



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>

Artículo Científico | Scientific Article

Resonancia en ESS Sistemas de Almacenamiento de Energía: óvalo de arena y códigos de memoria estructural

Resonance in ESS Energy Storage Systems: Sand oval and structural memory codes

Cecilia Sandoval Ruiz^{1,2}

¹ Universidad de Carabobo, Venezuela

²  <https://orcid.org/0000-0001-5980-292X>

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es proponer una estructura para modelar las etapas de un sistema físico complejo y una técnica para la caracterización de sistemas de captación y almacenamiento de energía renovable, siendo el caso de estudio un sistema de almacenamiento de energía térmica basado en arena, utilizando conceptos de física moderna y ondas en aplicaciones de ingeniería. El método comprende la identificación de la correspondencia del operador de convolución LFSR (circuito de registro de desplazamiento de retroalimentación lineal) y la relación directa a través de la interpretación de la dinámica del sistema. Se obtiene por etapas un conjunto de ecuaciones autosemejantes y se aplica el modelo del oscilador armónico para obtener la matriz de coeficientes del sistema termodinámico con retroalimentación de

DOI: <https://doi.org/10.66778/RM.v09n02.02>

Enviado: 21 de noviembre de 2024

Aceptado: 16 de enero de 2025

Palabras clave: Compensación simétrica, física moderna, ondas, sistemas de almacenamiento de energía térmica basados en arena (SSTES).

Keywords: Modern physics, sand-based thermal energy storage systems (SSTES), symmetrical compensation, waves.



Este contenido está protegido bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

líneas de flujo e interacción de ondas del sistema, para mejorar la eficiencia en un 61,8 % sobre la eficiencia de la batería de arena. Logrando concluir la importancia del análisis integral de las etapas del sistema, con aportes de compensación de patrones de interferencia, optimización de trayectorias de ondas en geometría proyectiva cinética, sistemas biestables, resonancia y geometría constructiva del sistema de energía potencial.

ABSTRACT

The objective of the present study is to propose a structure to model the stages of a complex physical system and a technique for the characterization of renewable energy collection and storage systems, the case study being a sand-based seasonal thermal energy storage system SSTES, using concepts from modern physics and waves in engineering applications. The method comprises the identification of the correspondence of the LFSR convolution operator (linear feedback shift register circuit) and the direct relationship through the interpretation of the system dynamics. A set of self-similar equations is obtained in stages, and the harmonic oscillator model is applied to obtain the coefficient matrix of the thermodynamic system with flow line feedback and wave interaction of the system, to improve efficiency by 61.8 % on the efficiency of the sand battery. Managing to conclude the importance of the comprehensive analysis of the stages of the system, with contributions of compensation of interference patterns, optimization of wave trajectories in kinetic projective geometry, bistable systems, resonance and constructive geometry of the potential energy system.

INTRODUCCIÓN

Dada la creciente demanda energética y los requerimientos de sustentabilidad, tanto en

gestión de energías renovables y recuperación de calor residual (Abderezak y Randi, 2020), como en sistemas de almacenamiento de energías renovables (Poulose et al., 2022), validación de modelos de almacenamiento de energía térmica basado en arena –SSTES del inglés *sand-based seasonal thermal energy store* (Pinto y Beausoleil, 2023), modelado de pérdidas térmicas (Pinto, 2023), evolución de la tecnología STES (Odoi et al, 2024) y alternativas de optimización por geometría proyectiva (Sandoval-Ruiz, 2024). Así como las limitaciones de eficiencia de centrales eléctricas de ciclo combinado, en el orden del 33 % (WEC, 2010) y conductividad térmica en SSTES, evidencian la necesidad de avanzar en tecnologías híbridas para el manejo eficiente de la energía térmica y el control de emisiones de calor al ambiente.

En este orden de ideas, se propone el concepto de estructuras sustentables de almacenamiento de alta eficiencia, para reutilización de calor industrial, configurados como óvalos de arena, para contención de energía térmica y recirculación de calor en ciclos regenerativos. Esto considerando el potencial de memoria estructural de los cristales de cuarzo, silicio y arena en aplicaciones de energías renovables, geometría e información, que pueden ser aplicados en sistemas cerrados (sin intercambio de materia), con concentración de energía incidente y reflejada, a través de geometría proyectiva.

Se plantea la optimización de los SSTES por configuraciones de estructuras simétricas (Grabusts & Uzhga, 2024), mediante los parámetros de óvalo envolvente como elemento generatriz, para las capas de aislamiento y focos diseñados, a través del patrón de interferencia: radiación y captación de ondas de calor y líneas de flujo, para la realimentación de energía, así como el reciclaje de infraestructura, reaprovechando etapas termoeléctricas –reconversión de calderas para baterías térmicas, adaptación de serpentines, turbinas y generadores instalados–.

Los actuales avances en tecnología de baterías de arena las cuales presentan ventajas en eficiencia, bajos costos y bajo impacto ambiental, sin degradar el material durante la vida útil del sistema (Vyas & Kushwah, 2023), se enfocan en las propiedades térmicas de la arena de almacenamiento de temperaturas de hasta 500 °C, se puede retener energía térmica durante períodos prolongados para su posterior conversión en energía eléctrica (Bermúdez et al., 2023). Para la optimización se consideran óvalos simétricos de resonancia cíclica, para recuperación de calor, concentración de energía en los focos de la estructura geométrica y propagación radial.

En lugar de tecnologías extractivas para almacenamiento de energías renovables ESS, se plantea una tecnología híbrida basada en conducción, convección y radiación para optimización de eficiencia de SSTES modulares, sobre ambientes no intervenidos –preservando la integridad de yacimientos de recursos minerales–. Entonces, el método consiste en desarrollar sistemas de almacenamiento por superficies dinámicas de arena en forma de óvalos, con intercambiadores de calor pasivos, en circuitos cerrados. De forma que se pueda cosechar el calor residual para ser almacenado en las baterías de arena, en sus yacimientos de origen y recuperando el calor para la reconversión de energía térmica a energía eléctrica (renovable).

Si bien, las baterías de arena reportan alta eficiencia (Ecoinventos, 2022), el rendimiento del sistema SSTES está limitado por múltiples factores, como conductividad térmica del material, etapas intermedias –de ERNC a térmica– y reversibilidad del proceso –recaptación de calor–. En atención a ellos se realizaron estudios teóricos de geometría proyectiva y análisis matemático de la interacción de ondas, con lo que se generó un modelo extendido, el cual contempla aspectos de energías renovables y principios de física aplicada: óptica, en sistemas de energía solar

de concentración CSP y fluidodinámica, en la recirculación de calor.

El reconocimiento de correspondencia entre física clásica y ondas, a partir de la observación de patrones, interpretación de principios e inferencia de términos autosimilares es un área de estudio para validar la extrapolación de modelos compatibles entre las dimensiones teóricas de la física. Partiendo de la inferencia de que la materia física son ondas cristalizadas, un estado de la materia se puede considerar como la memoria estructural. El modelo de ordenamiento a nivel de física de partículas es una extrapolación de la información intrínseca de las ondas de energía, que interactúan en el medio. En este sentido, el operador polinómico de convolución es un modelador (Sandoval-Ruiz, 2021), con multiplexado selectivo, donde la posición o superíndice corresponde al retardo en el TDL (*Time Delay Line*), siendo el orden del gradiente de la variable espacial. Se estudiaron las bases de los modelos sobre bloques discretos de energía y osciladores acoplados, identificando los sistemas físicos clásicos como una red de difracción y la interacción que define el patrón de interferencia entre los elementos como enlaces de energía, que son codificados, a través de un entrelazador convolucional LFSR.

