

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

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

at the

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Septiembre 2026

© 2026 Omar Arturo Castillo Méndez. This work is licensed under a [CC BY-NC-ND 4.0](#) license.

The author hereby grants to MIT a nonexclusive, worldwide, irrevocable, royalty-free license to exercise any and all rights under copyright, including to reproduce, preserve, distribute and publicly display copies of the thesis, or release the thesis under an open-access license.

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

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
on Junio, 2026 como requisito fundamental para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

RESUMEN

Aquí se escribe un abstract de la tesis

Director de Tesis: Victor Manuel Alvarado Martinez

Grado: Doctor en Ciencias

Director de Tesis: Ma. Guadalupe López López

Grado: Doctor en Ciencias

Agradecimientos

Escribe los agradecimientos aquí

Biographical Sketch

Silas Whitcomb Holman was born in Harvard, Massachusetts on January 20, 1856. He received his S.B. degree in Physics from MIT in 1876, and then joined the MIT Department of Physics as an Assistant. He became Instructor in Physics in 1880, Assistant Professor in 1882, Associate Professor in 1885, and Full Professor in 1893. Throughout this period, he struggled with increasingly severe rheumatoid arthritis. At length, he was defeated, becoming Professor Emeritus in 1897 and dying on April 1, 1900.

Holman's light burned brilliantly before his tragic and untimely death. He published extensively in thermal physics, and authored textbooks on precision measurement, fundamental mechanics, and other subjects. He established the original Heat Measurements Laboratory. Holman was a much admired teacher among both his students and his colleagues. The reports of his department and of the Institute itself refer to him frequently in the 1880's and 1890's, in tones that gradually shift from the greatest respect to the deepest sympathy.

Holman was a student of Professor Edward C. Pickering, then head of the Physics department. Holman himself became second in command of Physics, under Professor Charles R. Cross, some years later. Among Holman's students, several went on to distinguish themselves, including: the astronomer George E. Hale ('90) who organized the Yerkes and Mt. Wilson observatories and who designed the 200 inch telescope on Mt. Palomar; Charles G. Abbot ('94), also an astrophysicist and later Secretary of the Smithsonian Institution; and George K. Burgess ('96), later Director of the Bureau of Standards.

Índice general

<i>Índice de figuras</i>	13
<i>Índice de cuadros</i>	15
1. Introducción	17
1.0.1. Objetivo general	18
1.0.2. Objetivos específicos	18
1.0.3. Hipótesis	18
2. Capítulo	19
A. Code listing	21
B. One-term coefficients for heat conduction	23
B.1. A multipage table of numbers	23
<i>Referencias</i>	25

Índice de figuras

Índice de cuadros

B.1. One-term coefficients for one-dimensional heat conduction with a convective boundary condition. Data follow H. D. Baehr and K. Stephan [1].	23
--	----

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad el uso de combustibles fósiles ha sido primordial para el desarrollo de la sociedad. En México, segun 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 termoelectricas de ciclo combinado y combustión interna[BNE2021]. Para reducir la contaminación y recuperar calor residual de cualquier proceso debido a la combustion de combustibles fosiles 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 $100 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Anish2021].

Las aplicaciones de los intermbiadores de calor que funcionan como regeneradores de energía térmica se han investigado de manera puntual segun 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 tecnicas para reducir sus costes de fabricación y que sean mas accesibles[Abbas2022].

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[Pimsarn2022], ademas el numero de Raynolds es de vital importancia para saber el régimen del fluido que se esta estudiando es esta en la categoria de laminar o turbulento [Kong2022].

Otra manera de abordar problemas térmicos es mediante las ecuaciones gobernantes de conservación de masa[Zhao2023], momentum y energía. A diferencia de la técnica por correlaciones, las ecuaciones gobernantes se pueden expresar en tres dimensiones (x, y , y z)[Rehman2022]. Con la ayuda de la tecnología, se pueden simular estos sistemas para comprobar los modelos obtenidos y asi 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[Prajapati2022].

