de la energía cinética y potencial elástica de los elementos del arreglo [1], en este caso se considera además la energía reciclada por entrelazamiento entre los elementos, que corresponde al tercer término de la ecuación.

$$E_T = \frac{1}{2} m v_i^2 + \frac{1}{2} k x_i^2 + \frac{1}{2} k_c (x_i - x_j)^2 \quad (2)$$

Se reescribe de forma generalizada la ecuación de energía, esta vez definiendo la diferencia respecto a una referencia del centro del arreglo simétrico:

$$E_T = \frac{1}{2} m v_i^2 + \frac{1}{2} k x_i^2 + \frac{1}{2} k_c (x_i - r)^2 \quad (3)$$

con  $r$  como la distancia de referencia entre el próximo oscilador acoplado respecto al elemento  $i$ .

La consideración de las propiedades elásticas del captador eólico se puede interpretar de manera simplificada como un intercambiador de energía, realimentado de forma cíclica, a través de un registro de energía (donde la velocidad de respuesta es dada por parámetros dinámicos de la unidad de memoria estructural), que favorece la estabilidad del sistema físico y permite incorporar un término de energía regenerativa. Al aplicar una entrada al sistema (flujo incidente), dan como resultado fuerzas restauradoras proporcionales al desplazamiento entre los elementos finitos del sistema físico, por lo que se origina una superposición de vibraciones armónicas. Un componente inercial asociado al transporte de energía cinética y un componente elástico de almacenamiento de energía potencial.

- (i) Aun cuando se trata de un sistema de osciladores acoplados sin disipación de energía, podría representar un sumidero de energía, tomando como referencia el arreglo de captadores, esto debido a que el sistema físico total puede intercambiar energía con el sistema de captadores, entendido como una superficie envolvente de Gauss de forma toroidal, con el arreglo de captadores central.
- (ii) En este punto es válido aclarar qué son los parámetros dinámicos de la unidad de memoria estructural, ya que estos se corresponden con los coeficientes del polinomio generatriz del circuito modelador de registros desplazamientos con realimentación lineal, que serán adaptativos a fin de mantener el equilibrio del sistema físico.
- (iii) La estabilidad de este sistema físico, sólo se puede demostrar si su energía potencial alcanza un valor mínimo, por ejemplo, en presencia de una fuerza externa periódica, de lo contrario puede absorber energía y entrar en un régimen de resonancia. Ya que no hay disipación de energía (en el sistema total), dicho régimen puede ser inestable, pero el arreglo de captadores se puede interpretar como un mecanismo de disipación, por conversión de energía, del sistema respecto al sistema con realimentación fractal.

Adicionalmente se tiene un componente de información, este último relacionado con la entropía del sistema –cantidad de incertidumbre de los estados relacionados por efecto combinatorio entre los elementos del arreglo–, para la autoorganización por principios simétricos de ordenamiento, de allí el interés de establecer la analogía entre el sistema físico y la teoría de la información a través de un patrón de secuencia LFSR. Este viene a definir la dinámica evolutiva de los sistemas físicos por los principios de infodinámica, como rama de la física que estudia la relación entre la información y la energía, siendo este el término de compatibilización entre clásica y cuántica, en la consideración del

entrelazamiento de los elementos captadores y su efecto en el modelo total del sistema. Si todas las estructuras tienen memoria de información sobre configuración geométrica, entonces el sistema aprende de los estados pasados de equilibrio.

### 3. MÉTODO DE MODELADO POR FILTROS LFSR( $n,k$ )

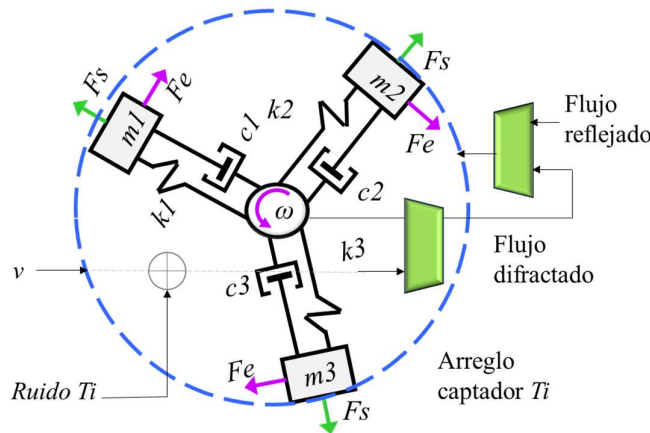
De todo lo anterior el modelo fluidodinámico se mantiene en su forma convencional por el aproximador universal, incorporando un término adicional, que será válido en un rango de fluidodinámica cuántica o interpretación de ondas, previamente desestimada, donde los coeficientes físicos estudiados no cumplen con el modelo y por tanto se recurre a un aproximador probabilístico, que igualmente permite incluir un modificador físico de compensación simétrica y de esta manera ampliar la controlabilidad del flujo activo  $\varphi$ , donde la variable flujo corresponde a un operador en el circuito de convolución. Es decir, las variables de energía incidente al sistema: flujo eólico  $\varphi(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \varphi_i(t) + \varphi_i(t-1)$  o luz solar incidente  $f(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot f_i(t) + f_i(t-1)$ , es expresada en función de la sumatoria de componentes por longitud de onda y onda reflejada con memoria estructural, a fin de conformar un modelo de flujo regenerativo. Esta ecuación permite el control de los parámetros de la onda que interactúa con la red de difracción (captadores), siendo un componente activo del sistema.

