

ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN MEDIOS POROSOS A TRAVÉS DE FLUJOS OSCILATORIOS

Regla Félix José Eliseo Bernabet (1), Luviano Ortiz José Luis (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jeb.reglafelix@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [luis.luviano@ugto.mx]

Resumen

En la presente investigación se analiza la transferencia de calor en un medio poroso dentro de un ducto cilíndrico con un flujo oscilatorio recíprocante en su interior, el cual es generado por pistones en los extremos del ducto, a su vez, un medio poroso se encuentra en la parte central del ducto por lo que hace la función de un regenerador. El análisis que se realiza es mediante la simulación de la dinámica de fluidos computacional (CFD), en la cual se implementa una malla dinámica para el movimiento de los pistones. Para la simulación de la transferencia de calor en el medio poroso se consideraron los parámetros obtenidos en el estado del arte. Los resultados muestran que en el regenerador se generan diferentes estructuras fluidodinámicas principalmente cuando los pistones se encuentran en las posiciones de 180° y 360° de su desplazamiento, las cuales corresponden al máximo desplazamiento de los mismos. Los resultados muestran la importancia del regenerador pues es posible cuantificar la cantidad de calor absorbido y entregado en el medio poroso.

Abstract

In the present investigation, the heat transfer is analyzed in a porous medium within a cylinder duct with an oscillatory reciprocating flow inside, which is generated by pistons in the duct ends, at the same time, the porous medium it is located in the central part of the duct so it does the function of the regenerator. The analysis that is done is through simulation of computer fluid dynamics (CFD), in which a dynamic mesh is implemented for the movement of the pistons. For heat transfer simulation in the porous medium the parameters obtained in the state of the art were considered. The results show that different fluid-dynamic structures are generated in the regenerator, mainly when the pistons are in the positions of 180 and 360 degrees of their displacement, which correspond to the maximum displacement of the same. The results show the importance of the regenerator because it is possible to quantify the amount of heat absorbed and delivered in the porous medium.

Palabras Clave

Medio Poroso; Flujo Oscilatorio; Regenerador de Calor; Transferencia de calor.

INTRODUCCIÓN

Actualmente con el incremento de problemas por contaminación y disminución de combustibles fósiles, la investigación sobre energías renovables no contaminantes y eficientes es cada vez es un tema imperativo [1]; es por ello que, el motor Stirling es una de las innovaciones más prometedoras que se espera que coadyuve a resolver estos problemas. El motor Stirling cuenta con bajas emisiones, bajo nivel de ruido y alta eficiencia en comparación de otros tipos de motores [2]. El primer motor Stirling fue patentado por Robert Stirling, quien lo inventó para reemplazar las máquinas de vapor peligrosas a principios del Siglo XIX. Lamentablemente los motores Stirling nunca tuvieron éxito en esto e incluso fueron superados, junto con las máquinas de vapor, por motores de combustión interna. Posteriormente fueron olvidados durante un largo período de tiempo hasta principios del siglo XX [3]. Sin embargo, gracias a las ventajas ya mencionadas respecto a otros medios para la conversión de energía, la investigación sobre motores ha regresado; su tecnología es considerada de las más importantes para abordar y darle solución a los problemas de calentamiento global, así como al agotamiento de combustibles fósiles. En base a lo anterior, cada vez se descubren más aplicaciones de la tecnología de los motores Stirling debido a su continua mejora en su rendimiento.

Los tres tipos de motores Stirling más comunes son el Alfa (α), Beta (β) y Gamma (γ), la principal diferencia entre ellos es la forma en la que transfieren el fluido de trabajo entre los intercambiadores de calor y su similitud son sus ciclos termodinámicos [4]. En general, los motores Stirling tipo Alfa y Beta están asociados con un alto gradiente de temperatura entre sus cilindros, cabe señalar que el Gamma es de gradiente de temperatura medio. Debido a esto, los motores Stirling con un alto gradiente de temperatura tienen gran importancia respecto a la potencia y eficiencia que otorgan, debido a esto la mayoría de los motores Stirling industriales son Alfa o Beta. Cabe señalar que los motores Stirling Gamma cuentan con una menor eficiencia y potencia, sin embargo, tienen cierta ventaja ya que son más fáciles de operar pues sus fuentes de calor pueden ser de baja intensidad como energía solar, energía geotérmica o incluso calor residual industrial.

Uno de los componentes clave del motor Stirling es su regenerador el cual absorbe y/o libera calor del fluido de trabajo. Cuando el fluido fluye de la zona caliente a la fría libera calor, sin embargo, cuando el fluido está retornando hacia la zona caliente el regenerador en el motor Stirling puede afectar significativamente el trabajo de salida y la eficiencia térmica, y a su vez, causar una caída de presión. Estas características de flujo y transferencia de calor del regenerador en un flujo oscilante han atraído la atención de varios investigadores [5]. Tanaka *et al.* [6] recomendaron que el diámetro hidráulico fuera utilizado como la longitud característica para cualquier factor de fricción y número de Reynolds, llegaron a esto, a través de obtener los factores de fricción de los regeneradores de tela metálica, la esponja de metal y metal sinterizado, y encontraron que el factor de fricción con un flujo oscilante es más alto que con un flujo constante.