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 distribucion de los poros o cavidades, y como su geometria afecta en la forma en que se transfiere calor o en la que mejor se aprovecha[Prajapati2022].

1.0.1 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.

1.0.2 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.

1.0.3 Hipótesis

- El sistema completo tiene tiempo de enfriamiento y calentamiento de ambos regeneradores es simultaneo cuando hace el cambio a contraflujo.
- El aire usado para el calentamiento o enfriamiento es seco.
- El sistema de suministro de aire solo funciona en las condiciones y lugar del CENIDET
- Las ecuaciones diseño del intercambiador de calor van a servir de punto de partida para probar otras técnicas de modelado.

Capítulo 2

Capitulo

subsubsectionCálculo de la velocidad de salida 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[Cengel2022]:

$$PV = mRT \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (2.2)$$

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:

$$CFM = \frac{SCFM}{\frac{P_{actual}}{14.7} * \frac{528^{\circ}R}{T_{actual}}} \quad (2.3)$$

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

$$CFM = \frac{3.7}{\frac{14.62}{14.7} * \frac{528^{\circ}R}{533.43^{\circ}R}} \quad (2.4)$$

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:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.5)$$

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:

$$v = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (2.6)$$

Por lo tanto la velocidad que puede proporcionar el compresor a través de la electroválvula para un diámetro de 5 mm es aproximadamente de: $90.339 \frac{m}{s}$ [Atlas2014]

Apéndice A

Code listing

This example uses the listings package.

```
1 function print_rate(kappa,xMin,xMax,npoints,option)
2     local c = 1-kappa*kappa
3     local croot = (1-kappa*kappa)^(1/2)
4     local logx = math.log(xMin)
5     local psi = 0
6
7     local xstep = (math.log(xMax)-math.log(xMin))/(npoints-1)
8
9     arg0 = math.sqrt(xMin/c)
10    psi0 = (1/c)*math.exp((kappa*arg0)^2)*(erfc(kappa*arg0)-erfc(arg0)
11        )
12
13    if option~=[] then
14        tex.sprint("\addplot+[\"..option..\" coordinates{")
15        -- addplot+ for color cycle to work
16    else
17        tex.sprint("\addplot+ coordinates{")
18    end
19    tex.sprint("("..xMin..","..psi0..")")
20
21    for i=1, (npoints-1) do
22        x = math.exp(logx + xstep)
23        arg = math.sqrt(x/c)
24        karg = kappa*arg
25        if karg<5 then
26            -- this break compensates for exp(karg^2), which multiplies the
27            error in the erf approximation...
28            logpsi = -math.log(croot) + karg^2 + math.log(erfc(karg)-erfc
29                (arg))
30            psi = math.exp(logpsi)
31        else
32            --
33        end
34    end
35    tex.sprint(")\\end{addplot}");
36    return psi
```

```

29         psi = (1/(karg) - 1/(2*(karg^3)) + 3/(4*(arg^5)) )/(1
           .77245385*croot)
30         -- this is the large x asymptote of the reaction rate
31     end
32     logx = math.log(x)
33     tex.sprint("(" .. x .. ", " .. psi .. ")")
34 end
35 tex.sprint("}")
36 end
37 \end{luacode*}

```

Apéndice B

One-term coefficients for heat conduction

B.1 A multipage table of numbers

This example uses the `longtable` package: $\theta = A_1 f_1 \exp(-\lambda_1^2 \text{Fo})$, $\bar{\theta} = D_1 \exp(-\lambda_1^2 \text{Fo})$.

Cuadro B.1: One-term coefficients for one-dimensional heat conduction with a convective boundary condition. Data follow H. D. Baehr and K. Stephan [1].

