

Diseño, construcción y puesta en marcha de un regenerador de energía para el desarrollo y validación de estrategias de modelado matemático

escrita por

Omar Arturo Castillo-Méndez

Presentada al Departamento de ingeniería electrónica
como requisito fundamental para obtener el grado de

DOCTORADO EN CIENCIAS

en el

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Septiembre 2026

© 2026 Omar Arturo Castillo-Méndez. Este trabajo esta bajo la licencia de
[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Escrita por:	Omar Arturo Castillo-Méndez Departamento de ingeniería electrónica Junio, 2026
Dirigida por:	Victor Manuel Alvarado Martinez Doctor en Ciencias, Director de Tesis
Dirigida por:	Ma. Guadalupe López López Doctor en Ciencias, Director de Tesis
Revisada por:	José Francisco Gómez Aguilar Doctor en Física Cenidet
Revisada por:	Ricardo Fabricio Escobar Jiménez Doctor en Ciencias Cenidet
Revisada por:	Jarniel García Morales Doctor en Ciencias Cenidet

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR DE TESIS

Victor Manuel Alvarado Martínez
Doctor en Ciencias
Departamento de Ingeniería Electrónica

CODIRECTORA DE TESIS

Ma. Guadalupe López López
Doctora en Ciencias
Departamento de Ingeniería Electrónica

REVISORES DE TESIS

José Francisco Gómez Aguilar
Doctor en Física
Departamento de Ingeniería Electrónica

Ricardo Fabricio Escobar Jiménez
Doctor en Ciencias
Departamento de Ingeniería Electrónica

Jarniel García Morales
Doctor en Ciencias
Departamento de Ingeniería Electrónica

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Objetivos	8
1.1.1. Objetivo general	8
1.1.2. Objetivos específicos	8
2. Marco conceptual	9
2.0.1. Almacenamiento de energía térmica	9
3. Dimensionamiento	11
<i>Referencias</i>	13

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad el uso de combustibles fósiles ha sido primordial para el desarrollo de la sociedad. En México, según datos de la Secretaria de Energía, el consumo total de energía nacional de gas natural corresponde al 49.11 el cual mayormente es usado para las termoeléctricas de ciclo combinado y combustión interna[1]. Para reducir la contaminación y recuperar calor residual de cualquier proceso debido a la combustión de combustibles fósiles es de vital importancia el estudio de recuperadores de energía térmica o regeneradores. En un proceso industrial térmico la temperatura residual esta en un rango de $100 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2].

Las aplicaciones de los intercambiadores de calor que funcionan como regeneradores de energía térmica se han investigado de manera puntual según su aplicación y uso. Se pueden encontrar en la literatura, calentadores de aire solar que son muy costosos para su fabricación dependiendo del material de construcción, por lo que se buscan técnicas para reducir sus costes de fabricación y que sean mas accesibles[3].

Estos sistemas pueden ser diseñados a partir de correlaciones como por ejemplo el uso del número de Nusselt, esta cantidad adimensional indica como es la transferencia de calor por convección[4], ademas el numero de Raynolds es de vital importancia para saber el régimen del fluido que se esta estudiando es esta en la categoría de laminar o turbulento

Otra manera de abordar problemas térmicos es mediante las ecuaciones gobernantes de conservación de masa[5], momentum y energía. A diferencia de la técnica por correlaciones, las ecuaciones gobernantes se pueden expresar en tres dimensiones (x, y , y z)[6]. Con la ayuda de la tecnología, se pueden simular estos sistemas para comprobar los modelos obtenidos y así tener una referencia mas fiable. La dinámica de fluidos computacional, es una gran herramienta que ademas de proveer información del comportamiento del flujo en la cavidades, principalmente para los que son en medios porosos[7].

Recientemente el modelado computacional y diseño artificial de medios porosos ha aumentado en los ultimos años debido a su aplicación en las áreas como la biomédica y eléctrica. En la investigación de esos sistemas se enfocan en como es la distribución de los poros o cavidades, y como su geometría afecta en la forma en que se transfiere calor o en la que mejor se aprovecha[7].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar, construir, y poner en operación una planta piloto de un regenerador de energía de lecho empacado, que sirva como estación de prueba para validar estructuras matemáticas que representen la dinámica de la planta y que sirvan para la solución de problemas de diseño, optimización y control de estos sistemas.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1.- Obtener un prototipo de regenerador de energía con doble lecho empacado con un monolito metálico.
- 2.- Generar tres modelos matemáticos mediante diferentes métodos de modelado para reproducir el comportamiento térmico de un periodo de calentamiento o enfriamiento, todos validados con datos provenientes del prototipo experimental.
- 3.- Formular un modelo matemático del comportamiento térmico de un ciclo completo, en régimen pseudo-estacionario.

