

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	4
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. Marco conceptual	6
2.1. Mecanismos de transferencia de calor	6
2.1.1. Conducción	6
2.1.2. Convección	6
2.1.3. Radiación	7
2.2. Almacenamiento de energía térmica	7
2.2.1. Almacenamiento de calor sensible	8
3. Dimensionamiento	9
3.1. Selección de compresor	9
3.2. Dimensionamiento del compresor	10
<i>Referencias</i>	12

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 $100 - 200^{\circ}\text{C}$ [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], además 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 además 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 Mecanismos de transferencia de calor

2.1.1 Conducción

Es la transferencia de energía térmica que se transmite por contacto entre las partículas del material, la razón de conducción es única según el tipo de material e influye su geometría y espesor del mismo. De manera conceptual se puede enunciar que *la razón de la transferencia de calor por conducción a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperaturas y a la superficie de contacto por donde se transfiere el calor, pero inversamente proporcional a su espesor del material*

Del enunciado anterior se puede representar en la siguiente ecuación agregando la k como la conductividad térmica, que indica la capacidad que tiene un material para poder transferir energía térmica[9].

$$\dot{Q}_c = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Difusividad térmica

Esta propiedad de los materiales es útil para el análisis de la conducción de calor, debido a que representa la razón de difusión la energía térmica a través del material[9].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.2)$$

Donde k indica la conductividad térmica, y el producto de la densidad con la capacidad calorífica ρc_p representa la cantidad de energía que se puede contener.

2.1.2 Convección

Esta manera de transferir el calor entre un material sólido y líquido o gaseoso, es una combinación del movimiento de los fluidos y la conducción térmica. Este mecanismo se puede representar como la rapidez de cuanto calor transferido por conducción es proporcional a la

diferencia entre las temperaturas del sólido con el líquido o gas. Que es conocida como la **ley de enfriamiento de Newton**[9]:

$$\dot{Q}_{cv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

Donde el coeficiente de transferencia de energía térmica por convección es representado por h , A_s la superficie de contacto donde se está transfiriendo calor, T_s la temperatura del área de contacto y T_∞ corresponde a la temperatura del líquido o gas que está lo suficientemente lejano del sólido.

2.1.3 Radiación

Este mecanismo transfiere energía térmica en forma de ondas electromagnéticas, una característica principal de este método es que no requiere un medio como en el caso de la conducción o convección. Esta forma de transferencia se puede expresar mediante la **ley de Stefan-Boltzmann**[9] para superficies reales:

$$\dot{Q}_r = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.4)$$

El coeficiente σ representa la *constante de Stefan-Boltzmann*, ϵ corresponde a la emisividad del material que está en un intervalo $0 \leq \epsilon \leq 1$, A_s superficie que emite la radiación y su temperatura termodinámica T_s en Kelvin.

2.2 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 está 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].

2.2.1 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].

$$Q = \rho V C_p \Delta T \quad (2.5)$$

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:

$$\lambda = \rho C_p \alpha \quad (2.6)$$

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

3.1 Selección de compresor

Los datos del compresor y la electroválvula seleccionado para la elaboración de la planta experimental, es el siguiente:

Compresor de aire DEWALT modelo: D2002M-WK

- 6 galones de capacidad.
- Presión máxima: 165 psi
- SCFM a 40 psig: 3.7 / SCFM a 90 psig: 2.6
- Potencia: 1.5 HP
- Alimentación de 127VAC



Figura 3.1: Compresor DeWALT Modelo D2002M-WK TM

Con la información anterior se puede tomar como punto de partida el caudal que puede proporcionar el compresor de 3.7 SCFM a 40 psig, con el supuesto de que la presión de trabajo no excederá a 3 bar(43.6 psig).

La electroválvula que controlará la apertura del aire es la siguiente de la marca PNEUMAX™, con número de parte 808.32.0.1.M2, la cual tiene las siguientes características:

- Presión máxima de trabajo: 10 Bar.
- Temperatura de trabajo: Min -5°C y Max 50°C .
- Caudal máximo de trabajo a 6 Bar : $520 \frac{\text{Nl}}{\text{min}}$



Figura 3.2: Electroválvula PNEUMAX™ número de parte: 808.32.0.1.M2

3.2 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: $23,2^{\circ}\text{C}$

Según la Ley de los gases ideales, la densidad es proporcional a la presión e inversamente 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 ($^{\circ}\text{R}$).

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.IJTHEMALSCI.2020.106633](https://doi.org/10.1016/J.IJTHEMALSCI.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. 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>.