Bi	<i>Plate</i>			<i>Cylinder</i>			<i>Sphere</i>		
	λ_1	A_1	D_1	λ_1	A_1	D_1	λ_1	A_1	D_1
0.01	0.09983	1.0017	1.0000	0.14124	1.0025	1.0000	0.17303	1.0030	1.0000
0.02	0.14095	1.0033	1.0000	0.19950	1.0050	1.0000	0.24446	1.0060	1.0000
0.03	0.17234	1.0049	1.0000	0.24403	1.0075	1.0000	0.29910	1.0090	1.0000
0.04	0.19868	1.0066	1.0000	0.28143	1.0099	1.0000	0.34503	1.0120	1.0000
0.05	0.22176	1.0082	0.9999	0.31426	1.0124	0.9999	0.38537	1.0150	1.0000
0.06	0.24253	1.0098	0.9999	0.34383	1.0148	0.9999	0.42173	1.0179	0.9999
0.07	0.26153	1.0114	0.9999	0.37092	1.0173	0.9999	0.45506	1.0209	0.9999
0.08	0.27913	1.0130	0.9999	0.39603	1.0197	0.9999	0.48600	1.0239	0.9999
0.09	0.29557	1.0145	0.9998	0.41954	1.0222	0.9998	0.51497	1.0268	0.9999
0.10	0.31105	1.0161	0.9998	0.44168	1.0246	0.9998	0.54228	1.0298	0.9998
0.15	0.37788	1.0237	0.9995	0.53761	1.0365	0.9995	0.66086	1.0445	0.9996
0.20	0.43284	1.0311	0.9992	0.61697	1.0483	0.9992	0.75931	1.0592	0.9993
0.25	0.48009	1.0382	0.9988	0.68559	1.0598	0.9988	0.84473	1.0737	0.9990
0.30	0.52179	1.0450	0.9983	0.74646	1.0712	0.9983	0.92079	1.0880	0.9985
0.40	0.59324	1.0580	0.9971	0.85158	1.0931	0.9970	1.05279	1.1164	0.9974
0.50	0.65327	1.0701	0.9956	0.94077	1.1143	0.9954	1.16556	1.1441	0.9960
0.60	0.70507	1.0814	0.9940	1.01844	1.1345	0.9936	1.26440	1.1713	0.9944
0.70	0.75056	1.0918	0.9922	1.08725	1.1539	0.9916	1.35252	1.1978	0.9925
0.80	0.79103	1.1016	0.9903	1.14897	1.1724	0.9893	1.43203	1.2236	0.9904
0.90	0.82740	1.1107	0.9882	1.20484	1.1902	0.9869	1.50442	1.2488	0.9880
1.00	0.86033	1.1191	0.9861	1.25578	1.2071	0.9843	1.57080	1.2732	0.9855
1.10	0.89035	1.1270	0.9839	1.30251	1.2232	0.9815	1.63199	1.2970	0.9828
1.20	0.91785	1.1344	0.9817	1.34558	1.2387	0.9787	1.68868	1.3201	0.9800

Cuadro B.1: (continued)