Se inicia la disertación con un nuevo término, que intenta relacionar la función de onda que define la probabilidad de interacción de dos elementos puntuales, al análisis de una red de difracción (Sandoval-Ruiz, 2025a), por densidad de probabilidad que caracteriza el gradiente objeto de estudio. Para formular un término compatible con el espacio próximo y campo lejano, se toman consideraciones discretas de la geometría –esférica– del campo.

$$E = \frac{1}{2^m} \int_{i=1}^m \frac{1}{r_i} \rho_i(r, t) dr \text{ para } r \gg R \quad (1)$$

De allí se plantea la generalización de la ecuación (ec.1) para la descripción del patrón de interferencia en el SSTES, siendo r el radio o distancia entre las fuentes puntuales Q , o su equivalente la integral sobre la densidad de ondas uniformemente distribuida $\rho_i(r,t)$. La función de onda-fractal, para el cálculo de la densidad de probabilidad $1-\rho(r)$ en la interacción de las ondas: incidentes, reflejadas y refractadas en el campo de captación de energía, siendo definido con relación al i -ésimo orbital, para un r_i de distancia radial.

La observación dirigida a la energía y reconocimiento del patrón de interferencia y estela de las ondas (Sandoval-Ruiz, 2024a), permiten interpretar o crear formas dinámicas de optimización. La función densidad de probabilidad es la nube de puntos que se dibujan, siguiendo un modelo descriptor matemático sobre una órbita de trayectoria que modela el registro de desplazamiento de realimentación lineal LFSR(n,k), sobre el arreglo de bloques de energía en resonancia, en el cual el circuito LFSR (circuito de implementación del teorema de convolución) y la onda son interpretados como una red de difracción, donde se identifica la similitud con la ecuación de onda (2).

$$\psi(t) = V(x)\psi(r,t) - i\hbar \frac{\partial \psi(r,t)}{\partial t} \pm \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(r,t)}{\partial r^2} \quad (2)$$

El primer término se identifica por correspondencia con el término de convolución entre la red de difracción del captador (Sandoval-Ruiz, 2024b) y la función de onda –la onda es de composición fractal, con componentes de onda incidente, reflejada y difractada por los elementos previos–. El segundo término es el equivalente al componente de onda retardado por la dinámica de la red, lo que sería el componente inercial $\psi(t-1)$. El tercer término, menos considerado en trabajos previos, es el componente espacial de reflexión de onda. Obteniendo una onda luego

de la red de difracción que ha interactuado con el captador de energía y se ha restablecido, según la condición de equilibrio dinámico y compensación simétrica en los coeficientes característicos, relacionados al tensor geométrico cuántico (Kang et al., 2024).

El comportamiento de variables físicas en el tiempo, el modelado de sistemas fluidodinámicos (Sandoval-Ruiz, 2023a) y su interacción dinámica, se puede estudiar a través de un sistema de Lorenz, al trazar las variables x, y, z sobre la línea de tiempo, se obtiene un complejo patrón de vórtice simétrico similar a las alas de una mariposa –que nunca se repite exactamente, a pesar de que permanece dentro de un límite específico, es decir, un comportamiento caótico. En física es el estado o comportamiento hacia el que evoluciona un sistema dinámico es representado como un punto móvil u órbita en el espacio de fases del sistema– este patrón es denominado Atractor de Lorenz, ecuación (3), vale destacar su correspondencia con curvas como los óvalos de Cassini (Jalili et al., 2022) y Lemniscata de Bernoulli. Un sistema dinámico tridimensional que exhibe la forma de una lemniscata, de n espiras o ciclos.

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x), \quad \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y, \quad \frac{dz}{dt} = xy - \beta z \quad (3)$$

Siendo x, y, z las variables que cambian con el tiempo, como la temperatura y la velocidad en el modelo eólico. Los parámetros σ relacionado con la movilidad del calor a través de un líquido, ρ relacionado con el número de Rayleigh, que describe la diferencia de temperatura que conduce la convección y β un ajuste de interacción entre las variables. La utilidad de este modelo para definir la trayectoria de un cometa de captación eólica (Sandoval-Ruiz, 2024c) resulta de interés para sincronización del movimiento del captador (Sandoval-Ruiz, 2023b) con la dinámica propia del sistema,

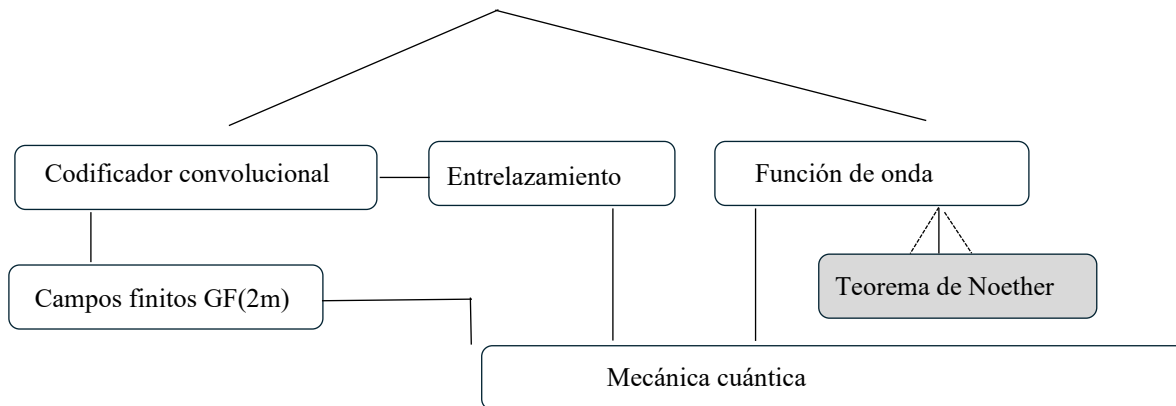
el efecto de interacción entre las variables y compensación simétrica.

Estudiando el principio de correspondencia de N. Bohr se establece una relación en los SSTES, bajo una interpretación de bloques discretos de energía, que se puede extrapolar y definir un modelo compatible, la recuperación de calor y energía residual en componentes espectrales del modelo, donde se relaciona el codificador Reed Solomon en su etapa de entrelazamiento, con una etapa de captación de energía y la interacción de componentes de energía (potencial, térmica), a través de la función de onda para

determinar las probabilidades de agrupación de bloques de energía sobre óvalos de Cassini $P(x, x+\Delta x) \approx |\psi(x, t)|^2 \Delta x$. Ahora, en lugar de plantear la interacción de dos elementos puntuales y generalizar para k elementos del arreglo, se sustituye por la función de onda $\psi(x, t)$, mediante el patrón de interferencia que describe el comportamiento característico del sistema físico, mediante el operador de convolución (Sandoval-Ruiz, 2024e). De la investigación desarrollada se establece un esquema de relación entre los postulados previos (Fig. 1), que soportan el enfoque teórico del sistema de almacenamiento de energías renovables, sobre modelos matemáticos.

Figura 1

Postulados en la construcción del concepto



Nota. Elaboración propia.

Se identificó una relación entre el álgebra de campos finitos y teoremas físicos, para la unificación de ecuaciones modeladoras (Sandoval-Ruiz, 2024f). El teorema de *Noether*, clave para entender la física de partículas elementales y la teoría cuántica de campos, contribuyó a la física teórica –donde establece que cada simetría diferenciable de un sistema físico tiene una ley de conservación asociada– y al álgebra abstracta –en la axiomatización y el desarrollo de la teoría algebraica de anillos, módulos, ideales, y grupos con operadores– (BBC, 2017).

El estudio del impacto ambiental de los sistemas de captación de energías renovables es un área de amplio interés para lograr establecer modelos bilaterales, enfocados tanto en el cálculo de potencia efectiva, como en la estimación de efectos sobre el entorno. En este punto, sistemas como el atractor de Lorenz, permiten modelar de este tipo y son complejos, donde pequeños cambios pueden tener grandes efectos, debido a la sensibilidad a cambios de pequeñas dimensiones. La investigación permite modelar el fenómeno de convención

y transporte de calor atmosférico, en presencia de arreglos dinámicos de captadores de energías renovables ERNC.

