

JK-ESS para energías renovables con realimentación híbrida

JK-ESS renewable energies storage with hybrid feedback

Sandoval-Ruiz, Cecilia

Facultad de Ingeniería / Dirección de Postgrado
Universidad de Carabobo, Venezuela.
cesandova@gmail.com

Resumen

En este artículo se propone un modelo reconfigurable para la migración a energías renovables. El método se basa en un mapeo de configuración de sistemas de almacenamiento de energía potencial con la arquitectura biestable JK, generalizado a un registro de desplazamiento de retroalimentación lineal LFSR de múltiples etapas con esquema de migración ERNC. Como resultado, se obtiene un arreglo, para soportar la configuración dinámica del ESS, donde es posible modelar teóricamente un término de compensación y el porcentaje correspondiente $1/r(n)!$ de minimizar las pérdidas. De esta forma, se llegó a un modelo genérico para los activos de infraestructura energética de América Latina, con el fin de apoyar la adaptación hacia proyectos híbridos renovables, con tecnologías sustentables. Se concluye con la incorporación del término de tasa de recuperación ambiental, como índice de desempeño de los programas de remediación por el uso de los recursos naturales, con el fin de garantizar el equilibrio del proyecto con los ecosistemas de la región.

Palabras clave: Energy Storage System, Generic Model, JK Configuration, Renewable Energy, Technological Migration.

Abstract

In this article, a reconfigurable model for the migration to renewable energies is proposed. The method is based on a configuration mapping of potential energy storage systems with the JK bistable architecture, generalized to a multi-stage LFSR linear feedback shift register with scheme of ERNC migration. As a result, an arrangement is obtained, to support the dynamic configuration of the ESS, where it is possible to model theoretically a compensation term and the corresponding percentage $1/r(n)!$ of minimizing losses. In this way, a generic model for the energy infrastructure assets of Latin America was arrived at, to support the adaptation towards hybrid renewable projects, with sustainable technologies. It concludes with the incorporation of the term of environmental recovery rate, as a performance index for remediation programs for the use of natural resources, to guarantee the balance of the project with the ecosystems of the region.

Keywords: Energy Storage System, Generic Model, JK Configuration, Renewable Energy, Technological Migration.

1 Introducción

América Latina avanza en la migración de la matriz energética actual, siendo el almacenamiento de energías renovables un reto, que puede ser enfocado en las condiciones topográficas (Valle y col., 2022) y gradiente geomagnético, para el desarrollo de tecnologías ESS (por las siglas en inglés *Energy Storage System*) (Tang y col., 2022), tomando como criterio el uso eficiente de los recursos disponibles, sin intervención de ecosistemas de la región, basada en modelos de hardware reconfigurable.

Es en tal sentido que una arquitectura del sistema de almacenamiento con recirculación (Sandoval-Ruiz, 2021a), resulta una solución eficiente, a la que se propone considerar un término de recuperación de energía residual, que corresponde a una innovación para mejorar el desempeño del ESS.

Lo que tiene una incidencia directa en el modelo de evaluación ambiental y evaluación financiera del proyecto, planteándose como aceleradores para la migración a energías renovables. La solución de ingeniería está enmarcada en el amplio potencial de línea costera del continente, que dota de una capacidad instalada asociada a los puertos de descarga de combustible en la infraestructura energética instalada, lo que permite plantear como meta una adaptación, mediante un modelo genérico del activo, para estimar la rentabilidad por unidad de reconversión, así como el ahorro asociado y el impacto ambiental, a través de un indicador de velocidad de recuperación ambiental del modelo.

Para el objetivo de proponer un modelo sostenible de ESS se plantea una etapa regenerativa, dado que todos los sistemas naturales presentan ciclos cortos y largos de regeneración, los cuales se modelan por un lazo interno y un lazo

externo. La energía captada (variable directa del ciclo interno) es almacenada como energía potencial (térmica, neumática, elástica, hidráulica, otros estados de la materia, para su realimentación), a través de un circuito cerrado (Ver Fig.1) que busca minimizar el impacto ambiental del convertidor, a la vez de disminuir el costo energético del proceso.

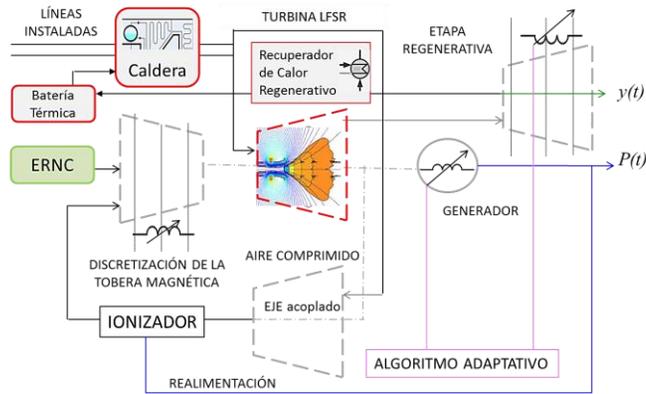


Fig. 1. Esquema de adaptación de plantas instaladas

El esquema presenta una o más entradas de energías renovables, a través de multiplexores, los cuales están pensados para acoplar una solución híbrida, con etapa intermedia compatible entre las variables, tal es el caso de arreglo de captadores de energía, de forma de compensar la intermitencia, mediante arreglos de ESS (Gómez y col., 2021). Un lazo interno de realimentación, con alternativa de acelerador por plasma confinado magnéticamente para control activo de flujo y catalizador (You y col., 2022), onda acústica (resonancia), realimentación de potencial acumulado y un lazo auxiliar que corresponde a la recuperación de energía residual del proceso (Sandoval, 2021a): bombas de calor regenerativo y baterías térmicas de Carnot (Zhang y col., 2023), por sales fundidas, arena y otras con recurso disponible de la región.

La generalización del esquema tiene como objetivo soportar la configuración de actualización (migración de centrales) y la adaptación de operación (de acuerdo con la dinámica climática). Por lo que resulta necesario un modelo matemático (Sandoval, 2020, 2021b) sobre el cual establecer los parámetros selectivos de la arquitectura y ponderación de las etapas de captación, transmisión y conversión, con sus etapas intermedias de registro de energía y la interacción entre las etapas y elementos del arreglo, a fin de establecer un término de recuperación de energía residual.

Las condiciones específicas de radiación solar, distribución geomagnética, características propias de la latitud y longitud, sus reservas de minerales, gas natural y fluidos magnéticos hacen de América Latina un candidato para el desarrollo de nuevos modelos de desarrollo sostenible, basado en tecnologías reconfigurables y modelos matemáticos de migración energética inteligente, inspiradas en la biomimética propia de la región (Sandoval-Ruiz, 2023). Todo esto en el contexto de desarrollo sustentable, dado por la gestión

responsable de los recursos locales, reconocimiento de potencialidades, revalorización de energía y materiales residuales, para el desarrollo de tecnología endógena.