Es importante señalar que la configuración del circuito LFSR puede ser adaptada al caso estudiado para simplificar la lógica del análisis.

En configuración Fibonacci el arreglo de registros se dispone sobre la línea de realimentación (parte superior) –lo que permite retrasar la señal  $x(t)$ , proveniente de la realimentación o del multiplexor del patrón de interferencia, presentado en la Figura 1–, introduciendo retardos sobre la variable de entrada, antes de la operación producto, para la función de cálculo diferencial en el modelo, de la forma:  $\omega_i(t) \cdot x_i(t-1)$ . En tanto que en la configuración Galois, los registros se disponen en la línea de salida (parte inferior), donde la variable que presenta los retardos corresponde a la variable de salida, lo que se puede expresar por la relación (4):

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t) \cdot x_i(t) + y_i(t-1) \quad (4)$$

Es importante mencionar que la arquitectura del LFSR dependerá de la selección de las variables y características del sistema. A continuación, se analizará un caso de la configuración Galois, para un sistema rotativo, Figura 2, donde se ha concatenado el modelo del álabe colector sobre el arreglo de una turbina eólica. En este punto, se realizará el enfoque desde el siguiente nivel de abstracción, para el análisis del arreglo de captadores, acoplados mediante el eje de una turbina eólica.



**Figura 2:** Modelo de osciladores acoplados de la turbina eólica.

Un parque eólico está compuesto por  $n$  turbinas  $T_i$ , entre las que se crea un efecto de capa límite y vórtices, entre los elementos alineados. El modelo del arreglo captador de la turbina eólica en la posición  $i$ , comprende el DLC –Diagrama de Cuerpo Libre– para cada uno de los álabes, a una separación de  $120^\circ$  entre sí, el espacio entre estos conforma unas cámaras, que pueden ser interpretadas como muelles de aire o registros de energía potencial  $R_i$  del circuito LFSR. Cada rama del LFSR corresponde a los álabes, que a su vez pueden ser modelados mediante elementos finitos. En el modelo simplificado se han representado por una masa puntual  $m_i$ , un coeficiente elástico  $k_i$  y un coeficiente de amortiguación  $c_i$  en la línea de acoplamiento con el eje de la turbina, para la transmisión de las fuerzas de empuje  $F_e$  y fuerza de sustentación  $F_s$ .

De esta manera, se ha logrado mapear sobre el modelo tanto una ecuación física como una representación de fuerzas, desde su diagrama de cuerpo libre. Se puede observar cómo se pueden formular configuraciones fractales, mediante la concatenación de etapas más detalladas (a nivel micro), lo mismo que se pueden extrapolar sobre modelos a nivel macro, tal es el caso del parque eólico con acoplamiento por patrón de flujo entre turbinas.

Hasta este punto, se ha modelado un álabre captador, el circuito resultante se ha enmascarado en un bloque MRA – sistema de masa-resorte-amortiguador–, para cada una de las etapas del LFSR en el modelo de la turbina eólica básica, de esta manera se puede subir en el nivel de abstracción asignando a cada etapa una turbina del parque eólico. Lo que hace oportuno introducir el análisis del efecto estela entre turbinas y la generación de vórtices aguas abajo del captador, relacionado con el flujo reflejado  $\varphi r$ , siendo una entrada en la etapa de realimentación para considerar los patrones de flujo proyectados por los elementos del parque eólico y el flujo difractado  $\varphi d$  como salida de la red de difracción del arreglo de captadores sobre el flujo incidente  $\varphi i$ .

En este punto se realizará el análisis se intercambiando la turbina por una cometa eólica, Figura 3, con la finalidad de observar la compatibilidad de los principios de análisis. En el nivel de abstracción más detallado, se asume la cometa eólica como una matriz aeroelástica [2], representada por un arreglo de osciladores acoplados, donde los tramos o secciones corresponden con las etapas del LFSR.

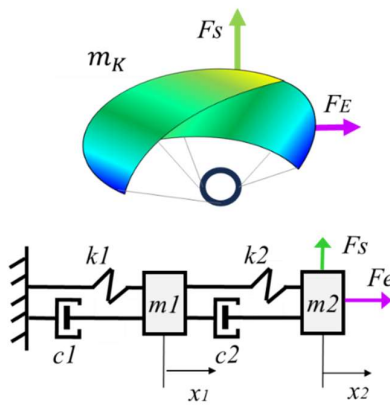


Figura 3: Representación del cometa eólico.