A partir de estos estudios, se interpreta la autoorganización simétrica de los sistemas, para la conservación de energía y el planteamiento de un término de compensación $Q(r,t)$, como un entrelazador probabilístico de función de onda. Este término resulta propicio para la reinterpretación de los campos potenciales de captación, conversión y almacenamiento de energías renovables por gradiente magnetocalórico y superficie elastocalórica, –un ejemplo son los yacimientos de arena y minerales– y el concepto de metasuperficie de intercambio de calor, como intercepción de dos sólidos (batería de arena y superficie de radiación de la fuente térmica de energía renovable), en la composición de un campo, que se corresponde con una curva –Viviani–, como modelo geométrico para definir la superficie equipotencial, donde se produce la interacción de la energía solar concentrada CSP con el sistema de almacenamiento térmico basados en partículas sólidas –cerámicas, arena, grava de cuarzo–, a través de un fluido de transferencia de calor HTF, como el aire (Wu et al., 2024). Así mismo, la composición del material permite controlar la conductividad térmica base de 0.30 W/mK (Chung & Chen, 2023), ampliando la eficiencia del sistema.

Los principios fluidodinámicos deben contemplar la relación de energía cinética y térmica, desde el enfoque de dualidad onda-partícula (Sandoval-Ruiz, 2024d), así se incorpora un término relacionado con saltos de niveles orbitales de energía, que se corresponden con la ley de inverso del cuadrado de la distancia, que permite unificar el comportamiento ondulatorio de cualquier sistema físico. Esta interpretación tiene entre sus ventajas la incorporación de parámetros de control, mediante coeficientes geométricos, por ejemplo, ángulo de curvatura, alineación. Mecánicos: configuración de matriz elastocalórica y configuración

electrónica del material, para la descripción del comportamiento de interacción y fenómenos ondulatorios de concentración (amplificación), filtrado (atenuación) y reorientación selectiva por longitud de onda de componentes espectrales de energía, para la optimización del sistema de captación de energías renovables.

En este orden de ideas, se plantea identificar similitud entre modelos fluidodinámicos (Sigalotti et al., 2024), gradientes de potencial –campos de energía– y mecánica cuántica, relacionando fuentes discretas de energía y distribuciones volumétricas de densidad de probabilidad $\rho(\vec{r},t)$, a partir de la función de onda de N partículas $\Psi^{(N)}$, en el caso que sea un determinante de Slater compuesto por N orbitales φ_k , la densidad esta dada por:

$$\rho(r) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |\varphi_k(r)|^2 \quad (4)$$

El estudio teórico de soporte del SSTES debe considerar la densidad de probabilidad en difusión de energía por ondas, que se relaciona con la ecuación de calor:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (5)$$

De manera análoga el modelo de un sistema de conversión térmica, basado en electrónica:

$$\frac{d^2 E(t)}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dE(t)}{dt} = T(t), \text{ considere } T(0) = 0 \quad (6)$$

A partir de la ec. 6 se obtiene la solución de la transformada de Laplace (inversa), para un escalón unitario de entrada de temperatura, siendo la dinámica del sistema de primer orden:

$$E(t) = k * (at - 1 + e^{-2t}), \quad \text{con } k = 1/a^2, \text{ siendo } a = 2$$

Lo interesante en este punto es relacionar la solución matemática en el dominio de Laplace con la solución física del operador de convolución en el dominio espaciotemporal en una interpretación directa del sistema físico. Se llega a una conclusión interesante, las operaciones en el dominio de Laplace corresponden a una simplificación para condiciones de frontera, de efecto desestimable, por la condición fractal cíclica, propia de la naturaleza del factor de corrección en la integral de la transformada inversa. Por tanto, para sistemas físicos interpretados con condiciones de frontera, resulta un término del operador de convolución sobre algebra de campos finitos,

con lo que se pueden deducir interacciones (Sandoval-Ruiz, 2025b).

En el estudio de compatibilidad del modelo, se define el SSTES sobre una superficie Gaussiana aplicando conceptos como la ley de Ampère-Maxwell y su equivalente en el campo de sistemas termodinámicos (Tabla 1), el flujo inductor (I) que atraviesa un captador con coeficiente de captación geométrico μ_0 obtiene una ganancia de captación, se debe considerar adicionalmente un componente relacionado con el gradiente del campo y el coeficiente de permeabilidad del campo proyectivo.

Tabla 1

Definición de variables equivalentes para modelos termodinámicos con HTF

Variables electromagnéticas	Equivalencia termodinámica
I corriente eléctrica (cinética)	Flujo eólico (cinética)
V tensión eléctrica (potencial)	Potencia eólica (potencial)
μ_0 permeabilidad magnética del vacío [H/m]	μ_m Permeabilidad de campo térmico por flujo HTF Coeficiente de transferencia de calor [W/m ² K]
Q carga eléctrica	Bloques discretos de energía eólica
E campo eléctrico (gradiente) $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	Gradiente de potencial eólico $\nabla \times F = -\frac{\partial T}{\partial t}$
Φ_m flujo magnético (cinética)	Líneas de flujo térmico
B campo magnético $\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$	Gradiente de potencial térmico $\nabla \times T = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon \frac{\partial F}{\partial t}$
ϵ_0 permitividad dieléctrica del vacío [F/m]	ϵ_m Emisividad del medio. Rango normalizado $0 < \epsilon_m < 1$ Coeficiente de conductividad térmica [W/mK]

* Un componente cinético de flujo eólico y un componente potencial elástico-térmico.

De este análisis de correspondencia se puede reinterpretar la propagación por energía cinética (flujo), propagación por energía potencial (gradiente del campo de interacción) y las variables termodinámicas relacionadas como inductor de flujo por diferencial de temperatura. Análisis electromagnético de sistemas termo-fluidodinámicos, para la

aplicación de las teorías electromagnéticas, sobre superficies Gaussianas y teorema de Noether (ec. 7) en gradiente compensación simétrica, con el propósito de optimizar el sistema de almacenamiento de ERNC.

$$\left. \frac{\partial u(r)}{\partial r} \right|_{r_0}^{r_e} + \left. \frac{\partial u(r)}{\partial r} \right|_{r_e}^{r_f} = 0 \quad (7)$$

De esta manera, se puede interpretar la interacción sobre una trayectoria orbital de bloques discretos de energía en un espacio de contención. En el sistema de almacenamiento, el intercambio de energía puede ser entendido como paquetes de una onda que se propaga en un medio (arena), así en el modelo cuantizado: el medio se comporta como una red de osciladores acoplados, que transmiten la energía al próximo elemento del arreglo. Entonces, estos fenómenos (Tabla 2) pueden darse con interacción de materia como la integral de la función de densidad –de encontrar una

partícula o una onda en una sección del espacio muestral del medio fluido ρ_a que atraviesa un espacio o superficie de interacción: $m=2\pi r\rho_a$, en función del radio de cobertura-. Del mismo modo el fenómeno puede darse en ausencia de interacción de materia, de forma tal que las ecuaciones donde aparece m , pueden ser sustituidas por una sumatoria cuantizada de la función de probabilidad de concentración de la onda. Estableciendo una correspondencia entre sistemas mecánicos clásicos, ondas y termodinámica.

Tabla 2

Diseño conceptual de las etapas del SSTES optimizado en modelo circular

	Método de transferencia de calor	Técnica: optimización de conductividad	Principio	Fenómeno
SSTES Híbrido (etapas)	Generación de calor y recuperador de calor regenerativo (R.C.R) Por contacto sin transferencia de materia $w \cdot x(t)$ Transmisión de calor por recirculación $w \cdot x(t-1)$ de aire HTF medio portador del calor	Serpentin del intercambiador de calor Q , flujo de calor desde la fuente externa U , es el coeficiente de absorción de calor A , área del intercambiador de calor ΔT , es la diferencia de temperatura W , trabajo para mover el fluido	Efecto Joule $P=R \cdot I^2$	Conducción $Q=U \cdot A / \Delta T$ Eficiencia: $\eta=Q/W$
		Trayectorias cíclicas proyectivas SSTES	Fluido HTF	Convección
		Ley de conducción de calor de Fourier Siendo k la constante de conducción térmica del material, A el área y dT/dx corresponde al gradiente de temperatura. Ley de enfriamiento de Newton	$\nabla x FH = \frac{dQ}{dt} = -A \cdot k \frac{T_2 - T_1}{dx} = - \frac{\partial T}{\partial t}$ $H = A \cdot h \cdot (T_2 - T_1)$	