Vale destacar que cada elemento del sistema tiene un impacto sobre la dinámica general de comportamiento de éste, bien sea en la eficiencia energética, emisiones de calor residual, ruido, contaminación electromagnética, así como sobre las ondas de energía incidentes que se ven refractadas por efecto de los captadores de energía, notando que este factor no se ve reflejado en los modelos ESS actualmente estudiados (Ochoa y Martínez, 2019) y (Gómez y col., 2021). Dada la importancia de preservar la calidad de los ecosistemas, se plantea integrarlo al modelo energético de compensación de impacto ambiental.

Simplificación de la Transición Energética a ERNC

El primer factor determinante debe venir de la implementación de tecnologías verdes innovadoras, en el marco de alianzas estratégicas de transferencia tecnológica. Estas tecnologías se deben caracterizar por flexibilidad, reutilización de hardware y energía, cero residuos y mínima intervención de espacios. Por lo que es preciso un reconocimiento de las condiciones y los recursos naturales nativos, para el desarrollo tecnológico endógeno, a fin de independizarse de tecnologías que están diseñadas para otras condiciones y por ende comprometen su eficiencia.

Se requiere la identificación de la infraestructura potencial, inserción de acoplamientos reconfigurables con tecnología FPGA en los puntos fijos para dotar de flexibilidad al sistema, modelado matemático sobre una arquitectura base de entrada, realimentación selectiva JK-LFSR y ajuste de parámetros. A fin de soportar la reutilización de equipos y componentes, así como mantenimientos en línea y actualizaciones dinámicas en función de la compatibilidad de tecnología. Así el modelo busca evaluar el impacto ambiental y minimizar la inversión como acelerador de transición. En la Fig. 2 se plantea el esquema de almacenamiento directo de componentes de energía captada y la realimentación selectiva de energía inercial, para la etapa de almacenamiento de energía potencial.

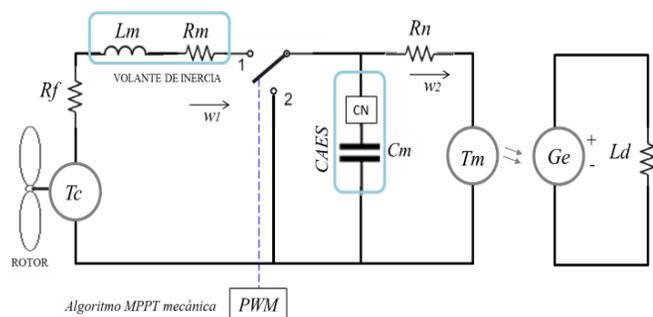


Fig. 2. Esquema de realimentación switch multinivel

Modelo JK-Biastable de Almacenamiento de ERNC

El esquema híbrido para sistemas de almacenamiento de energías renovables puede ser aplicado para baterías

térmicas (de arena, rocas en las costas cercanas a las termoeléctricas, aire comprimido, aire ionizado, agua ionizada, vapor de agua sobrecalentado, baterías de CO₂, hidrógeno verde, volantes de inercia, arreglos gravitacionales con polipastos, muelles (resortes de compresión), así como realimentación directa biestable JK, entre captadores de energías renovables (Sandoval-Ruiz, 2021a).

Todo lo antes mencionado debe ser resumido en un modelo matemático, que permita su extrapolación a cada una de las aplicaciones regionales. Es por ello que se ha seleccionado un esquema ampliamente desarrollado en circuitos de memoria como lo es los sistemas biestables. Partiendo de un análisis de correspondencia de éste para cada una de las formas de almacenamiento, según su naturaleza física. En la Fig. 3 se observa la configuración JK.

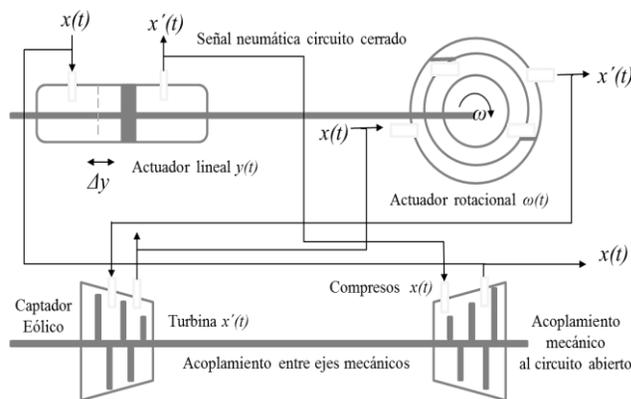


Fig. 3. Mecánica de fluidos - energía potencial

Se ha seleccionado un circuito con lazos de realimentación, donde la variable de salida del elemento de almacenamiento J , es realimentado a la entrada del almacenamiento K , de manera de establecer un ciclo combinado, que por acción las fuerzas físicas pueden ser recuperada la energía residual del sistema. En el circuito mecánico se logra identificar la etapa de realimentación entre los elementos del mecanismo neumático, con almacenamiento de aire comprimido.

La arquitectura coincide entre los circuitos de recirculación para almacenamiento de energía. Sobre estos esquemas se identifica la relación de las variables del modelo, a fin de obtener la generalización que permita la investigación de estos sistemas en para el desarrollo de nuevas tecnologías a partir de laboratorios móviles (Sandoval, 2021d), para identificación, modelado y optimización de la red de energías renovables, reutilizando infraestructura instalada. El principio de configuración selectiva de la realimentación y control activo entre el flujo de energía, e interacción de onda de la configuración híbrida. De forma similar, se presenta el circuito de polipastos de la Fig. 4.

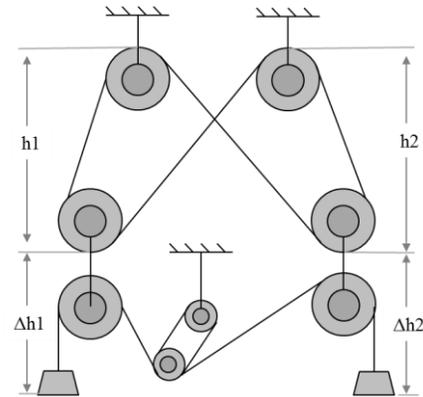


Fig. 4. Circuito de energía potencial (gravitatorio)

De manera análoga se estudia el circuito óptico para almacenamiento de luz incidente por arreglo de lentes en conversión fotovoltaica, tal como se presenta en la Fig. 5.