Capítulo 2

Marco conceptual

2.1 Almacenamiento de energía térmica

En el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía térmica se deben considerar los siguientes factores:

- **Capacidad:** Esta característica del sistema depende el proceso de almacenamiento, el medio y el tamaño que tendrá, por ejemplo el agua tiene una capacidad de almacenar calor de $10 - 50 \frac{kWh}{t}$. La capacidad de almacenamiento tiene un importante efecto en la operación del resto del sistema.
- **Potencia:** Es la razón de carga y descarga relacionados con la potencia necesaria. De manera general, se define que tan rápido la energía puede almacenarse en un sistema y descargarse.
- **Eficiencia:** Esta relación entre la energía que suministra el usuario con la energía que se requiere para cargar el sistema. Esto considera la pérdida de energía durante el almacenamiento en un periodo de carga y descarga. Generalmente la eficiencia del calor sensible en un sistema esta en un rango del 50 % - 90 %
- **Periodo de almacenamiento:** La evaluación económica de un sistema de almacenamiento térmico depende significativamente de la aplicación, los requerimientos de operación y la frecuencia de almacenamiento.
- **Costo:** Esto se refiere a la capacidad o potencia del almacenamiento del sistema relacionado con los costos de operación, equipo de almacenamiento y tiempo de vida útil. El costo incluye desde el inicio del almacenamiento medio, contenedores y aislamientos. De manera general, los costos de estos sistemas pueden variar entre $0.15-10 \frac{\$}{kWh}$ para sistemas de almacenamiento de calor sensible.

Cabe mencionar que una buena unidad de almacenamiento debe tener una eficiencia mayor al 80 %. Los requerimientos técnicos para estos sistemas deben incluir:

- Alta densidad energética en el material del almacenamiento, que se traduce en el costo por el espacio ocupado y su aislamiento.

- Buena transferencia de calor entre el fluido de transferencia y el medio de almacenamiento con baja pérdida térmica.
- Mecánica y químicamente estable material de almacenamiento, entre mejor sea su costo incrementa.
- Reversibilidad para gran cantidad ciclos de carga y descarga. El costo del intercambiador para la carga y para la descarga es importante[8].

2.1.1 Almacenamiento de calor sensible

Los almacenes de calor sensible, usan la capacidad calorífica y el cambio de la temperatura del material del almacén durante el proceso de carga y descarga. La cantidad de calor almacenado depende de su capacidad calorífica, de su cambio de temperatura y la cantidad de almacenamiento térmico que posee el material de interés[8].

$$Q = \rho V C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Donde:

Q es la cantidad de calor almacenado en Joules $[J]$

ρ es la densidad del material de almacenamiento $[\frac{kg}{L}]$

C_p es el calor específico sobre el rango de temperatura de operación $[\frac{J}{kgK}]$

V es el volumen del material de almacenamiento usado $[L]$

ΔT es el rango de la temperatura operación $[^{\circ}C]$

La conductividad térmica del material afecta directamente la razón carga y la descarga en el almacenamiento, y se puede obtener de la siguiente expresión:

$$\lambda = \rho C_p \alpha \quad (2.2)$$

Donde:

λ es la conductividad térmica $[\frac{W}{mK}]$

ρ es la densidad $[\frac{kg}{m^3}]$

C_p es la capacidad calorífica $[\frac{J}{kgK}]$

α es la difusividad térmica $[\frac{m^2}{s}]$

Capítulo 3

Dimensionamiento

Dimensionamiento del compresor

De lo anterior, la información del caudal proveniente del compresor se encuentra indicada en pies cúbicos por minuto estándar, para obtener el dato de la velocidad se necesita realizar una conversión a pies cúbicos por minuto (CFM)

Si los SCFM es un flujo volumétrico a condiciones estándar de 14.7 psi a 20°C, para convertir a CFM implica las condiciones actuales de operación, de tal manera que se deben tomar las condiciones de presión atmosférica y temperatura de la ubicación geográfica. Para este caso se tomaran las condiciones del CENIDET, con los siguientes parámetros:

- Presión atmosférica: 0.9938317 atm
- Temperatura ambiental normal: 23.2°C

Según la Ley de los gases ideales, la densidad es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura[9]:

$$PV = mRT \quad (3.1)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (3.2)$$

Donde:

P es la presión expresado en psi (pulgadas por centímetro cuadrado).

V es el volumen expresado en m^3 .

m es la masa del gas expresado en kilogramos.

R es la constante de los gases ideales.

T es la temperatura expresada en grados Rankine ($^{\circ}R$).