SSTES Híbrido (etapas)	En correspondencia con la expresión de fuerza elástica: $F_e = K(x_1 - x_2)$, que refleja la energía potencial, dada por la interacción de estados metaestables de energía almacenada, que desplaza la variable de su punto de equilibrio, estimada como el producto de convolución del gradiente del potencial térmico: $\nabla T_1 \otimes q_0$			
	CSP por óptica y campo ECM por interacción de ondas ∇T	Concentración solar en focos dinámicos	Ondas	Radiación
		Estudio de la propagación de calor en el volumen de geometría esférica del TES	$E = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \cdot r$	$r < R$
		Pérdidas por radiación exterior al TES	$E = \frac{\rho R^3}{3\epsilon_0 r^2}$	$r < R$
	Análisis de rangos de la ecuación: $\frac{\partial^2 u(t)}{\partial x^2} + \omega^2 u(t) = 0$			
	Ley del inverso cuadrado de la distancia (primer término)		Resonancia del sistema (segundo término)	
	$r \ll R$ $R < r < nR$	Campo interno Campo cercano	$\omega \rightarrow 0$ $\omega \rightarrow \omega_0$	Medio estático Fluidodinámico
	$r \rightarrow \infty$	Campo lejano	$\omega \rightarrow \infty$	Resonancia por onda reflejada
	Relaciones geométrica	Factor de atenuación de radiación	3,12,27	r^2
		Factor de realimentación óvalo Φ	$\overline{F_1 P} / \overline{F_2 P}$	$\sqrt{2\Phi\epsilon_m}$

Reutilización de etapas termoeléctricas, CSP energía solar concentración, eólica recirculación de flujo.

La interacción térmica es descrita por la *Ley de Wien*, *Ley de Planck* y *Ley de Stefan* para el cálculo de la potencia de radiación: $H = \epsilon \sigma A (T_2^4 - T_1^4)$, siendo la constante de Stefan-Boltzman y ϵ la constante de emisividad del material –en el caso de un sumidero de calor como el SSTES el valor tiende a uno–.

En el fenómeno de radiación se estudia la ley del inverso del cuadrado de la distancia (Conesa, 2013). Se puede deducir la ley inversa del cuadrado de la distancia para ondas y campos centrales:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (8)$$

Estas deducciones para física ondulatoria y teoría clásica permiten una inferencia válida de la ley para sistemas fluidodinámicos, así como para sistemas termodinámicos, si se considera la analogía del gradiente de temperatura, con la aproximación para grandes distancias del elemento emisor de calor de la forma: $\nabla^2 T(r) = 0$, con lo que se logra una aproximación para cualquier sistema termodinámico.

Otro aspecto de análisis es el régimen o patrón de flujo, las fuerzas e interacción del fluido con las superficies de contacto para el modelo de captador de energía híbrido: flujo interno a la superficie de las paredes del SSTES, como son las líneas de transporte de calor industrial, y flujo

externo, de contacto con el perfil aerodinámico del intercambiador de calor, potencial de campo resonante e inducción entre elementos del arreglo.

De lo que se concluye que la eficiencia del sistema de almacenamiento puede ser modelada sobre estos términos físicos, fijando un porcentaje de realimentación del 61,8 %, entre la proporción del foco y los puntos de la superficie reflectiva. Todo sistema presenta la transmisión de energía mediante –al menos– tres fenómenos bien definidos, según las características del medio y onda incidente. Esto debe estar contemplado, a fin de no desestimar componentes espectrales de energía que puedan ser recuperadas.

A. Osciladores acoplados y correspondencia

El muelle como un arreglo de filtros mecánicos –con una constante k equivalente de elasticidad– es capaz de reciclar energía, por recirculación, mediante acoplamiento entre los osciladores resonantes que interactúan entre sí se convierte en el elemento de amortiguación, equivalente al condensador, donde se almacena energía potencial y se redirecciona constructivamente (Sandoval-Ruiz, 2025b).

B. Probabilidades, ordenamiento cuántico y entropía

Un modelo probabilístico simétrico, significa que se establece una relación de entropía –todo evoluciona a su configuración más probable–, a través de términos espejo en la ecuación. Esto con el objetivo de definir estados reversibles, es decir, que se pueda volver al estado original luego de un intercambio de energía. Un sistema físico interpretado como un sistema dual de ondas y partículas, puede ser modelado mediante una ecuación donde el operador del sistema

procese cada variable física y en su configuración como onda, donde las variables físicas sean interpretadas a su vez como operadores sobre los coeficientes de caracterización del sistema (Sandoval-Ruiz, 2025b). En este sentido, se trata de una operación bilateral, entre dos polinomios que definen el sistema estructural discretizado y ondulatorio.

METODOLOGÍA

El estudio de factibilidad comprende un levantamiento de potencial energético (Explorador Solar, 2024) y simulación en VHDL de realimentación de componente de energía residual: alineación de las estructuras con las trayectorias de traslación y rotación para seguimiento solar, el análisis de interacción de ondas, comportamiento termodinámico del sistema de almacenamiento de energías renovables, la configuración geométrica para compensación de esfuerzos estructurales y una interpretación del modelo desde la comprensión de física clásica y memoria estructural de los estados de la materia, con el objetivo de considerar los factores que inciden en la eficiencia del ESS. La construcción del modelo teórico constó de realizar la asignación de postulados iniciales, a cada uno de los términos de la ecuación. Pasos en la interpretación teórica-empírica para la generación del modelo.

1. Se interpretaron los operadores duales del sistema (difracción), sobre un circuito LFSR desarrollado sobre la base de un modelo matemático, con coeficiente de realimentación para reciclar componentes de energía residual, a fin de mitigar los efectos sobre el ambiente.
2. Se identificó un patrón entre el modelo y las variables físicas de energía inteligente, que coincide con la estructura LFSR –como circuito de síntesis–, donde la variable física de energía se convierte en un operador de convolución sobre la red del patrón de interferencia.
3. Se planteó el cambio de variable por

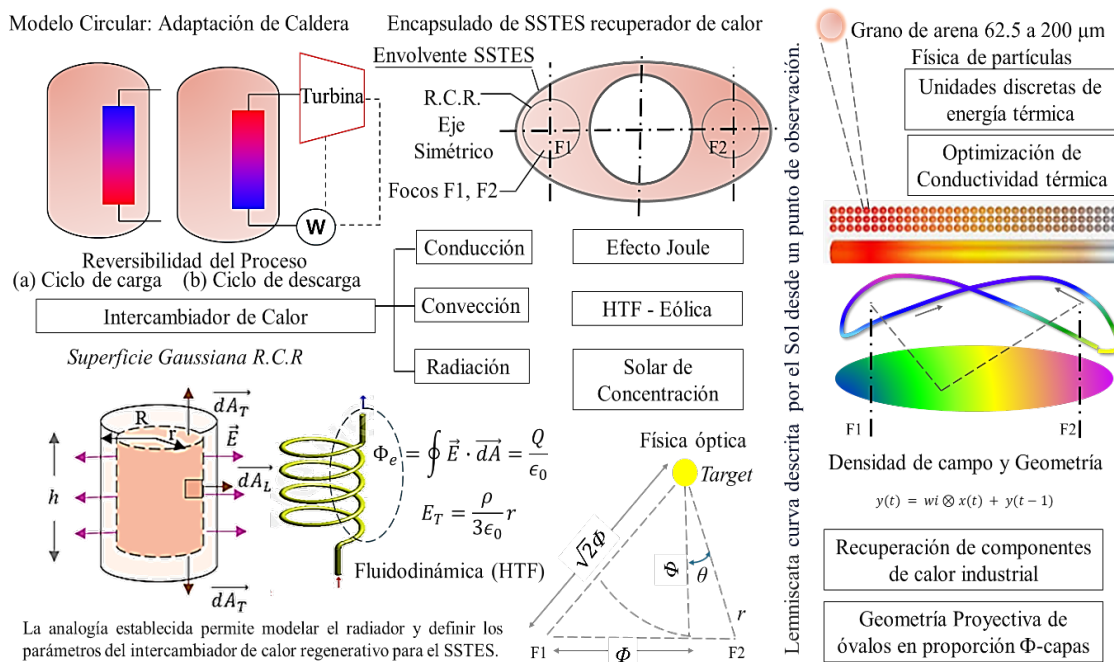
compatibilidad, donde la direccionalidad del circuito establece una simplificación en el modelo, sobre la generalización del modelo para su ajuste mediante parámetros y enfoques configurables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se estableció el criterio de sistemas de energía inteligente, con ciclos donde la energía residual es reciclable, se reconvierte en energía útil, sin causar daño al entorno, es responsable y autoorganizada en un mecanismo de compensación fractal de efectos. Para su validación se propone crear una envolvente SSTES (Fig. 2), para la anulación de campos y su efecto sobre las condiciones circundantes.