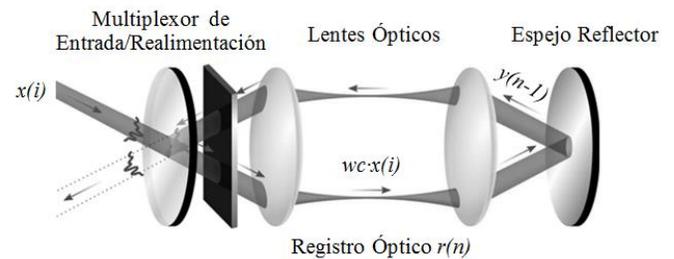


Fig. 5. Mecanismo de captación de luz (Slobodkin y col., 2022)

Así mismo se puede considerar almacenamiento intermedio por fotoluminiscencia.

Principio del Modelo Dinámico JK-ESS

En el marco de un concepto de sistemas auto regenerativos, reconfigurables orientados a tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array*) y sistemas con compensación (de campo respecto a la región de localización). La revisión de caso presenta un sinfín de tecnologías emergentes, como cometas eólicas, cometas articuladas undimotriz, tecnología fotovoltaica (Sandoval, 2020a,b,c), que pueden ser integradas en el esquema de ERNC.

Los principios del modelo dinámico propuesto comprenden un arreglo de captadores ecológicos, con una geometría inteligente, donde se mantenga el equilibrio fractal con la naturaleza, en la etapa que corresponde al arrancador de ERNC, seguido de una etapa de inducción de energía potencial, integrado con tecnología FPGA. El ESS en configuración JK se ha planteado, como etapas emparejadas en una dinámica de oscilación de energía, de forma regenerativa. Representado por un par de registros de energía confinados entrelazados en un ciclo cerrado de realimentación.

El trabajo matemático conceptual, busca establecer una coherencia entre los mecanismos prácticos de recirculación de energía y reciclaje de activos, con el modelo en lenguaje descriptor de hardware, detallado en (Sandoval-Ruiz, 2021a), de manera de evaluar el impacto de la reutilización de componentes, la recuperación de energía inercial y residual, y compensar el efecto acumulativo de los procesos con remediación ambiental. Energía mecánica cinética con almacenamiento a través de batería inercial (volante de inercia con rodamientos de levitación magnética, batería de rotor directa WT ERNC o baterías giroscópicas), energía potencial baterías flexibles, a partir de la posición por el trabajo realizado, almacenamiento elástico por carga de una matriz de muelles y energía residual por recuperación de calor regenerativo. Del mismo modo se plantea su utilización directa para disminuir las etapas de conversión y las pérdidas asociadas a estos procesos.

2 Delineamiento Metodológico

Se realizó el diagrama de flujo del proceso de identificación del sistema, incorporando la interacción para los aportes y efectos de los elementos, así como las estrategias. Para el diseño de los mecanismos a partir del esquema biestable JK, se identificó la similitud de la composición del sistema, definiendo las entradas, realimentación y salida, en la Tabla 1, con el objetivo de proponer alternativas para su descripción circuital sobre el modelo seleccionado.

Tabla 1. Identificación de etapas del modelo de ERNC

Modelado del Sistema de Almacenamiento Híbrido de ERNC	
Entradas	Captador de ondas en movimiento J eólica K undimotriz
Acople	Transmisión de Energía Cinética (compatible J-K)
Almacenamiento de energía potencial	Gravitacional, Elástica (muelles de compresión), neumática (aire comprimido), térmica (batería de arena), plasma (aire ionizado), condensados BEC, otros estados de la materia.
Lazo Interno	Energía potencial para convertidor
Conversión	Planta de Conversión de energía eléctrica (Turbina)
Salidas	Interacción entre componentes del arreglo captador
Lazo Externo	Realimentación en energía de almacenamiento

Se estableció una matriz de clasificación para definir los términos del modelo de evaluación ambiental, específicamente entre tres componentes del impacto: directo, acumulativo y medidas de remediación (reversible), donde se ha considerado como el radio de alcance máximo para un impacto neto cero, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz de clasificación del modelo de evaluación ambiental

Componentes en el Modelo de Evaluación Ambiental del Proyecto	
Directo:	Ponderación de impacto ambiental directo e indirecto
$\sum_{i=1}^m w_i \cdot x_i(n)$	Filtrado de componentes y recuperación de calor
Acumulativo:	Impacto que permanece en el tiempo
$y_0(n-1)$	Emisiones de calor acumulativas
Reversible:	Tasa de Recuperación ambiental
$\frac{1}{r!} \sum_{i,j=1}^{m,n} \Delta I_{i,j}(n)$	Fito-Remediación y restauración de ecosistemas
	Emisiones de CO ₂ evitadas con el proyecto

Se realizó la asociación con las variables físicas y variables económicas-ambientales del modelo genérico de activos, para el análisis de factibilidad como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Modelado de la adaptación de tecnología

Modelado del Sistema de Evaluación Económica del Proyecto	
Utilidad	Presupuesto de potencia y demanda de energía Costos de Adaptación y O&M
Impacto Circular	Ahorro en combustible e insumos primarios Subsidios y bonos carbono neutral, políticas ambientales
Medidas Estratégicas	Tasa de Retorno de la Inversión-Adaptación TIAR Modelo circular-fractal y reutilización de energía Revalorización de Activos y superación de obsolescencia

Se puede observar una correspondencia entre los términos de utilidad ambiental y económica; un remanente por impacto ambiental acumulativo, que será el equivalente en la tabla de depreciación a la revalorización de los recursos; y un impacto mixto o radial de remediación y medidas estratégicas, que se atenúa con la distancia entre los elementos del arreglo.

Finalmente, se estableció una matriz de inferencia entre las etapas estudiadas del sistema como método de correlación de variables de energía para diversas tecnologías, reportadas en la Tabla 4, que se puede extrapolar a tecnologías emergentes y condiciones locales, sobre un mismo modelo de actualización.

Tabla 4. Matriz de inferencia del modelo de ERNC

Modelado del Sistema de Captación de Energías Renovables			
Ec./ Tipo de Captación	$\sum_{i=1}^m w_i \cdot x_i(n)$	$y_0(n-1)$	$\frac{1}{r(n)!} \sum_{i,j=1}^{m,n} \Delta x_{i,j}(n)$
Eólica	Captación álabes	Inercia	Recirculación de flujo
Fotovoltaica	Select. espectral	Bifacial	FV Holográfica
Termo-solar	Captación calor	Residual	Radiación/Convección
Undimotriz	Colector olas	Elástico	Interacción de ondas
Óptica	Polarización	Espejo	Composición espectral
Geomagnética	Magnetización	Histéresis	Interferencia E.M.
Ionización	Control Activo	Residual	Memoria Estructural

* Se considera un efecto remanente en cada componente de la señal total, desde magneto-electrónica con la configuración estructural de espín.

La implementación de los términos modelados permite estimar el consumo de recursos de hardware, como se presenta en la Tabla 5, para *n* dispositivos de adaptación en acoples inteligentes del sistema reconfigurable desarrollado.