En la Figura 3 se evidencia la estructura del LFSR que coincide con el modelo de la turbina, siendo  $mk$  la masa de la cometa captadora,  $F_e$  la fuerza de empuje del viento y  $F_s$  la fuerza de sustentación, la cometa eólica puede ser modelada como un conjunto de osciladores acoplados por los tensores de control.

El concepto de compatibilidad es relevante, principalmente para el análisis de compensación de los efectos sobre los otros elementos, a fin de mejorar la eficiencia y para lograr la mitigación de impacto ambiental del sistema eólico. El arreglo reflejará el flujo difractado por el captador previo y generará un efecto estela a la salida, Figura 4. La consideración de estos flujos se realiza a través de los multiplexores de realimentación: interno (MI) con realimentación de salida del eje y externo (ME) con realimentación de flujo reflejado, siendo innovador, por incorporar un término de acoplamiento al modelo del sistema.

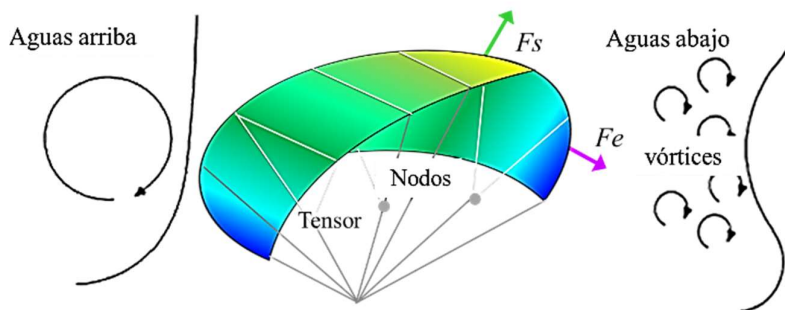


Figura 4: Efecto estela en flujo de una cometa eólica.

Finalmente, para comprender mejor estos fenómenos sobre un elemento en la posición  $i$ , se realiza el estudio para 3 elementos, Figura 5, se asume una sección de tres arreglos captadores del parque eólico, a fin de ilustrar los efectos sobre los elementos cercanos, destacando que se deben sumar todos los efectos del sistema.

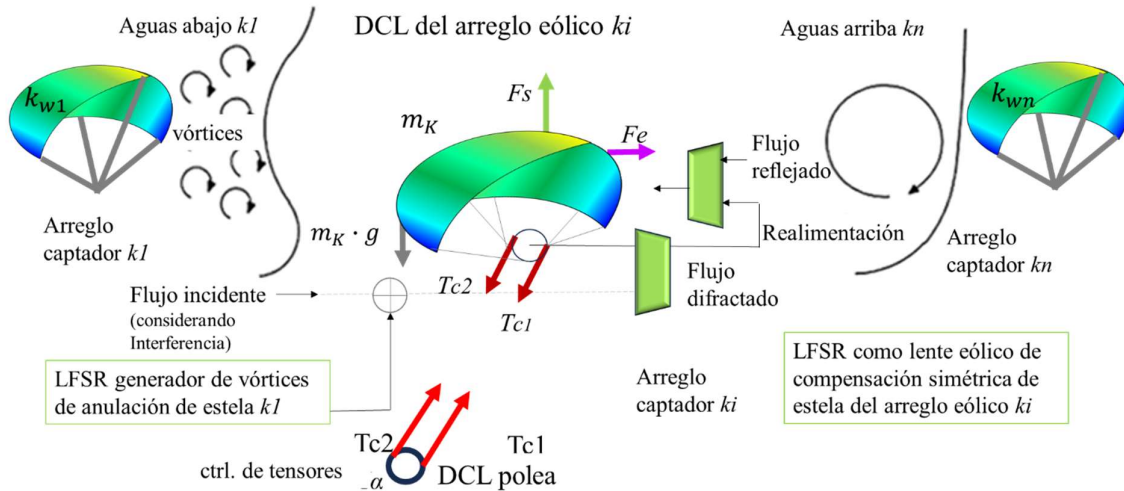


Figura 5.a: Análisis de Compensación de efecto estela en flujo en una cometa eólica  $k_i$ .