Figura 2

Formulación Conceptual del SSTES.



Nota. Elaboración propia.

A. Principios y circuitos modeladores

Se reconoce la compatibilidad conceptual de fuerza de acople entre elementos y efecto que se incorpora al modelo por Polinomios de LFSR-Galois, sistemas dinámicos y sincronización en orbitas periódicas, expresada como:

$$e^{at} = I_0 + at + \frac{1}{2!}a^2t^2 + \dots + \frac{1}{n!}a^nt^n \quad (9)$$

Siendo el radio (a) de la curva cíclica del sistema dinámico que atenúa la amplitud del patrón proyectado. Es importante mencionar el desplazamiento de la condición inicial ($()$) del SSTES como punto de equilibrio –sin aplicar energía externa–. Los sistemas de energías renovables tienen especial interés en definir un punto de equilibrio óptimo, es decir, que los efectos de la intervención del elemento captador en el sistema físico natural tengan el

menor impacto ambiental. Por lo que se puede interpretar el *bias* como la condición inicial de equilibrio, dada por la interacción con el entorno en forma de energía proyectada por el captador sobre el arreglo y sobre sí mismo por los elementos del sistema.

Pocos estudios presentan la restauración del flujo de salida o compensación de efectos del sistema sobre el entorno, siendo un objetivo fundamental en la enseñanza de la física con responsabilidad ambiental.

Al momento de abordar de forma ampliada estos sistemas se deben considerar el sistema físico compuesto de estados y microestados, dando lugar al análisis de fluidodinámica cuántica. En tal sentido se puede establecer una analogía entre el operador escalera por su relación de conmutación con el operador matemático LFSR, estableciendo en la entrada del multiplexor de realimentación, un sistema de compensación por ortogonalidad, para la potencialización y/o atenuación (cancelación) de armónicos esféricos del patrón de proyección (mediante el análisis de las curvas polares 3D de potencial), que describe la densidad del espectro de energía respecto al elemento i del arreglo captador, interpretando a nivel de microestados a estos elementos como osciladores armónicos acoplados.

Postulado principal. A partir de la analogía con teoría de la información, se plantea que cualquier sistema físico puede ser modelado a través de un LFSR, aplicando los multiplexores del intercambiador de energía y la arquitectura del registro desplazamiento, como unidades discretas de almacenamiento, en correspondencia con la memoria estructural del código.

Para el diseño del sistema se seleccionó una estructura reconfigurable como unidad de análisis experimental, se analiza el comportamiento de tejidos dinámicos, como una superficie inteligente reconfigurables (RIS), que permiten implementar geometría con

propiedades auxéticas, al ser sometidos a una tensión de tracción se amalgaman por tener un número de Poisson negativo, se plantean un conjunto de experimentos teóricos para validar su aplicabilidad en sistemas físicos.

Así se plantean configuraciones para el SSTES, mediante una superficie elastomérica, para captar vibraciones y ondas, creando un patrón con partículas y ondas reflejadas, sobre la superficie reflectante. Un arreglo geométrico como un tejido aislante, con cámaras internas que conforman muelles de aire, para establecer un coeficiente elástico que determina la relación de elongación axial y radial. De tal manera que se define un número de Poisson (simétrico), acá se plantea la hipótesis de que: las estructuras auxéticas son sistemas biestables, al aplicar una fuerza de tracción se alcanza un nuevo punto de equilibrio. Las estructuras auxéticas (Acuna et al., 2022) tienen una mayor capacidad de absorción de energía, debido a la distribución de celdas geométricas con menor deformación, donde la tenseguridad de las aristas (deslizantes o rotacionales), se comportan como micromuelles de almacenamiento de energía potencial elástica. Por otra parte, el diseño del acoplamiento de accionamiento por cometas eólicas, planteado por acoplar un elemento reflectante a una cuerda elástica y girar creando una fuerza centrífuga se describe una trayectoria, cualquier onda que entre en resonancia con el coeficiente de la matriz elastomérica de la superficie, generará un patrón de oscilación por la onda realimentada, relacionado con el vórtice de giro que induce una aceleración del flujo en el interior de la trayectoria, debido a la velocidad que condiciona el desprendimiento de la capa límite.

Los planteamientos permiten concluir que los sistemas físicos cuentan con una memoria estructural de la forma $x(t-1)$, lo cual incide en la respuesta del sistema, interpretado como un registro de energía. Se puede afirmar que todo sistema físico realiza el almacenamiento de un porcentaje de energía, sea energía

cinética en forma de inercia o la conversión de energía cinética a energía potencial elástica, gravitacional, etc., para almacenar energía transitoria, definiendo estados intermedios de estabilidad. Siempre que se realimente a la entrada la energía almacenada se obtiene un sistema biestable.

B. Recuperación de calor regenerativo de fuentes geotérmicas e industriales

Un sistema de captación de energía geotérmica sin intervención de los espacios y recuperación de calor residual oceánica OTEC o industrial, mediante intercambiadores de calor regenerativo, basados en circuitos cerrados de realimentación LFSR con énfasis en el término de interacción de energía entre el sistema y el medio, siendo el modelo matemático fundamental para establecer el comportamiento dinámico de recuperación de energía por resonancia.

La fórmula generalizada, con el último término de entrelazamiento de energía reflejada por el medio, se interpreta por correspondencia con la ecuación de calor: la variable física de entrada pasa a ser un operador de convolución con un registro de memoria de los estados pasados, interpretados como la memoria de la variable: $x(t) = c \cdot x(t) + x(t-1)$. La variable física de salida se expresa por la operación de convolución, con la realimentación registrada de la variable de salida, interpretado como la energía potencial almacenada por el sistema: $y(t) = w \otimes x(t) + y(t-1)$.

El estudio permitió reconocer un término de interacción del sistema con elementos mediante el comportamiento ondulatorio, a partir de la oscilación respecto al *punto de equilibrio o estabilidad dinámica*. En este término se consideran las condiciones de borde, la interferencia y los fenómenos relacionados con transmisión de energía sin intercambio de materia, en la interpretación de la dualidad

onda-partícula. Por lo que se introducen dos conceptos: la superficie Gaussiana para condiciones de contorno del sistema y la ecuación de calor, expresada como un caso particular de la ecuación de onda donde se relaciona el patrón de radiación de calor con el perfil de desplazamiento con la velocidad de cambio (dinámica) de la onda:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (10)$$

Ahora bien, la relación de distancia r , será concatenada por la interacción fractal de las variables que presentan este comportamiento.

$$\nabla T = K_T \sum_{i=0}^{\infty} \frac{T_1 \cdot T_2}{r_i^2} \quad (11)$$

Siendo K_T una constante de la conversión de temperatura, T_i la potencia del transmisor de calor en la posición i , r_i la distancia del transmisor respecto a la referencia. Se unifica la ley del inverso del cuadrado de la distancia para el estudio discreto, con fuentes puntuales y la deducción de campo central, sobre polinomios probabilísticos:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n.$$

Se estableció un término que relacione la intensidad de un efecto sobre cualquier punto, tanto para fuentes puntuales como para un gradiente de fuentes distribuidas y propagación de ondas, mecánicas (acústica, fluidodinámica), electromagnéticas (luz), etc. Del polinomio se obtiene la generalización para el universo de casos estudiados.

$$w \otimes x = \sum_{l=1}^m g_l \cdot x^l(t) + \frac{1}{\phi_x} \cdot x^l(t-1) + \frac{1}{\phi_y} \cdot y(t-1) \pm \sum_{j=1}^n \frac{(-1)^j}{r(j)!} \cdot \frac{\partial^2 x^j(r,t)}{\partial r, t} \quad (12)$$

De todo lo anterior, se construye la teoría de osciladores de unidades de energía acoplados mediante enlaces termodinámicos, estos bloques de energía oscilan a una frecuencia

característica que se corresponde con sus funciones de ondas, las vibraciones del comportamiento de onda-partícula respectiva a la energía cinética en la unidad básica de interacción de la materia y las estructuras de memoria se corresponde con la energía potencial del sistema, donde se interpreta la teoría de composición fractal.