Tabla 5. Recursos de utilización en el FPGA xc3s200-5ft256

Recursos	Cantidad	Operadores	Cantidad
Slices	105	Flip Flops	48
4 Input LUTs	194	MULT 18x18s	12

* Reporte estimado a partir de la descripción en VHDL del modelo base.

Caso de Estudio: ESS Realimentado JK

Se estudia un caso particular para entradas en combinación de energía híbrida: eólico-undimotriz (UdC, 2023), orientado a reconversión de plantas termoelectricas en zonas cercanas a muelles. El modelo estándar se plantea de forma no invasiva, a través de arreglo de cometas de captación de energía de las ondas de energía en movimiento, acoplada a una plataforma ESS neumática compatible con las entradas,

un mecanismo de almacenamiento intermedio, con realimentación JK para la etapa de conversión, con estructura presentada en la Fig. 6.

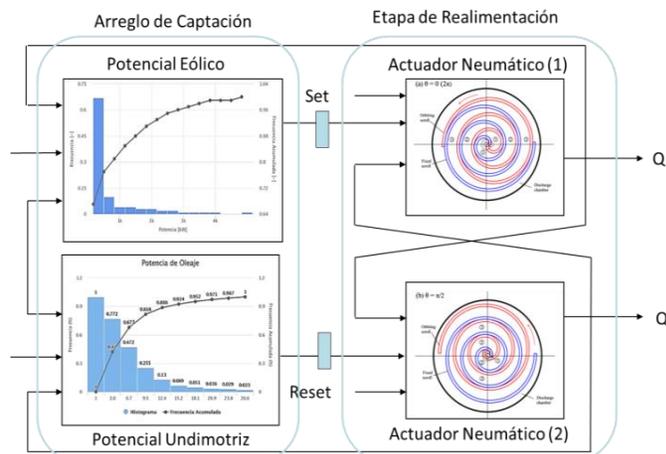


Fig. 6. Esquema biestable JK de almacenamiento de energía

El esquema permite ilustrar la compatibilidad de la señal neumática a la salida del arreglo de captadores de energía híbrida: eólica/undimotriz, con lo que se logra combinar el aporte de cada entrada, definiendo la variable común de realimentación directa, en un ciclo combinado de almacenamiento de energía neumática, lo que permite independizar el circuito de captación (cero impacto ambiental) respecto al circuito cerrado de conversión, sin elementos de rotación que coloquen en riesgo a la fauna local.

Por último, es importante hacer mención del nivel de abstracción del modelo, para lograr la validación de la formulación matemática por correlación, para la descripción en VHDL, identificación sobre el esquema físico y la adaptación dinámica de coeficientes reales, que permitirán definir el comportamiento de los componentes, con las ventajas de mapeo de cada elemento del sistema, luego estos pueden ser extrapolados para la evaluación de factibilidad económica-ambiental.

Por la compatibilidad detectada se puede aplicar un subsistema CAES (Sun y col., 2015), está compuesto por un actuador neumático (*scroll expander*) y un tanque de almacenamiento de aire comprimido. Este tipo relativamente nuevo de actuador tiene una estructura mecánica, que conduce a una mayor capacidad de conversión de energía a partir del aire comprimido. De esta manera se realimenta la energía mecánica almacenada en forma neumática CAES a través de un mecanismo de transmisión, un accionamiento neumático que puede proporcionar una compensación directa al eje de la turbina eólica, considerada como la señal de realimentación al sistema eólico, como una aproximación al modelo de las etapas.

En Sandoval-Ruiz (2022) se presenta un estudio detallado de los aerogeneradores, con una interpretación de bloques discretos de energía y lentes de concentración eólica.

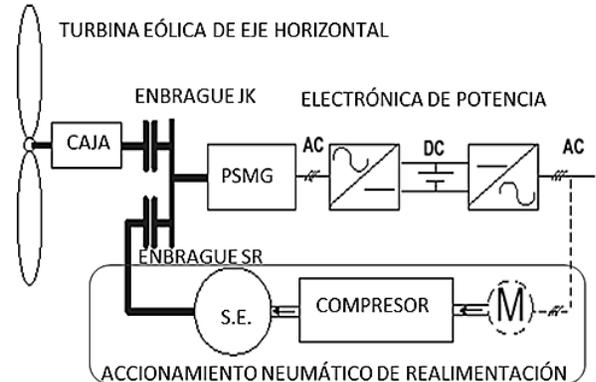


Fig. 7. Esquema de realimentación de la turbina (Sun y col., 2015)

3 Análisis de Resultados

Se partió de la ecuación de convolución básica, donde se describió el comportamiento del sistema en tres dimensiones, dejando un término de ajuste (arbitrario para condiciones específicas). En consideración de los modelos de la naturaleza donde se presenta ciclos regenerativos se incluyó un término de realimentación, con la dimensión temporal. El modelo sigue siendo una particularización porque se mantiene el *bias* (término independiente). Luego se incorporó un término en la dimensión espacial con relación fractal en (1).

$$y(n) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot x_i(n) + \varphi \cdot y(n-1) + \frac{1}{r!} \sum_{i,j=1}^{m,n} \Delta x_{i,j}(n) \quad (1)$$

El término que pondera el efecto de un elemento sobre otro, en la red de difracción de la onda de energía, inversamente proporcional al producto factorial de la distancia, permite medir el impacto ambiental indirecto y su compensación (Sandoval, 2021c), éste se puede reescribir como una progresión geométrica (2).

$$\sum_{i,j=1}^{m,n} \frac{1}{r_i(n)!} I_j^i(r) \quad (2)$$

Donde la razón de la progresión está dada por la variable x_j para el efecto del arreglo, sobre el elemento i , que refleja un componente de onda realimentada al elemento j . Siendo $\frac{1}{r_i(n)!}$ el factor de recuperación de energía, por tanto, está asociado a la minimización de pérdidas en la eficiencia del sistema. Como se puede observar el modelo considera un componente de energía cinética y un componente de energía potencial, este último en función de la distribución geométrica de los elementos del arreglo (matriz de elementos $m \times n$).

Modelo Genérico del Activo: Proyecto de Migración

Para la descripción de la dinámica de producción de energía, en relación con el potencial de la región (Figura A), alimentando el indicador desde el modelo matemático, se relaciona este valor con la variable de la demanda eléctrica, lo que permitirá estimar el presupuesto de producción en (3).

$$f_c * x_c(n) = x_d(n) - x_{ER}(n) \quad (3)$$

Siendo f_c el coeficiente de eficiencia del combustible, $x_c(n)$ la cantidad de combustible, $x_d(n)$ la cantidad de energía demandada, $x_{ER}(n)$ la cantidad de energía renovable generada. Seguidamente para estimar los beneficios totales del proyecto, se descontará la cantidad de combustible ahorrado, para la evaluación económica, una variable de ahorro de combustible por energía renovable, que será ponderada por el precio de energía (MWh) en (4).

$$B_{ER} = w_d(n) * x_d(n) - w_c(n) * x_c(n) \quad (4)$$

Siendo $w_d(n)$ el precio de la energía eléctrica en la dinámica de la demanda en el mercado y $w_c(n)$ el precio del combustible, permitiendo estimar el ahorro económico.