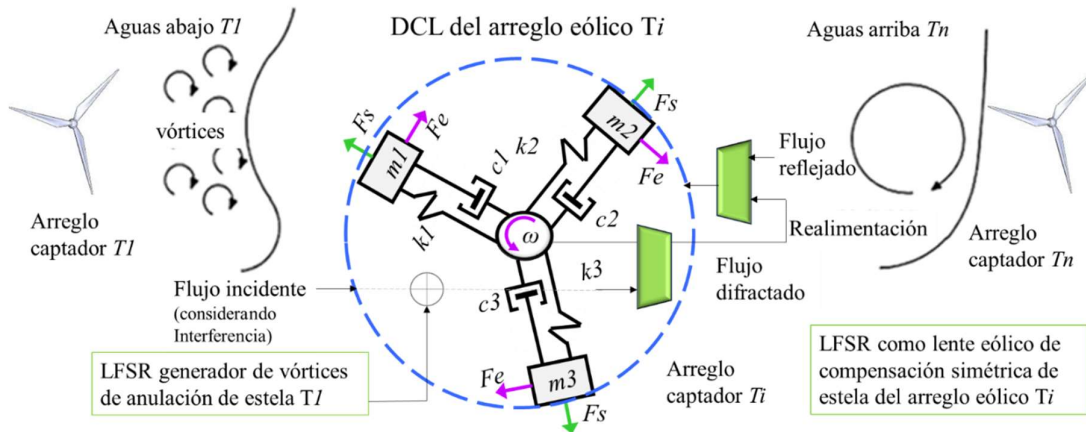


Figura 5.b: Análisis de Compensación de efecto estela en flujo en una turbina eólica  $T_i$ .

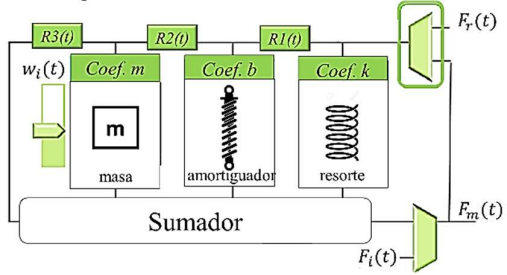
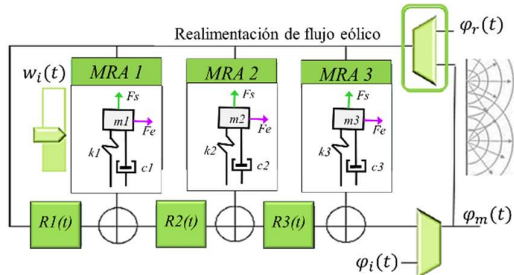
Así se observa la posibilidad de intercambiar elementos en el arreglo, dando la oportunidad de realizar la compensación por simetría geométrica, a través de cometas eólicas sobre parques de turbinas instalados, lo que representa un aporte valioso para la actualización, mantenimiento predictivo y optimización, sobre el modelo físico y la incorporación de elementos flexibles, livianos y móviles, como lo son las cometas que permiten conformar un lente eólico, extrapolando conceptos de óptica, así como lentes de polarización para la optimización de sistemas de captación solar inteligente.

Vale acotar que el modelo LFSR de la turbina es compatible para máquinas rotatorias, como los condensadores síncronos –el cual se define como un filtro de armónicos para mejorar la calidad y factor de potencia de la red eléctrica, además de ser elementos de almacenamiento de energías renovables como volante de inercia–.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la interpretación de los convertidores de energía se formuló una revisión basada en la naturaleza de su comportamiento: física clásica donde se analizan mecanismos, fluidodinámica, arreglos electromagnéticos, óptica; se introduce el análisis de elementos finitos con conceptos de física moderna y ondas, se consideran sistemas cuánticos, y finalmente se presentan sistemas de teoría de información, como extrapolación de los sistemas físicos compatibles con el modelado sobre circuitos LFSR, donde las variables de energía son almacenadas en por el operador de convolución, a través de un TDL –Time Delay Line–.