El flujo de calor se distribuye en una red de osciladores acoplados como una onda mecánica con parámetros de propagación de energía, en su forma discreta se reinterpreta como la operación de convolución entre los osciladores de la onda mecánica y el mecanismo captador. Se comporta como un proceso determinístico en un rango y probabilístico, considerando aspectos de entrelazamiento, coherencia y termodinámica cuántica del campo distribuido de energía.

Simetría Radial de Compensación Espectral SRCE, se plantea un término para la anulación de efectos del sistema sobre el campo cercano (entorno), a través de la sumatoria de componentes espectrales de compensación, por principios geométricos de simetría radial, respecto al captador, así como simetría axial, respecto al eje del elemento.

El optimizador de óvalo de arena es un resultado central sobre física teórica, donde se relaciona: la ley del inverso del cuadrado de la distancia para fuentes puntuales y campos centrales, y la ley de conservación de la energía, considerando al teorema de Noether que enuncia que *A cada simetría (continua) le corresponde una ley de conservación y viceversa*. presentando las siguientes inferencias:

i. Cualquier sistema puede ser descrito como una composición de osciladores acoplados, definiendo la interacción entre estos, de manera discreta, por la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Luego, para una red se plantea como un campo distribuido, donde el gradiente es una función de densidad

de la probabilidad en relación con el radio entre la matriz de elementos.

- ii. Un sistema puede ser caracterizado como una red de difracción obteniendo a la salida un patrón resultante de la convolución entre la variable de entrada y el polinomio generatriz del arreglo del sistema físico.
- iii. La fluidodinámica extendida puede ser caracterizada por un comportamiento dual onda-partícula, definiendo el flujo la variación de bloques discretos de energía por unidad de tiempo, que coincide con el flujo de electrones en una corriente eléctrica y con un flujo de fotones en un haz de luz.
- iv. Se puede definir una compensación simétrica entre la formación de vórtices en fluidodinámica – geometría proyectiva–, que permite anular el efecto estela aguas debajo de un arreglo de captadores, con lo que se puede reestablecer el equilibrio dinámico.
- v. Se consideran los estados de meta estabilidad, para la definición del componente probabilístico de comportamiento de un sistema físico.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las ecuaciones desarrolladas sirven de soporte para la propuesta de diseño del sistema de almacenamiento de energías renovables (Fig. 3), cumpliendo con los criterios de sostenibilidad:

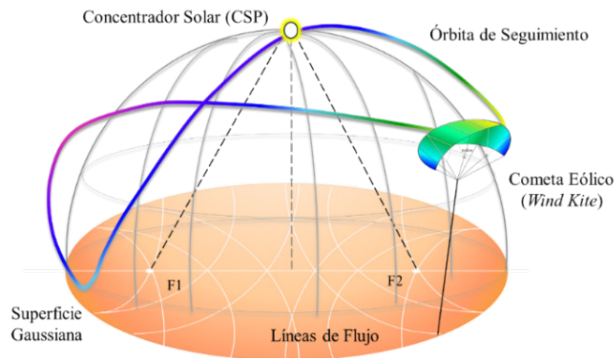
- Reutilización de infraestructura del sistema ESS para minimizar impacto ambiental, aplicando conceptos de configuración del medio, por campo electromagnético, mediante una superficie Gaussiana definida por software sobre el modelo geométrico, con líneas de flujo cíclicas descritas

por elementos móviles *wind kite*. La energía es concentrada en los focos de la estructura y anulada hacia la periferia para crear una superficie de aislamiento, por reflexión de las líneas de flujo y atenuación por efecto

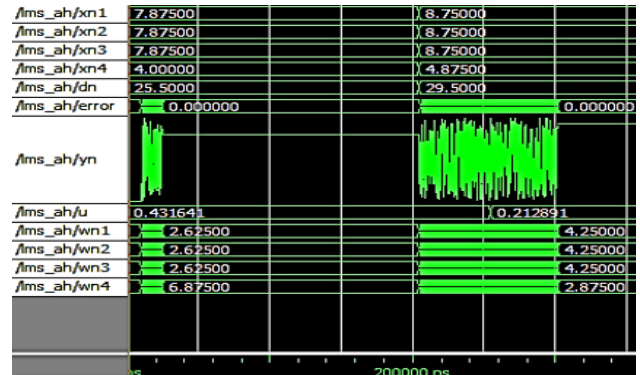
de la realimentación del foco de compensación simétrica, para el caso de la recuperación de calor se aplica el mismo principio, considerando la reversibilidad teórica.

Figura 3

Validación numérica del sistema SSTES



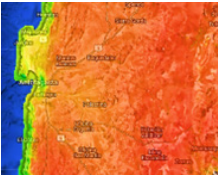
En la realimentación $xn4$, se simuló $wn4$ como el factor geométrico-térmico $\sqrt{2\Phi\epsilon_0}$, para energía térmica reflejada, en función de los coeficientes de transmisión de calor. Para estimar un presupuesto de potencia se deben considerar factores críticos como potencial térmico solar del área de estudio, por otra parte,



se han adaptado consideraciones geométricas para el diseño del SSTES (Tabla 3), con el objetivo de optimizar las propiedades refractarias del sistema y la eficiencia térmica-óptica, lo que se refleja en los coeficientes de ganancia directa del modelo, ganancia –peso sináptico– del término de realimentación y factor de atenuación.

Tabla 3

Resultados de caracterización del Solar-SSTES

Características del arreglo TES		Eficiencia de almacenamiento		Potencialidades
Volumen de almacenamiento	800 m3	Factor de pérdidas	3,8W/m2K	 S/D 0 3.0 4.5 6.0 7.5 kWh/m2/día
Superficie de los colectores	2,8 m2	Opt. eficiencia óptica	38,2 %	
Ángulo de inclinación	30°	pérdidas por sombra	-	
Adaptación al sistema SSTES considerando propiedades ópticas y geométricas				
Ubicación del serpentín	F1, F2	Recuperación de calor		
Tipo de confinamiento	Medio	Realimentación	61,81 %	
Transmisión de calor	λ_1, λ_2	Proyectiva	-	
Aislamiento térmico	refractario	Fractalización	1,2,3,5,8,13,21	

Fuente: autor, 2025 con datos reportados de la herramienta de análisis térmico solar (Explorador Solar, 2024)

En (Pinto & Beausoleil, 2023) se validó un modelo 3D en diferencias finitas de transferencia de calor por conducción (únicamente) dentro y alrededor del SSTES, donde los datos experimentales muestran que el SSTES pierde calor al doble de la velocidad esperada. El modelo propuesto LFSR (Tabla 3) considera coeficientes de conductividad térmica y permeabilidad (por convección del aire), aislación refractaria y parámetros geométricos, para realimentación minimizando el factor de atenuación y pérdidas térmicas, todo esto para optimizar la velocidad de carga y descarga de la batería de arena.

Entre los resultados del modelo se alcanza una optimización del 38,2 %, incrementando la eficiencia total del sistema térmico, minimizando pérdidas de almacenamiento del orden de 3,62 W/m²K y maximizando la recirculación energética en 61,8 %.