Por su parte, el ahorro de combustible calculado en el primer paso será aplicado para la evaluación ambiental, ponderando este valor por la relación de emisiones de CO₂ asociadas al proceso de producción, así el ahorro de combustible permitirá estimar la cantidad de emisiones evitadas. De forma similar, se plantea el cálculo de las emisiones de calor recuperadas con el método propuesto y el reciclaje de componentes, en la revalorización de los activos de la planta, a través del modelo circular-fractal, lo que introduce un término a la ecuación de valor acumulado.

Por su parte para el cálculo de los costos de almacenamiento, se parte de la premisa, que los costos de operación y mantenimiento de la planta se mantienen constantes respecto a los costos de O&M de la termoeléctrica, para reconversión en las etapas del sistema.

Los costos fijos se mantienen constantes asociados al mantenimiento preventivo dando lugar a nuevas herramientas como robótica flexible magnética. Los costos variables serán los indicados en términos de producción, relacionados a los correctivos por desgaste y operaciones de los captadores de energía renovable. De esta manera, se puede observar un ahorro en costos de combustible, lo que representa una mejora de la rentabilidad, desde la perspectiva financiera. De igual manera se tiene una reducción en las emisiones de CO₂ y en las emisiones de calor, que es reutilizado en los procesos termodinámicos.

Entonces, el modelo genérico del proyecto requiere el estudio de la inversión inicial, que incide en los gastos financieros, depreciación y amortización del proyecto. El primer aspecto es considerar que el diseño se orienta a la infraestructura instalada, lo que se traduce en una minimización de la inversión, que será representada por la actualización de equipos a nivel de tecnología y la adaptación de equipos dentro del modelo genérico en la etapa de captación de energía cinética y óptica, en esquema híbrido JK.

El segundo aspecto en el modelo del activo es establecer el número de elementos captadores por arreglo, con lo que el costo por captador (componentes nuevos y reciclados), será en función de la demanda de la planta. La eficiencia y actualización dinámica estará bajo el principio de elementos

móviles, matriz reconfigurable, actualización *firmware* y software de configuración dinámica.

De lo anterior, se formuló el modelo general presentado en (5), que permite estimar la configuración del sistema y soportar el modelo de evaluación económica y ambiental, en relación con el número de adaptadores en la etapa de captación y almacenamiento, los costos de mantenimiento (se consideran sobre la base actual) e ingresos por ahorro de combustible.

$$VAN(n) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot x_i(n) - \frac{1}{r(n)!} \sum_{i,j=1}^{m,n} \Delta F_{i,j}(n) + I_0(n-1) \quad (5)$$

Con $x_i(n)$ los flujos que reflejan la producción de energías renovables menos los costos fijos de operación, $\Delta F_{i,j}(n)$ los flujos por período resultantes del diferencial entre los ahorros de combustible y los costos de mantenimiento del sistema propuesto, donde $\frac{1}{r(n)!}$ corresponde a un factor de reducción asociado al ahorro de combustible, I_0 el activo a reutilizar en el modelo circular-fractal (equipos instalados) con signo negativo más la inversión de adaptación (FPGA, NTE), todo bajo un modelo genérico aplicable sobre ANN (Sandoval-Ruiz, 2020d).

El mismo modelo genético se puede aplicar para la evaluación ambiental del proyecto de migración, siendo el primer término el impacto directo por factor, el segundo término el impacto acumulado por las operaciones del sistema y el tercer término, el impacto asociado por la interacción entre componentes del sistema con elementos del entorno, siendo inversamente proporcionales al radio de acción, donde se puede expresar la reversibilidad en función de este término.

Sistema de Almacenamiento Bi-estable JK-LFSR

En el diseño del sistema de almacenamiento de energía renovable lo primero es estandarizar los módulos, en la primera etapa se tiene el módulo de captación de energía, representado por antenas captadoras, seguido de la etapa de transducción de la señal y transmisión, para finalmente abordar el módulo de almacenamiento, que corresponde a un esquema multietapas de carga, partiendo de la configuración de cerrojo biestable JK, por su aplicación en almacenamiento de datos.

Se realizó una estandarización del modelo JK a un circuito LFSR, que comprende la universalización de etapas con osciladores acoplados, es decir acoplamiento elástico de elementos de almacenamiento de energía potencial. Recuperando los diversos tipos de energía y vibraciones por resonancia de ondas de choque, de diferencial de presión. Luego se tiene una solución estandarizada que ofrece como ventaja un esquema único que puede ser adaptado a las especificaciones técnicas de la región.

Esto permite promover de forma eficiente la reconversión

de centrales termoeléctricas instaladas a sistemas inteligentes de almacenamiento de energía, mediante un modelo genérico de activo, destacando la compatibilidad de tecnología, como solución para minimizar el impacto de hardware, promover la reutilización en la gestión de activos, así como el reciclaje de recursos y energía.

4 Consideraciones Finales

En los criterios de diseño sostenible, tanto para los puntos de interconexión de etapas (remoto sobre la planta), como para el banco de prueba (portátil), para identificación, monitoreo en línea, actualización dinámica, auto reparación sobre modelo y optimización del sistema, se plantea tecnología FPGA, con un programa de generación de secuencia, recolección de datos y entrenamiento del modelo, para obtener parámetros, optimizar y reconfigurar la arquitectura y coeficientes adaptativos.

En un primer acercamiento al modelo se deben considerar conceptos de gemelos digitales que permitan monitorizar y realizar seguimiento a las variables del sistema, con especial interés en presupuesto de energía residual, que permita gestionar un inventario de energía térmica disponible, para su reincorporación al ciclo de conversión. Por otra parte, mantener un stock actualizado de componentes reutilizables, para revalorización de módulos en la migración sostenible. La gestión responsable de recursos residuales como agua, calor industria en materiales en las líneas de transporte por recirculación o baterías de calor de arena (ver Tabla 6).

Es importante mencionar que la inversión se concentra en los dispositivos electrónicos y la actualización tecnológica (verde) correspondiente, de manera centralizada para optimizar los arreglos con el propósito de reducir el número de elementos componentes y así minimizar las fallas. Se propone la reutilización de equipos de potencia, intercambiadores de calor, cilindros neumáticos y componentes específicos, lo que simplifica el procedimiento de migración, reduce costos y minimiza el impacto ambiental por desmantelamiento con nuevas tecnologías portátiles.