**TABLA 1 - MATRIZ DE APLICABILIDAD DEL OPERADOR LFSR A SISTEMAS FÍSICOS INTERPRETADOS**

Tipo de Sistema	Aplicación operador LFSR	Interpretación física del modelo
Geometría Proyectiva	Curvas cíclicas por LFSR Polinómios concatenados.	Relación geométrica entre los puntos de la curva de trayectoria y la ruleta del sistema. Directriz (órbita) y generatriz (superficie desarrollable)
Sistemas físicos modelado por ecuaciones diferenciales	El circuito Fibonacci-LFSR con entrada Fuerza impulsora $F_i$ , se comporta como un operador diferencial por retardos TDL de la variable de desplazamiento, velocidad y aceleración, para su suma ponderada en la salida. Estos elementos MRA (masa, resorte y amortiguador) definen la frecuencia de oscilación.	Cada registro retarda la variable $x$ . 
Osciladores acoplados clásicos (mecánicos)	Cada rama del Galois-LFSR es caracterizada por la masa $m_i$ del oscilador en la posición $i$ , los registros representan muelles de almacenamiento de energía potencial $k_i$ y disipación de energía por coeficiente de amortiguación. Detallado en [1].	
Osciladores acoplados clásicos (eléctricos)	Cada rama del LFSR es caracterizada por la inductancia $L_i$ del oscilador en la posición $i$	Los registros representan los capacitores de almacenamiento de energía potencial $1/C_i$
Fluidodinámica	Red de difracción de flujo a través de la configuración de elementos captadores	Acoplamiento por flujo, muelles de aire, ondas mecánicas en la red de difracción del captador eólico [4]
Arreglo de antenas de transmisión, óptica, EMI, EMC	Un LFSR un operador de convolución para el procesamiento de señales en un arreglo de antenas para la conformación de haces direccionables	Acoplamiento a través de interacción de <b>ondas electromagnéticas</b> entre los elementos antenas, caracterizados por patrones de radiación y captación
Estudios de estados de la materia: BEC, cristales de tiempo	operador LFSR como un emulador de entrelazamiento cuántico para sistemas fermiónico.	Los acoplamientos se corresponden con enlaces de entrelazamiento cuántico entre partículas de un material.
Osciladores armónicos cuánticos	Conserva el comportamiento clásico para condición de energía del punto cero, por principio de correspondencia.	Los enlaces cuánticos se interpretan como los niveles discretos de pasos del salto de energía entre las órbitas definidas, con correspondencia en condición ZPF [5].
Códigos RS ( $n,k$ ) de corrección de errores	El LFSR con polinomio generatriz $G(X)$ es un operador implementado por un circuito lógico, para el procesamiento de tramas de datos $D_i(x)$ , obteniendo códigos $C(X)$ . Se comporta como un modelo de osciladores acoplados, donde el acoplamiento viene dado por la correlación probabilística de información [6]. Área: Teoría de la Información.	

Un ejemplo de esto se puede evidenciar al contrastar un arreglo eólico con un arreglo de antenas inteligentes, para identificar el tratamiento entre los patrones espaciales de rosa de viento, patrón de captación y patrón de proyección, y los patrones de radiación de antenas con haz direccionable. Todo esto con la finalidad de aplicar técnicas similares de compensación y adaptación del arreglo.

Con este análisis de correspondencia, el estudiante de física está en capacidad de identificar: analogías entre mecanismos independientes, correlación entre el sistema físico y el modelador matemático, así como autosimilitud entre etapas concatenadas de un sistema complejo y realizar inferencias de compatibilidad de modelos, sobre la base de las ecuaciones descriptivas, relacionando los operadores y estructura del circuito, con los componentes del sistema estudiado. Lo que se logró resumir en una matriz de correspondencia estructural LFSR, Tabla 1.

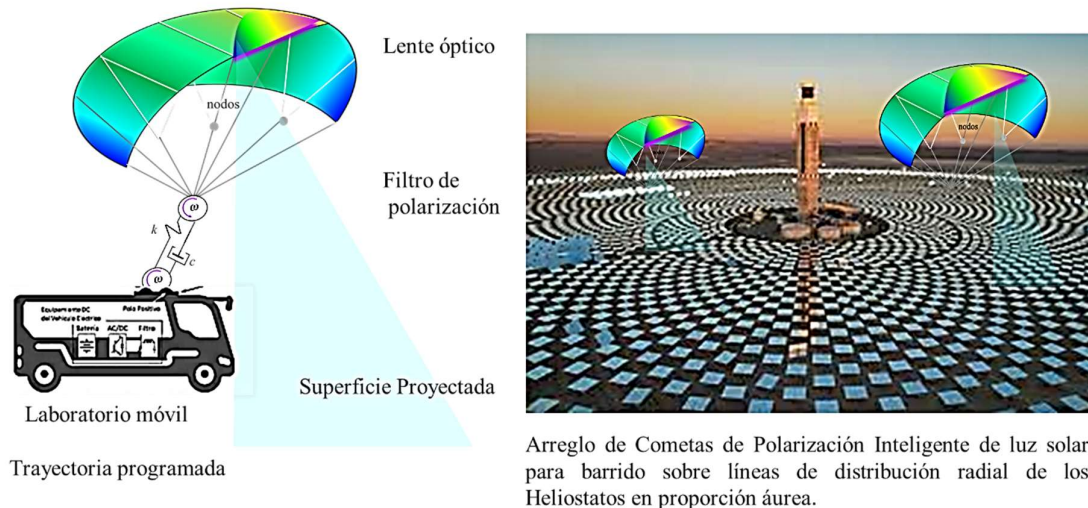
#### 4.1. Aportes de la Investigación

Uno de los aspectos más importantes de los resultados teóricos obtenidos es contar con una matriz de inferencia para la asignación inicial de la correspondencia entre un sistema a estudiar y su modelo matemático. Esto permite dotar al investigador y estudiante de física de una herramienta de base en la construcción del conocimiento, sobre la cual se diseñan ensayos prácticos, técnicas de modelado, emulación sobre *hardware*, gemelos digitales, realidad extendida, a fin de perfilar las variables de control, sobre un laboratorio móvil con elementos pasivos (mínima interferencia sobre el sistema objeto de estudio), a fin de establecer la restauración de etapas sobre el modelo en aplicaciones del laboratorio de mantenimiento y optimización de energías renovables, con un tratamiento innovador de los modelos fluidodinámicos [7], compensación simétrica del patrón de difracción de flujo eólico [8] y su aplicación en captadores de cometas eólicos [9-10], lentes de concentración solar sobre principios Fresnel y filtros ópticos aplicados en fotovoltaica [11-12], mediciones de campo y compatibilidad electromagnética definida por *software*, todo esto en cumplimiento de criterios de seguridad ambiental y mitigación de impacto del sistema físico sobre el entorno.