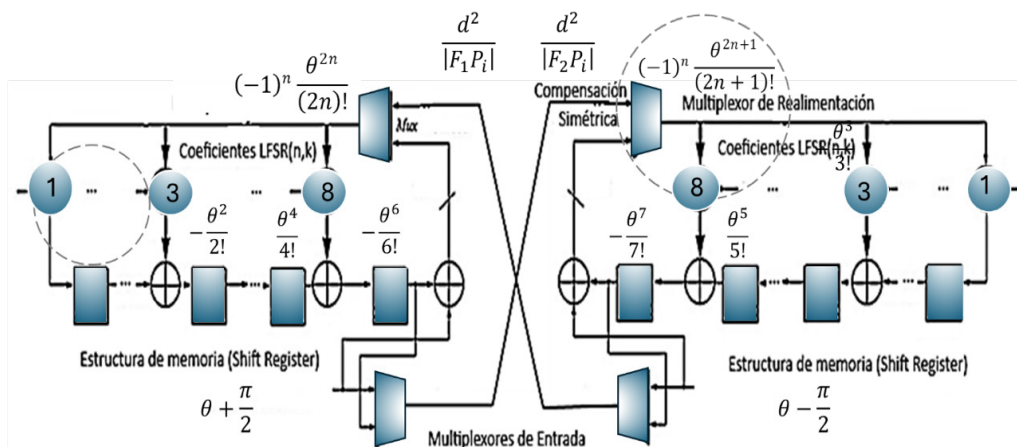
- Almacenamiento directo de la fuente de energía renovable, a través de tecnología CSP, se planteó el diseño de un punto de concentración solar sobre el campo de almacenamiento, redirigiendo el calor a los focos del sistema para su radiación en la batería de arena. Los multiplexores de

entrada se corresponden con los focos del óvalo de la batería de arena, en estos puntos se recibe la energía del punto de concentración solar y se realimenta de forma cíclica.

- Eficiencia energética del sistema de almacenamiento por configuración geométrica del óvalo, modelado sobre circuitos simétricos LFSR (Fig 4): (i) durante el tiempo de almacenamiento, aplicando principios físicos de realimentación de energía en ciclos dinámicos. De esta forma, se minimizan las pérdidas por disipación de calor al ambiente y maximizar la conservación de energía en el ESS, definiendo una superficie reflectante hacia los focos del circuito, para recapturar la energía creando un patrón de resonancia por circuitos de auto realimentación cíclica. (ii) durante el ciclo de recuperación de energía térmica, estableciendo un modelo compatible entre procesos termodinámicos, flujo dinámicos y electromagnéticos, para optimizar un proceso reversible de recuperación de energía térmica almacenada.

Figura 4

Equivalente circuital del SSTES sobre LFSRs

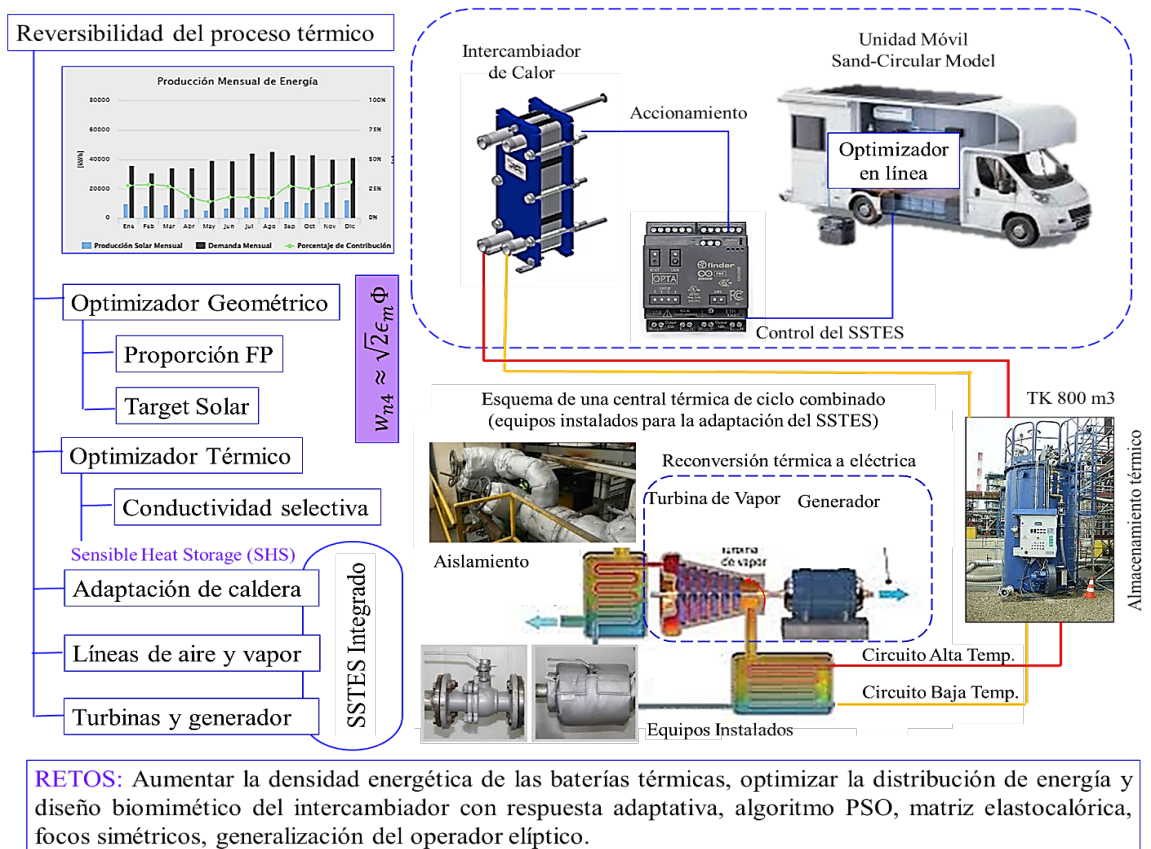


Nota. Autor, 2025

- Establecido el modelo matemático y validado, a través de la simulación sobre hardware VHDL, se define una propuesta de implementación piloto, aplicando modelo circular. Se plantea la utilización de plantas termoeléctricas (Fig. 5), para la reutilización de activos, equipos compatibles y la evaluación de factibilidad técnica y económica.

Figura 5

Factibilidad del SSTES modelo circular



Nota. Autor, 2025

APORTES DE LA INVESTIGACIÓN

1. Se consideró en el presupuesto de potencia del sistema captador (ver Tabla 2), para validación de factibilidad técnica-económica (reporte: Explorado Solar, 2024).
2. Se diseñó un elemento móvil (cometa de

concentración) para crear un vórtice de alineación de flujo de máxima eficiencia (con un sentido de giro específico) y cometa de regeneración, en la salida para crear un vórtice espejo (en sentido contrario, aplicando geometría proyectiva para impulsión por flujo reflejado) de anulación

de los efectos sobre el patrón de flujo, para restablecer las condiciones de equilibrio.

3. Se analizó la trayectoria del lente de concentración-captador, sobre un patrón proyectivo.
4. Se consideró el efecto de los términos adicionales de recuperación de energía térmica, para estimar un aporte del modelo, sobre la base comparativa de C_p , del modelo flujo dinámico.
5. Se propuso un término probabilístico de compensación, considerando los casos de estudio.

CONCLUSIONES

Gracias al modelo desarrollado se logró establecer un optimizador de SSTES, diseñado sobre etapas híbridas de captación de energía térmica residual y almacenamiento regenerativo, para soluciones sostenibles, por compensación dimensional de variables fractales y patrones simétricos. Donde se consideró el comportamiento de circuito resonante LFSR, por la compatibilidad estructural y equivalencias para el almacenamiento físico de energía, que se puede interpretar como un campo fractal de superposición de n planos de radio extendido.

De esta manera, se desarrolló la propuesta de cometas de concentración solar-eólica, aplicando óptica en CSP, geometría proyectiva y fluidodinámica, para el diseño de mecanismos regenerativos de almacenamiento térmico – baterías de arena con etapa de recaptación de energía de etapas termoeléctricas de plantas industriales–, lo que permitió afirmar que el SSTES simétrico es totalmente caracterizado como un sistema con al menos dos estados de equilibrio multiplexados, que permite la implementación de la red dinámica y operadores de variables, sobre el operador matemático LFSR.