Bi	<i>Plate</i>			<i>Cylinder</i>			<i>Sphere</i>		
	λ_1	A_1	D_1	λ_1	A_1	D_1	λ_1	A_1	D_1
1.30	0.94316	1.1412	0.9794	1.38543	1.2533	0.9757	1.74140	1.3424	0.9770
1.40	0.96655	1.1477	0.9771	1.42246	1.2673	0.9727	1.79058	1.3640	0.9739
1.50	0.98824	1.1537	0.9748	1.45695	1.2807	0.9696	1.83660	1.3850	0.9707
1.60	1.00842	1.1593	0.9726	1.48917	1.2934	0.9665	1.87976	1.4052	0.9674
1.70	1.02725	1.1645	0.9703	1.51936	1.3055	0.9633	1.92035	1.4247	0.9640
1.80	1.04486	1.1695	0.9680	1.54769	1.3170	0.9601	1.95857	1.4436	0.9605
1.90	1.06136	1.1741	0.9658	1.57434	1.3279	0.9569	1.99465	1.4618	0.9570
2.00	1.07687	1.1785	0.9635	1.59945	1.3384	0.9537	2.02876	1.4793	0.9534
2.20	1.10524	1.1864	0.9592	1.64557	1.3578	0.9472	2.09166	1.5125	0.9462
2.40	1.13056	1.1934	0.9549	1.68691	1.3754	0.9408	2.14834	1.5433	0.9389
2.60	1.15330	1.1997	0.9509	1.72418	1.3914	0.9345	2.19967	1.5718	0.9316
2.80	1.17383	1.2052	0.9469	1.75794	1.4059	0.9284	2.24633	1.5982	0.9243
3.00	1.19246	1.2102	0.9431	1.78866	1.4191	0.9224	2.28893	1.6227	0.9171
3.50	1.23227	1.2206	0.9343	1.85449	1.4473	0.9081	2.38064	1.6761	0.8995
4.00	1.26459	1.2287	0.9264	1.90808	1.4698	0.8950	2.45564	1.7202	0.8830
4.50	1.29134	1.2351	0.9193	1.95248	1.4880	0.8830	2.51795	1.7567	0.8675
5.00	1.31384	1.2402	0.9130	1.98981	1.5029	0.8721	2.57043	1.7870	0.8533
6.00	1.34955	1.2479	0.9021	2.04901	1.5253	0.8532	2.65366	1.8338	0.8281
7.00	1.37662	1.2532	0.8932	2.09373	1.5411	0.8375	2.71646	1.8673	0.8069
8.00	1.39782	1.2570	0.8858	2.12864	1.5526	0.8244	2.76536	1.8920	0.7889
9.00	1.41487	1.2598	0.8796	2.15661	1.5611	0.8133	2.80443	1.9106	0.7737
10.00	1.42887	1.2620	0.8743	2.17950	1.5677	0.8039	2.83630	1.9249	0.7607
12.00	1.45050	1.2650	0.8658	2.21468	1.5769	0.7887	2.88509	1.9450	0.7397
14.00	1.46643	1.2669	0.8592	2.24044	1.5828	0.7770	2.92060	1.9581	0.7236
16.00	1.47864	1.2683	0.8541	2.26008	1.5869	0.7678	2.94756	1.9670	0.7109
18.00	1.48830	1.2692	0.8499	2.27556	1.5898	0.7603	2.96871	1.9734	0.7007
20.00	1.49613	1.2699	0.8464	2.28805	1.5919	0.7542	2.98572	1.9781	0.6922
25.00	1.51045	1.2710	0.8400	2.31080	1.5954	0.7427	3.01656	1.9856	0.6766
30.00	1.52017	1.2717	0.8355	2.32614	1.5973	0.7348	3.03724	1.9898	0.6658
35.00	1.52719	1.2721	0.8322	2.33719	1.5985	0.7290	3.05207	1.9924	0.6579
40.00	1.53250	1.2723	0.8296	2.34552	1.5993	0.7246	3.06321	1.9942	0.6519
50.00	1.54001	1.2727	0.8260	2.35724	1.6002	0.7183	3.07884	1.9962	0.6434
60.00	1.54505	1.2728	0.8235	2.36510	1.6007	0.7140	3.08928	1.9974	0.6376
80.00	1.55141	1.2730	0.8204	2.37496	1.6013	0.7085	3.10234	1.9985	0.6303
100.00	1.55525	1.2731	0.8185	2.38090	1.6015	0.7052	3.11019	1.9990	0.6259
200.00	1.56298	1.2732	0.8146	2.39283	1.6019	0.6985	3.12589	1.9998	0.6170
∞	1.57080	1.2732	0.8106	2.40483	1.6020	0.6917	3.14159	2.0000	0.6079

Referencias

- [1] H. D. Baehr y K. Stephan. *Heat and Mass Transfer*. Berlin: Springer-Verlag, 1998. ISBN: 3-540-63695-1.