Lo que permite enunciar que la física clásica, osciladores acoplados y ondas electromagnéticas coinciden a través de un modelador LFSR, siendo la matemática el punto de enlace de las teorías.

#### 4.2 Conceptualización Práctica del Modelador LFSR en Investigación de Campo

La propuesta del laboratorio móvil de investigación sustentado sobre un arreglo configurable de cometas de modelado y optimización dinámica, *e-KiteLab* presentado en la Figura 6, permiten en una primera etapa la adquisición de datos para la construcción de los modelos en condiciones específicas, a la vez que permite desarrollar patrones de interferencia ópticos, eólicos, etc. para estudiar la respuesta del sistema y optimizar sobre el modelo físico.



**Figura 6:** Diseño Conceptual del Laboratorio de Física aplicada en Energías Renovables.

El arreglo de cometas representa un filtro de convolución, donde se pueden configurar parámetros de alineación, longitud de onda, logrando medir el comportamiento del sistema y realizando los ajustes sobre el código de descripción de hardware –VHDL–, lo que permite un modelo de sistemas físicos de alta complejidad definidos por *software*, a través de ciclos iterativos para el desarrollo del hardware de composición fractal.

La ubicación de los cometas captadores y proyectivos se estima en una trayectoria de barrido para el estudio de la respuesta del sistema fotovoltaico, realimentada por el seguimiento del punto de máxima potencia. La medición del



gradiente de temperatura se realizará por termografía IR desde el cometa de monitoreo, el mantenimiento incluye técnicas de fotoluminiscencia sobre la superficie de estudio. La optimización del rendimiento del sistema se plantea mediante la caracterización de geometría proyectiva para concentración fotovoltaica y formulación del lente óptico proyectado sobre una altura para ampliar su alcance. El concepto del cometa solar ha sido presentado en [11] como un arreglo fijo, en esta oportunidad se propone su implementación a partir de un laboratorio móvil de investigación para la optimización dinámica de los sistemas fotovoltaicos.

En el caso específico de parques fotovoltaicos, el arreglo de cometas permite emular una torre de concentración solar –móvil, con ajuste telescópico de la altura del concentrador, trayectoria de seguimiento del punto de máxima potencia– y mecanismo de compensación simétrica para estabilizar la estructura de tensores. Un ejemplo de esta aplicación es la configuración de patrones de Moiré –patrones de interferencia óptica, descritos por la suma de armónicos de onda superpuestos– sobre un parque fotovoltaico flotante, Figura 7.

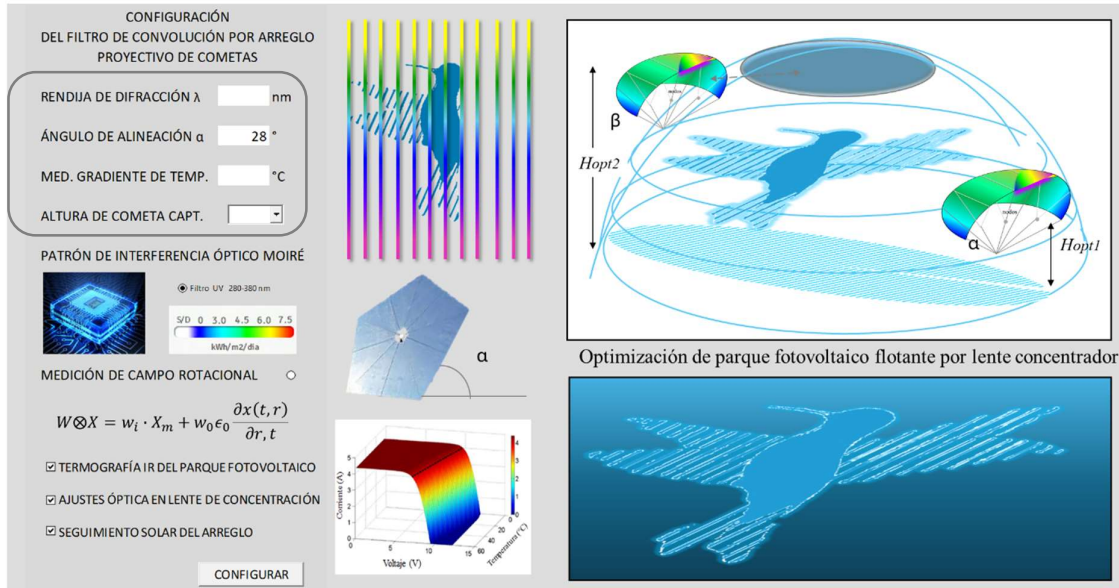


Figura 7: Aplicación del Laboratorio en optimización fotovoltaica.