Innovando en la reutilización de equipos instalados como calderas compatibles con la estructura de las baterías de arena de alto desempeño, mediante encapsulado de etapas térmicas y la recirculación de ondas en un ESS para mejorar el rendimiento del sistema, todo esto con criterios de responsabilidad ambiental, así mismo en el estudio teórico del término de interacción para recuperación de calor, mediante la tecnología de óvalos de arena SSTES, con lo que se recupera un 61.8 % de las pérdidas térmicas y la memoria del sistema físico, que define las condiciones de borde en la respuesta del sistema, modelados como bloques concurrentes y variables realimentadas, a través de la reflexión de onda mecánica.

Otro aspecto relevante es la observación de forma descriptiva, dentro de una arquitectura de base LFSR, lo que permitió la simulación del filtro adaptativo. En la validación numérica se simuló la realimentación con el cálculo del coeficiente de recirculación de calor óptimo, sobre un modelo en VHDL (lenguaje descriptor de hardware), donde se logró una optimización significativa sobre la base de un modelo teórico extendido, aportando 38.2 % de optimización al circuito térmico y un estudio de potencial para sistemas térmico-solar industriales, con reporte de factibilidad técnica-económica.

Se identificó la similitud por correspondencia entre los términos con la expresión del LFSR concatenado, lo que permite concluir la aplicabilidad de la teoría de grupos en campos finitos de Galois con los modelos físicos de óvalos simétricos SSTES. Dado que los sistemas físicos se presentan ante el reto de un modelo compatible para variables de estados y entrelazamiento resonante, en el comportamiento de ondas, con un aporte en la generalización teórica, a través de un patrón de geometría simétrica, como elemento de compensación, cuyo valor fundamental radica en la oportunidad de definir un equilibrio dinámico en la conservación de la energía de los sistemas.

REFERENCIAS

- Abderezzak, B., & Randi, S. (2020). Experimental investigation of waste heat recovery potential from car radiator with thermoelectric generator. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100686.
- Acuna, D., Gutiérrez, F., Silva, R., Palza, H., Nunez, A. S., & Düring, G. (2022). A three-step recipe for designing auxetic materials on demand. *Communications Physics*, 5(1), 113. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-00876-5>
- Bermúdez, D., Suárez, G., Rodríguez, C., y Carrillo, A. (2023). Desarrollo de una batería de arena para almacenamiento de energía renovable en zonas rurales. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2023*. <https://doi.org/10.26507/paper.3027>
- Chung, K. M., & Chen, R. (2023). Black coating of quartz sand towards low-cost solar-absorbing and thermal energy storage material for concentrating solar power. *Solar Energy*, 249, 98–106.
- Conesa, J. (2013). *Mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección, radiación)*. Experimentación en ingeniería. Universidad de Alicante.
- Ecoinventos. (2022). *La primera batería de arena del mundo comienza a almacenar energía en Finlandia*. <https://ecoinventos.com/primera-bateria-de-arena-del-mundo-finlandia/>
- Explorador Solar. (2024). *Herramienta de estimación de potencial térmico solar y retorno de inversión a escala industrial*. <https://solar.minenergia.cl/termico>
- Grabusts, P., & Uzhga-Rebrov, O. (2024). Applications of the symmetrical structures of Cassini ovals. *Symmetry*, 16(3), 334. <https://doi.org/10.3390/sym16030334>
- Jalili, B., Sadighi, S., Jalili, P., & Ganji, D. D. (2022). Numerical analysis of MHD nanofluid flow and heat transfer in a circular porous medium containing a Cassini oval under the influence of the Lorentz and buoyancy forces. *Heat Transfer*, 51(7), 6122–6138. <https://doi.org/10.1002/hlj.22582>
- Kang, M., Kim, S., Qian, Y., Neves, P. M., Ye, L., Jung, J., ... Comin, R. (2024). Measurements of the quantum geometric tensor in solids. *Nature Physics*, 1–8.
- Odoi-Yorke, F., Opoku, R., Davis, F., & Obeng, G. Y. (2024). Employing bibliometric analysis to identify the trends, evolution, and future research directions of sand-based thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 94, 112343.
- Pinto, R., & Beausoleil-Morrison, I. (2023). Experimental validation of a numerical model for a sand-based seasonal thermal energy storage. *Journal of Building Performance Simulation*, 16(6), 644–659. <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2191338>
- Pinto, R. I. (2023). *Modelling and experimental evaluation of a sand-based seasonal storage system* [Doctoral dissertation, Carleton University].
- Poulose, T., Kumar, S., & Torell, G. (2022). Power storage using sand and engineered materials as an alternative for existing energy storage technologies. *Journal of Energy Storage*, 51, 104381.
- Sandoval-Ruiz, C. (2025a). Modelado de sistemas físicos aplicando código de entrelazado convolucional. *RBEF*, 47.
- Sandoval-Ruiz, C. (2025b). Modelado de sistemas de energía renovables sobre códigos de convolución mediante patrones de interferencia. *UCT*, 29(126).
- Sandoval-Ruiz, C. (2024a). Ω -vórtices y acoplamientos resonantes en modelo de patrón de flujo toroidal regenerativo mediante física moderna y ondas. *CALIBRE-Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13926923>

- Sandoval-Ruiz, C. (2024b). ZPF para arreglo de proyección de onda: ϕ -LFSR en modelado $F_p[x]/f(x)$ de sistemas de energías renovables. *Revista de la Universidad del Zulia*, 15(42), 281–305. <https://doi.org/10.46925/rdluz.42.16>
- Sandoval-Ruiz, C. (2024c). e-KiteLab: Investigación en física aplicada para mantenimiento y optimización de sistemas de energías renovables. *Revista Investigación & Desarrollo*, 24(1), 95–105. <https://doi.org/10.23881/idupbo.024.1-8i>
- Sandoval-Ruiz, C. (2024d). xyz modelo de optimización de arreglos de cometas captadoras de energías sostenibles. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 46(2), e244701. <https://doi.org/10.22209/rt.v47a01>
- Sandoval-Ruiz, C. (2024e). Operador matemático para caracterización y optimización de etapas de sistemas físicos. *Revista Colegiada de Ciencia*, 5(2), 88–98. <https://doi.org/10.48204/j.colegiada.v5n2.a5029>
- Sandoval-Ruiz, C. (2024f). Unificación de la ecuación de modelado de sistemas de energías renovables. *Ciencia y Tecnología*, 24, 3–16. <https://doi.org/10.18682/cyt.vi24.10675>
- Sandoval-Ruiz, C. (2023a). Biomimética aplicada a modelos de sistemas de energías renovables reconfigurables basados en estructuras autosimilares. *Revista Técnica de Ingeniería LUZ*, 46, e234602. <https://doi.org/10.22209/rt.v46a02>
- Sandoval-Ruiz, C. (2023b). YPR-alignment angles for wind energy harvesting kite arrangement: α , β , γ -coefficients for control and maintenance of regenerative flow patterns. *UCSA*, 10(3), 3–15. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2023.010.03.003>
- Sandoval-Ruiz, C. (2021). Fractal mathematical over extended finite fields $F_p[x]/(f(x))$. *Proyecciones*, 40(3), 731–742. <https://doi.org/10.22199/issn.0717-6279-4322>
- Sigalotti, L. D. G., Rendón, O., & Luévano, J.-R. (2024). Real-space diffusion theory from quantum mechanics using analytic continuation. *Heliyon*, 10(19), e38867. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38867>
- Vyas, A., & Kushwah, G. (2023). Sand battery: An innovative solution for renewable energy storage (A review). In *IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference* (pp. 1–5).
- World Energy Council. (2010). *Eficiencia energética: Una receta para el éxito*. <https://www.worldenergy.org>
- Wu, C., Zhao, Y., Li, W., Fan, J., Xu, H., Yuan, D., & Ling, Z. (2024). Layered operation optimization methods for concentrated solar power (CSP) technology and multi-energy flow coupling systems. *Energies*, 17(24), 6297.