Estas consideraciones inciden en evaluación económica lo que permite definir un modelo circular-fractal, donde la depreciación del activo es no-lineal, ya que se revaloriza en el tiempo, además de minimizar los costos de operación por la reducción asociada al combustible y tiempos de mantenimiento, mediante la optimización centralizada, condensadores síncronos con volante de inercia en lazos JK-ESS.

La generalización a través de las ecuaciones con parámetros adaptativos para las regiones representa una herramienta para la formación de profesionales de Latino América con la interpretación física de indicadores de desempeño por eficiencia energética del sistema JK, ajustado al entorno local. Sistemas de captación flotante *off shore* (costa afuera), con parámetros configurables de despliegue de la estructura y pivoteo del eje de ataque, que permitan adaptar el arreglo captador a las condiciones de las ondas. Un esquema eficiente y de bajo costo, materiales locales sostenibles, no invasivo del ecosistema, transmisión por acoplamientos y sistema de

conversión sobre capacidad instalada en plantas existentes.

Se desarrollaron los modelos partiendo de reconocer la arquitectura LFSR. Se identificaron tres etapas de: impacto directo, acumulativo e interacción diferencial. Se reconocen patrones en las arquitecturas para el tratamiento de señales y correlación de variables, inferencia de términos matemáticos descriptivos, para generalización de un estimado para reconocimiento de infraestructura instalada, propuesta de adaptación sobre el modelo dinámico y actualización por hardware reconfigurable. Un punto no menos importante, para lograr la migración hacia las energías renovables corresponde a la estandarización de los procesos, construcción de un repositorio con las experiencias previas, para fomentar los avances de cooperación estratégica latinoamericana, la gestión de activos sobre un modelo genérico, cogeneración de energía en el modelo híbrido y la estandarización académica de los profesionales, a fin de facilitar la participación en proyectos de talento humano de la región, de forma remota.

Las etapas concatenadas promueven un arreglo de captación de energía no invasivos, por lo que deben ser contemplados los efectos ambientales sobre la fauna y flora, a fin de evitar las emisiones contaminantes y de calor, así como la alteración del patrón dinámico de flujo en las ondas incidentes. En los modelos LFSR para sistemas de energías renovables (Sandoval, 2021a), se analizó una condición previamente no estudiada, que corresponde a la difracción de onda a la salida del convertidor, en este caso se incorpora un tercer término al modelo matemático, donde se estima el aporte de cada componente reflejada, como realimentación reflejada.

Un JK-ESS en configuración universal LFSR(n,k) de osciladores acoplados, con registros de memoria de energía elástica k_e , de n nano-ciclos con k etapas de almacenamiento. Para el modelado es necesario expresar el comportamiento del circuito de forma genérica, puede representarse como un circuito de multiplexación espaciotemporal. Siendo necesario definir los parámetros de escalabilidad del circuito en función del número de etapas, lo que permite la reutilización de hardware del circuito. Composición dimensional de efectos acumulativos de la variable de control del sistema de almacenamiento del convertidor de energías renovables.

Sistemas con etapas concatenadas de almacenamiento de energía en relación con variables directas, intrínsecas del mecanismo de captación y variables indirectas, compatibles entre los módulos. Reconocimiento de patrones en la configuración LFSR para implementación en etapas de señal multiplexada J/K un circuito biestable. La configuración JK biestable sobre circuitos secuenciales de realimentación lineal, se ha identificado en un conjunto de modelos mecánicos, ópticos por filtros de polarización de luz, que igualmente pueden ser extrapolados a circuitos cuánticos a nivel de configuración de espín y nuevas tecnologías.

Uno de los siguientes retos para sistemas ESS de energías renovables corresponde al mantenimiento regenerativo, que deberá comprender mantenimiento predictivo y un diagnóstico de fallas en componentes por variación de coeficientes, asociados a parámetros físicos del modelo.

Tabla 6. Modelo fluido termodinámico y almacenamiento JK-ESS

Descripción de procesos en convertidores eólicos, recuperación de calor regenerativo RCR, en etapas de almacenamiento intermedio

Fuerza de Arrastre sobre cuerpos sumergidos:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

Potencia de Arrastre:

$$P = \frac{1}{2} C_D \rho A v^3$$

Fuerzas de corte y de presión, el arrastre y la sustentación se definen como los componentes de fuerzas paralela y normal respectivamente, ejercidos sobre un cuerpo por el fluido en movimiento, a la velocidad relativa de aproximación.

Ecuaciones de conservación de Bernoulli para estimación de efecto del concentrador o ducto de aire pre convertidor, se calculan los datos teóricos para el modelo neuronal del *wind lens*.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma_2} + \frac{v_2^2}{2g} + H_f + H_{RT} + H_{ens} + H_{cont}$$

Propiedades de almacenamiento de energía de los materiales: Aero-elástica, Magneto-elástica y configuración electrónica.

Superficies aerodinámicas configurables. Rejilla de Turbulencia, filtro de componentes del espectro de viento, por control activo de flujo eólico.

Se definen las etapas y realimentación para simplificación y estimación de coeficientes del rotor mecánico y generador eléctrico.

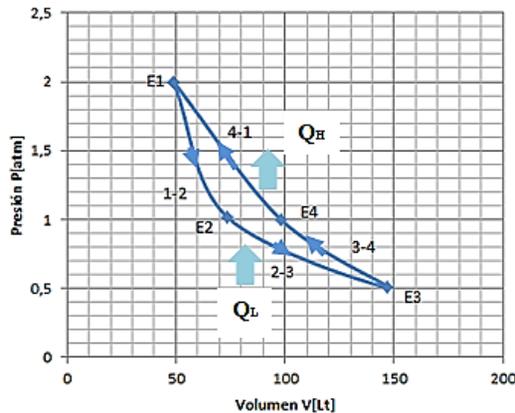
Se modela el acoplamiento de levitación magnética para el eje de la turbina con un modelo LFSR-ANN.

Un control selectivo para la carga del CAES y mantener la potencia demandada constante.

Reconfiguración de las etapas para maximizar la eficiencia respecto a la función de transferencia del convertidor y realineación de los elementos con respecto a la interacción entre elementos, patrón de viento, recursos naturales y condiciones locales.