El generador de código de descripción del *hardware* permite establecer la configuración del arreglo de cometas de optimización, tanto para la función de lente eólico –*wind lens*–, a fin de regenerar el patrón de viento incidente sobre los captadores del parque eólico, como para un arreglo de lente de concentración óptica en la optimización del rendimiento del parque fotovoltaico, según la selección del tipo de estudio.

Se planteó así la formulación de lentes dinámicos, aplicando parámetros ópticos de polarización por composición del medio, configurando los índices de refracción de luz incidente, una superficie proyectada con altura configurable, para el control de la distancia focal, así a través de la superposición de efectos del arreglo óptico se logra un optimizador definido por *software* y reconfigurable, de forma dinámica. Los parámetros definidos en el diseño o por medición en terreno, Tabla 2.

TABLA 2 - DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELADO DEL LENTE ÓPTICO EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

	Parámetros ópticos del arreglo concentrador	Geometría proyectiva del lente óptico (polarizado)
LENTE ÓPTICA	$n$ : índice de refracción del medio (lente), $n=c/v$ <i>siendo v: velocidad en el medio</i> $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$	$H_{opt}$ : Altura óptima o distancia focal del lente
	$mr$ : índice de reflexión de luz reflejada bifacial.	$\theta_i, \theta_r$ : ángulo de incidencia y refracción de la luz en el lente
	$lr$ : Rejilla, y $\lambda$ : longitud de onda fotocromático	$\alpha$ : ángulo de alineación respecto al eje óptico del lente
	Flujo incidente (Haz de luz)	$r$ : Radio de curvatura formado por cometas concentradores
	$f(t)$ : Radiación solar incidente $p(i)$ : patrón de interferencia	Ley de Biot (rotación específica)
$f(t) \otimes \lambda$	$[\alpha]_{\lambda}^T = k_{opt} \frac{l \cdot c}{\lambda^2}$	Polarización del lente configurable (cometa de plasma confinado)
$p(i) \otimes lr$	$f(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot f_i(t) + f_r(t-1)$ $p(i) = \sum_{i=1}^n lr \cdot p_i + p_j(i-1)$	$[\alpha]_{\lambda}$ : grado de rotación del plano de la luz polarizada, T: temperatura, l: longitud del medio atravesado, c(t): concentración (configurable) del soluto ópticamente activo. $\lambda$ : longitud de onda de la luz.

Estos parámetros pueden ser ajustados mediante un lazo de generación de código VHDL de los componentes reconfigurables, Tabla 3.

**TABLA 3 - SINTAXIS GENÉRICA DE LOS COMPONENTES PARAMÉTRICOS DEL SISTEMA**

---

Component lente\_óptico  
Port (vectores: in *std\_logic* 7 downto 0; -- *parámetros de diseño o adquisición de datos del montaje*  
...  
Loop  $i \leq i+1$  to  
OL: port map Lente\_óptico (n, mr, lr, c(t),  $\lambda$ ,  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ , a(i), r, H1(i), H2(i), f); -- *optical lens for optical kites*  
End Loop;  
-- se establece la equivalencia para los componentes eólicos parametrizables [10]:  
A: port map oscilador (m(i), c(i), k(i), Fe, Fs, a(i)); -- *sintaxis del código componente álabo captador*  
T: port map captador (mra(1), mra(2), mra(3), r1, r2, r3, P(i-1), T(i)); -- *sintaxis del código componente*  
WL: port map Lente\_eólico ( $\phi_i$ ,  $\phi_r$ ,  $\phi_d$ , a(i),  $\Delta P$ ,  $\Delta T$ , wl(i)); -- *lente eólico del arreglo de cometas (wind kites)*

---

Desde la aplicación práctica se puede mencionar la innovación en la configuración de los patrones de interferencia de la energía incidente, mediante la red de difracción del arreglo de cometas, aplicando geometría proyectiva [7-8], la optimización de parámetros de altura y alineación, así como los índices de refracción de los lentes configurables. Un avance en la implementación del mantenimiento predictivo y preventivo mediante electroluminiscencia [5] desde el arreglo sobre la superficie fotovoltaica.

Finalmente, la aplicación de principios físicos y su estudio en campo permitirá avanzar en tecnología de reciclaje de paneles fotovoltaicos y captadores eólicos, así como compensación simétrica de efectos de los captadores, a fin de reducir el impacto ambiental de estas tecnologías. En el mismo orden de ideas se pueden implementar soluciones ambientales para restaurar las condiciones ambientales, desde recuperación de calor regenerativo, a partir del estudio de gradiente de temperatura, como la regeneración de patrón de viento, analizando los campos vectoriales con rotacional por vórtices de flujo a la salida de los captadores.