ρ es la densidad del aire expresada en $\frac{Kg}{m^3}$

Por lo tanto se puede deducir la siguiente formula para convertir de SCFM a CFM:

$$CFM = \frac{SCFM}{\frac{P_{actual}}{14.7} * \frac{528^{\circ}R}{T_{actual}}} \quad (3.3)$$

Realizando las respectivas sustituciones y convirtiendo el valor de la temperatura de Celsius a Rankine, y la presión de atmósferas a psi se tiene:

$$CFM = \frac{3.7}{\frac{14.62}{14.7} * \frac{528^{\circ}R}{533.43^{\circ}R}} \quad (3.4)$$

Por lo tanto los CFM que proporciona el compresor seleccionado es de 3.7585 CFM. Para tener el valor correspondiente de la velocidad del flujo de aire después de la electroválvula, se necesita realizar la conversión de CFM a $\frac{l}{min}$. Donde 1 CFM es equivalente a $0.47 \frac{l}{s}$. De la capacidad de flujo obtenido anteriormente el caudal que puede proporcionar es: $1.7738 \frac{l}{s}$. El caudal viene definido por la siguiente expresión donde:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.5)$$

para conocer la velocidad de flujo de un caudal dado se esta considerando una tubería, se considera el área transversal de la tubería ($A = \pi r^2$) de selección para un diámetro de 5mm de diámetro.

La ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$v = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (3.6)$$

Por lo tanto la velocidad que puede proporcionar el compresor a través de la electroválvula para un diámetro de 5 mm es aproximadamente de: $90.339 \frac{m}{s}$ [10].

Referencias

- [1] M. Secretaria de Energia. *Informe de Balance Nacional de Energía*. Consultado: 30 de Marzo 2023. Mar. de 2021. URL: <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2019>.
- [2] R. Anish, V. Mariappan, S. Suresh, M. M. Joybari y A. M. Abdulateef. “Experimental investigation on the energy storage/discharge performance of xylitol in a compact spiral coil heat exchanger”. En: *International Journal of Thermal Sciences* 159 (ene. de 2021), pág. 106633. ISSN: 1290-0729. DOI: [10.1016/J.IJTHERMALSCI.2020.106633](https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2020.106633).
- [3] S. Abbas, Y. Yuan, A. Hassan, J. Zhou, W. Ji, T. Yu, U. U. Rehman y S. Yousuf. “Design a low-cost, medium-scale, flat plate solar air heater: An experimental and simulation study”. En: *Journal of Energy Storage* 56 (dic. de 2022). ISSN: 2352152X. DOI: [10.1016/j.est.2022.105858](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105858).
- [4] M. Pimsarn, P. Samruaisin, C. Thianpong, K. Ruengpayungsak, P. Eiamsa-Ard, S. Chamoli y S. Eiamsa-Ard. “Performance of a heat exchanger with compound inclined circular-rings and twisted tapes”. En: *Case Studies in Thermal Engineering* 37 (sep. de 2022). ISSN: 2214157X. DOI: [10.1016/j.csite.2022.102285](https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102285).
- [5] L. Zhao, Y. Lu, D. Lu y Z. Tang. “Modelling for gas-liquid bubbling flow and mass transfer with OpenFOAM”. En: *International Journal of Multiphase Flow* 163 (jun. de 2023), pág. 104441. ISSN: 0301-9322. DOI: [10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2023.104441](https://doi.org/10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2023.104441).
- [6] K. U. Rehman, W. Shatanawi y A. B. Colak. “Thermal analysis of flowing stream in partially heated double forward-facing step by using artificial neural network”. En: *Case Studies in Thermal Engineering* 37 (sep. de 2022). ISSN: 2214157X. DOI: [10.1016/j.csite.2022.102221](https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102221).
- [7] S. Prajapati, A. Chharia, N. Mehta y S. Yadav. “Computational modeling and conjugate heat transfer study for in situ design of artificial porous media at varied orientations”. En: *Materials Today: Proceedings* 56 (ene. de 2022), págs. 2995-3001. ISSN: 2214-7853. DOI: [10.1016/J.MATPR.2021.11.161](https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.161).
- [8] Y. T. Shah. *Thermal Energy : Sources, Recovery, and Applications*. First edition. CRC Press, 2017. ISBN: 9781315305943,978-1-1380-3353-5,978-1-3153-0595-0,9781315305936,1315305933,1315305933,1315305933. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?>.
- [9] A. J. G. Yanus A. Cengel John M. Cimbala. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. 6.^a ed. McGraw Hill, 2022. ISBN: 9781260597585.

- [10] A. C. A. NV. *Manual del aire comprimido*. 8.^a ed. Vol. 1. Atlas Copco Airpower NV, 2014. ISBN: 9789081535816. URL: <https://www.atlascopco.com/es-mx/compressors/new-products-and-offers/manual-del-aire-comprimido>.