Modelo Termodinámico para Captación (CRC) y Almacenamiento de Energía Térmica, IR-PV

Proceso	$\Delta W[J]$	$\Delta U[J]$	Entalpía $\Delta H[J]$	Q[J]	Entropía $\Delta S[J/K]$
1-2	Adiabático	$-\Delta U_{12}$	$CV\Delta T_{12}$	0	0
2-3	Isotérmico	$nRT_2 \ln(V_2/V_3)$	0	W_{23}	Q_{23}/T_2
3-4	Adiabático	$-\Delta U_{34}$	$CV\Delta T_{34}$	0	0
4-1	Isotérmico	Q_{41}	0	$-\Delta S_{41} * T_4$	$-\Delta S_{41}$
Total del Ciclo	$W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$	0	0	$Q_{23} + Q_{41}$	$S_{23} + S_{41}$



Proceso Adiabático: $\Delta Q = 0$, $\Delta U = -W$, $\Delta H = W$,
Donde: $\Delta U = C_V \Delta T$ y $\Delta H = C_P \Delta T$ variación de energía interna y entalpía.

Procesos Isotérmicos: Absorbe calor de una fuente a baja temperatura en la cantidad QL

Isotérmica temperatura constante: $\Delta U = 0$, $\Delta H = 0$

Los estados están representados por: E1, E2, E3, E4 y los procesos: 1-2, 2-3, 3-4, 4-1.

Observación: En el proceso de expansión isotérmica se requiere energía para mantener la temperatura constante, entra al sistema una cantidad de energía (calor) $QL > 0$. En el proceso de compresión isotérmica, se debe liberar energía para mantener la temperatura constante, sale del sistema (calor) $QH < 0$, libera calor al ambiente.

Estudio de Optimización del Sistema Híbrido de ERNC y Almacenamiento (aplicando Investigación de Operaciones)

Elementos de Sistema	Ángulo de Pitch	Coefficiente de arrastre	Potencia (KW)	Función Objetivo Primal:
Captador 1 (x1)	v1	c1	5	$MáxP = 5 * x_1 + 8 * x_2 + 11 * x_3 + x_{31}$
Captador 2 (x2)	v2	c2	8	Sujeto a las siguientes restricciones:
Captador 3 (x3)	v3	c3	11	$v_1 * x_1 + v_2 * x_2 + v_3 * x_3 + x_{31} \leq 1.3$
Realimentación (x31)			1	$c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + c_3 * x_3 + x_{31} \leq 2.1$
Costo energético	1.3	2.1		$x_1, x_2, x_3 \geq 0$

Los rangos de flujo de viento: $v_{min} < v_1 < v_{max}$ para el que se optimiza la variable del coeficiente de ganancia, en la función objetivo de potencia máx. En el: ángulo de pitch del álabo. Por otra parte, la variable x31 corresponde al almacenamiento de potencia, en relación con la energía cinética registrada en las cámaras de viento de la turbina. Así mismo el rango $c_{min} < c_1 < c_{max}$ define el costo energético.

Función Objetivo Dual:

$$MinG = 1.3 * y_1 + 2.1 * y_2$$

Sujeto a las siguientes restricciones: $y_1, y_2, y_3 \geq 0$

$$v_1 * y_1 + c_1 * y_2 \geq 5$$

$$v_2 * y_1 + c_2 * y_2 \geq 8$$

$$v_3 * y_1 + c_3 * y_2 \geq 11$$

Donde el modelo regenerativo acá desarrollado provee de las herramientas de soporte para estos nuevos conceptos de eficiencia tecnológica y control de materiales autorreparables que lograrían ampliar la vida útil de los activos, a través de *software*, dentro del esquema de migración.

Se plantea así la incorporación del reciclaje electrónico, componentes y materiales, con conceptos *Soft Technology*, que permitan la actualización mediante reconfiguración dinámica y minimización de costos ambientales, seguido de una tasa ambiental de remediación, que permita distinguir el punto crítico (cruce por cero) del valor: impacto ambiental neto de los recursos de América Latina, basadas en modelos matemáticos, esquema LFSR de del arreglos inteligentes y captación de energía por onda modulada, en canales independientes del sistema de conversión. La innovación más relevante respecto al LFSR (Sandoval-Ruiz, 2021a) está dada por la incorporación de un término al modelo, que corresponde al entrelazamiento de ondas, elementos e impacto.

Para el modelo de evaluación económica se debe considerar el progreso coevolutivo, así como bases conceptuales de flujos circulares, que se encuentran asentadas en principios teóricos aportados por varias disciplinas y enfoques económicos-ambientales de sostenibilidad (GIZ, 2020). Sin embargo, se debe destacar que no se encontró una ecuación que reflejara la reducción de costos por reutilización de componentes, siendo uno de los aportes de la investigación, la incorporación de un término de compensación dinámica.

5 Conclusiones

Gracias al modelo matemático JK-LFSR desarrollado, se logra portabilidad y flexibilidad para la reconversión y actualización de los sistemas de energía, para esto se propuso la tecnología FPGA a fin de lograr un concepto reconfigurable en el proyecto de migración, que pueda ser ajustado a la región, a fin de promover la participación conjunta y un programa de mínimo consumo de energía, recursos y adaptación de la tecnología fija, a fin de minimizar el impacto ambiental e incorporar remediación ambiental sobre la base de la configuración ESS regenerativa.

De esta manera, se revalorizó el efecto fractal de las ondas, que se generan de la interacción entre componentes del sistema, revalorizando los aportes de energía residual, (i) incorporación de tecnología de aceleración, (ii) factor de corrección para el modelo circular-fractal, (iii) simplificación de reconfiguración sobre la arquitectura, (iv) término de minimización de pérdidas por concepto de interacción entre elementos del arreglo para aumentar la eficiencia neta del sistema, valorización de componentes reflejados entre elementos del arreglo (v) tasa de recuperación ambiental en función de técnicas de remediación.

Incorpora un término de compensación en correspondencia entre el modelo teórico físico, considerando efecto de difracción entre ondas, modelo genérico de activo, modelo circular para T.I.R. basada en recuperación de valor residual, con adaptación por *software* con FPGA para reutilización de componentes, disminución de consumo de combustible por

impacto de catalizadores e inducción de energías renovables, modelo de impacto ambiental con radio de incidencia $1/n!$ y mitigación del efecto acumulativo, no considerado en otros modelos estudiados de impacto ambiental. Un único modelo del arreglo de registros de energía, estandarizados de la configuración JK del polinomio generador LFSR(n,k) etapas.

Otro aspecto relevante es que el modelo dinámico está compuesto por términos de progresión geométrica espacial y progresión aritmética temporal, lo que permite universalizar en una ecuación matemática para las diversas tecnologías emergente, lo que permitió establecer una conjetura matemática de relación entre los elementos que interactúan, por diferencial de onda incidente del elemento i y onda reflejada del elemento j , y la distancia entre elementos en geometría fractal, lo que simplifica la reconversión y evaluación económica-ambiental, basado en realimentación selectiva, para la reutilización de las k etapas de elementos del arreglo, para la migración sostenible.