## 5. CONCLUSIONES

Gracias a la interpretación física de los coeficientes y señales del circuito LFSR, se ha teorizado que un sistema clásico o electromagnético, independientemente de su complejidad, puede ser modelado por un operador de convolución, implementado sobre registros desplazamientos con realimentación lineal, a través del análisis de una amplia gama de aplicaciones sobre las que se ha parametrizado como modelador universal, siendo un aporte fundamental en el campo de investigación para mantenimiento y optimización de sistemas, en el área de energías renovables. Adicionalmente, se logró una propuesta de formulación de lentes de optimización definidas por software. Estos lentes regenerativos tienen como función optimizar la onda incidente y restablecer el patrón de salida, modulando las ondas difractadas por el arreglo captador, vientos y temperaturas a las condiciones de equilibrio climático.

De esta manera, el modelo desarrollado permite aproximar las trayectorias de las curvas cíclicas, patrones de difracción, polinomios de secuencia en la generación de vórtices de compensación simétrica, a través de una progresión geométrica en el estudio de comportamiento de sistemas fluidodinámicos y ópticos.

Implementar un circuito LFSR sobre *hardware* resulta una herramienta valiosa, para la configuración de redes de difracción y procesamiento de señales: en arreglos captadores eólicos, antenas inteligentes y filtros ópticos, lo que permite describir la dinámica del sistema para la conformación de patrones de energía direccionables y más eficientes.

Otro aspecto que se deriva del estudio es la correspondencia entre el arreglo LFSR y los modelos de osciladores acoplados clásicos y cuánticos, por su interpretación directa, aportando un análisis compatibilidad de los modelos, soportados por operadores matemáticos definidos por *software*.

Se plantea la extrapolación de los resultados del filtro de convolución como emulador de entrelazamiento cuántico para sistemas fermiónico, estudio de estados de la materia como condensado de Bose-Einstein en superfluidos, cristales de tiempo y nuevos estudios.

## REFERENCIAS

- [1] A. P. French, «Vibraciones y Ondas», Física del M.I.T. Primera Edición. Editorial Reverté. ISBN 8429140980, 1974.
- [2] C. Sandoval-Ruiz, «LFSR-fractal ANN model applied in R-IEDs for smart energy», IEEE Latin America Transactions, 18(4), 677-686, 2020. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082210>

- [3] S. Stipa, A. Ajay, D. Allaerts y J. Brinkerhoff, «TOSCA—an open-source, finite-volume, large-eddy simulation (LES) environment for wind farm flows», *Wind Energy Science*, 9(2), 297-320., 2024.
- [4] C. Sandoval-Ruiz, «Wind Turbine with Configurable Feedback Scheme for Minimal Environmental Impact and Maximum Efficiency», *Universidad Ciencia y Tecnología*, 26(113), 123-136, 2022. <https://doi.org/10.47460/uct.v26i113.578>
- [5] C. Sandoval-Ruiz, «ZPF para arreglo de proyección de onda:  $\phi$ -LFSR en modelado  $F_p[x]/f(x)$  de Sistemas de energías renovables», *Revista Universidad del Zulia*, 15(42), 281-305, 2024. <https://doi.org/10.46925//rdluz.42.16>
- [6] C. Sandoval-Ruiz, «Fractal mathematical over extended finite fields  $F_p[x]/(f(x))$ », *Proyecciones*, 40(3), 731-742, 2021. <http://dx.doi.org/10.22199/issn.0717-6279-4322>
- [7] C. Sandoval-Ruiz, «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), 2023. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.03.003>
- [8] C. Sandoval-Ruiz, «xyz Modelo de optimización de arreglos de cometas captadoras de energías sostenibles», *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 46(2), 2023. <https://doi.org/10.22209/rt.v47a01>
- [9] C. Sandoval-Ruiz. « $\Omega$  – Vórtices y acoplamientos resonantes en modelo de patrón de flujo toroidal regenerativo mediante física moderna y ondas», *Calibre: Revista Brasileña de Engenharia e Física Aplicada*, 9(1), pp.1-20, 2024. <https://revistas.icesp.br/index.php/REBEFA/article/view/5190/2974>
- [10] C. Sandoval-Ruiz. «Operador matemático para caracterización y optimización de etapas de sistemas físicos». *Revista Colegiada de Ciencia*, 5(2), 88–98, 2024. <https://doi.org/10.48204/j.colegiada.v5n2.a5029>.
- [11] C. Sandoval-Ruiz, «Proyecto Cometa Solar–CS para optimización de sistemas fotovoltaicos». *Universidad Ciencia y Tecnología*, 24(100), 74-87, 2020. <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/307>
- [12] C. Sandoval-Ruiz, «Tecnología R-IEDs para ERNC, teletrabajo y mitigación de impacto ambiental». *Industrial data*, 23(2), 151-167, 2020. <https://doi.org/10.15381/idata.v23i2.18633>.