Se obtiene así, una innovación que permite soportar nuevas tecnologías aceleradoras como magneto-fluidodinámica, plasma, almacenamiento (elástico) desde la etapa de captación, entre ondas tanto en los elementos internos como los elementos del parque, que aporta recirculación de flujo y minimización de pérdidas de energía residual eficiente, en materia del modelo circular (Herrera y col., 2020). Así como componentes del modelo de mitigación de impacto ambiental que no están presentados en trabajos previos (Rivera, 2015), además de representar un activo intangible para la reconfiguración dinámica, a través de ajustes para condiciones específicas, que coincide en: (i) el esquema de del ESS con recirculación cíclica de energía regenerativa, (ii) el modelo de evaluación ambiental, remediación de impacto reversible y acumulativo, aplicando tecnología de captación de CO₂, así como cometas de remediación por control activo de flujo (Sandoval-Ruiz, 2023) y filtro espectral de radiación solar (Sandoval, 2021c), y (iii) el modelo de evaluación económica, considerando ahorro de costo energético y reutilización de componentes, para simplificación de la migración a energías renovables basadas en hardware reconfigurable (Sandoval-Ruiz, 2019, 2018) para América Latina.

Referencias

- GIZ (2020). Descarbonización del sector energético en Chile. 4e Chile [Online]. Available: <https://4echile.cl/proyectos/descarbonizacion/>
- Gómez-Ramírez, G., Meza C., S. Morales-Hernández. (2021). Opportunities and challenges to integrate electrochemical storage in central american power grids. *Rev. Tecnología en Marcha*, 34(3), pp.70-82.
- Herrero L., Lagüela E., Capilla A., Delgado A., Cerdá E., Larruga F., Fernández J., Molina A., Morató J., Tollín N., Villanueva B., Benito B. (2020). Economía Circular-Espiral: Transición hacia un metabolismo económico cerrado. España: *Ed. Ecobook*.
- Ochoa, D. and Martínez, S. (2019). Modeling an Isolated hybrid wind-diesel power system for performing

- frequency control studies. A case of study: San Cristobal Island, Galapagos–Ecuador. *IEEE Latin America Transactions*, 17(5), pp. 775-787.
- Rivera, G. Medidas de mitigación de impactos en aves silvestres. Información sistematizada nacional e internacional. 2015.
- Sandoval-Ruiz, C. (2023). Biomimética Aplicada a Modelos de Sistemas de Energías Renovables Reconfigurables, Basados en Estructuras Autosimilares. *Rev. Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 46, (1). <https://doi.org/10.22209/rt.v46a02>
- Sandoval-Ruiz, C. (2022). Wind Turbine with Configurable Feedback Scheme for Minimal Environmental Impact and Maximum Efficiency. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 26(113), pp. 123-136.
- Sandoval-Ruiz, C. (2021a). LFSR Optimization Model based on the Adaptive Coefficients method for ERNC Reconfigurable Systems. *Ingeniare*, 29(4), pp. 743-766. [10.4067/S0718-33052021000400743](https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000400743)
- Sandoval-Ruiz, C. (2021b) Fractal mathematical over extended finite fields $F_p[x]/(f(x))$. *Proyecciones Journal of Mathematics*, 40(3), pp. 731-742. <https://doi.org/10.22199/issn.0717-6279-4322>
- Sandoval-Ruiz, C. (2021c). Smart systems for the protection of ecosystems, flora and fauna. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 25(110), pp. 138-154. <https://doi.org/10.47460/uct.v25i110.486>
- Sandoval-Ruiz, C. (2021d). Laboratorio de Energías Renovables y Aplicaciones Ambientales. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Volumen 42(2), pp. 169-178.
- Sandoval-Ruiz, C. (2020a). Arreglos fotovoltaicos inteligentes con modelo LFSR-reconfigurable. *Ingeniería*, 30(2), pp. 32-61.
- Sandoval-Ruiz, C. (2020b). Proyecto Cometa Solar–CS para optimización de sistemas fotovoltaicos. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 24(100), pp. 74-87.
- Sandoval-Ruiz, C. (2020b). Arreglo inteligente de concentración solar FV para MPPT usando tecnología FPGA. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, 43(3), pp. 122-133.
- Sandoval-Ruiz, C. (2020d). LFSR-Fractal ANN Model applied in R-IEDs for Smart Energy. *IEEE Latin America Transactions*, 18(4), pp. 677-686. <http://dx.doi.org/10.1109/TLA.2020.9082210>
- Sandoval-Ruiz, C. (2019). Plataforma de Investigación de Redes Eléctricas Reconfigurables de Energías Renovables aplicando Modelos LFSR. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 23(95), pp. 103-115.
- Sandoval-Ruiz, C. (2018). Códigos Reed Solomon para sistemas distribuidos de energías renovables y smart grids a través de dispositivos electrónicos inteligentes sobre tecnología FPGA. *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, (16), pp. 37-54.
- Slobodkin Y., Weinberg G., Hörner H., Pichler K., Rotter S. Katz, O. (2022). Massively degenerate coherent perfect absorber for arbitrary wavefronts. *Science*, 377(6609), pp. 995-998.
- Sun, H., Luo, X., Wang, J. (2015). Feasibility study of a hybrid wind turbine system–Integration with compressed air energy storage. *Applied Energy*, 137, pp. 617-628.
- Tang, R., Xu, Q., Fang, J., Jiang, A. (2022). A dynamic bidding strategy of hybrid energy storage system participating in day-ahead frequency regulation market. *Journal of Energy Storage*, 56, pp. 106161.
- UdC (2023). Universidad de Chile, Explorador Eólico / Unidimotriz: <https://eolico.minenergia.cl/inicio>
- Valle-Falcones, L., Grima-Olmedo, C., Mazadiego-Martínez L., Hurtado-Bezós A., Eguilior-Díaz S., Rodríguez-Pons R. (2022). Green Hydrogen Storage in an Underground Cavern: A Case Study in Salt Diapir of Spain. *Applied Sciences*, 12(12), pp. 6081.
- You B., Liu X., Kong L., Yang J., Chen M., Zheng H., Li, S. (2022). Experimental study on direct ignition of blast furnace gas by plasma igniter in a gas turbine combustor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 09544062221089248.
- Zhang M., Shi L., Hu P., Pei G., Shu, G. (2023). Carnot battery system integrated with low-grade waste heat recovery: Toward high energy storage efficiency. *Energy Storage*, 57, pp. 106234. <https://doi.org/10.3390/en16093871>

Recibido: 28 de marzo de 2023

Aceptado: 17 de julio de 2023

Sandoval-Ruiz, Cecilia E. Profesora en Postgrado de Ingeniería UC, egresada de la Universidad de Carabobo de Ingeniero Electricista 2002, Magister en Ingeniería Eléctrica 2007 y Doctora en Ingeniería 2014. Investigadora acreditada en el PEII - Nivel C, áreas de investigación: Diseño sostenible, energías renovables, eficiencia energética y hardware reconfigurable.

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