Chen y Griffi [7] identificaron 25 modelos fueron, diecinueve de éstos se publicaron con suficiente detalle para su revisión. Las suposiciones, limitaciones, previsibilidad y aplicabilidad de cada modelo individual fueron evaluadas utilizando un formato de revisión de dos partes que consistió en la descripción y validación del modelo. De acuerdo con sus métodos de diseño, los modelos se agruparon en categorías por grado de sofisticación, estableciendo cinco métodos utilizados para diseñar y predecir el rendimiento del motor Stirling: análisis de cero, análisis primer, segundo, tercer (o método nodal) y cuarto orden (o simulación CFD). El término “orden” usado es un tipo de clasificación de la complejidad del modelo que incrementa al aumentar el orden [8].

El modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) del rendimiento térmico del motor Stirling es una herramienta efectiva para mejorar su diseño, eficiencia y potencia de salida. Varios estudios han informado sobre el uso del modelado CFD para investigar su rendimiento. Mahkamov [8] simuló un prototipo gamma fabricado anteriormente. Este motor estaba diseñado con un modelo de primer orden y la potencia esperada era menor que la potencia realmente obtenida. Su investigación mostró que hay dos factores principales que limitan la producción de potencia: las pérdidas hidráulicas en el regenerador y el volumen muerto. Por consiguiente, modificó el prototipo eliminando algunos de los volúmenes muertos mediante la conversión de la configuración del motor Stirling Gamma a Alfa.

MATERIALES Y MÉTODOS

A fin de simular numéricamente un regenerador, se propuso un flujo oscilatorio recíprocante en un ducto cilíndrico con transferencia de calor con un medio poroso al interior del mismo. Para la simulación se propuso la implementación de dos pistones en los extremos del ducto utilizando una malla dinámica. En la IMAGEN 1 se muestran los parámetros geométricos y las condiciones de frontera usados en la simulación. Asimismo, en la Tabla 1 se muestran los valores asignados a las medidas de la geometría.

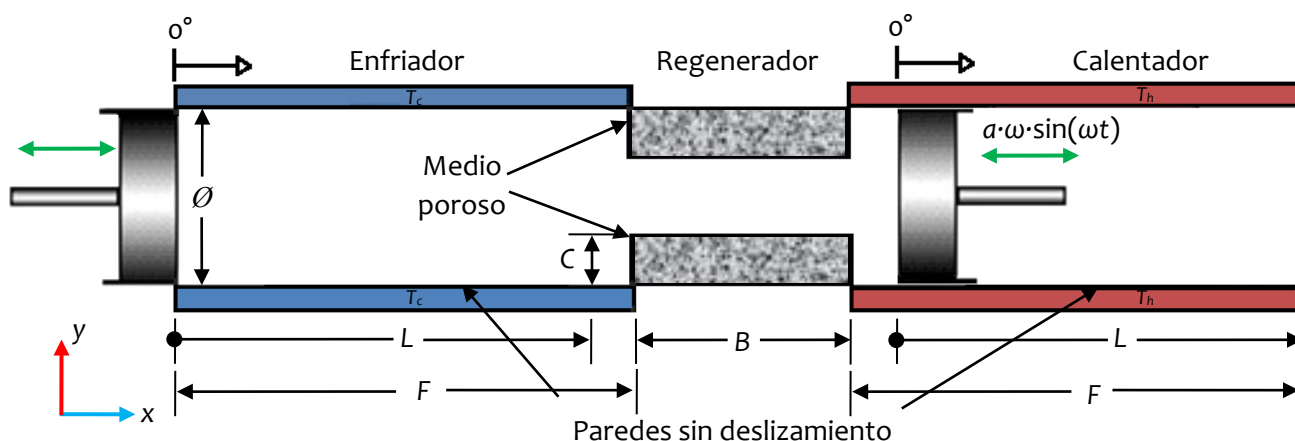


IMAGEN 1: Geometría y condiciones de frontera de regenerador con medio poroso en su interior y pistones en sus extremos.

El fluido de trabajo que se estableció fue aire, y el regenerador de medio poroso de aluminio, en la Tabla 2 se muestra las propiedades de cada uno utilizadas en esta investigación.

Tabla 1: Valor de parámetros utilizados en la geometría y condiciones de frontera.

Parámetros	Valor asignado
\varnothing	0.05 m
L	0.175 m
F	0.2 m
B	0.1 m
C	0.015 m
T_c	298 K
T_h	798 K

Tabla 2: Propiedades del aluminio poroso y del aire.

Propiedades	Aire	Aluminio poroso
Densidad (ρ), [kg/m ³]	1.1614	2707
Viscosidad (μ), [kg/(m·s)]	1.846e-05	*
Calor específico (c_p), [J/(kg·K)]	1007	903
Permeabilidad (α), [m ²]	*	9.33e-08
Coefficiente de resistencia viscosa (D), [m ²]	*	1.071811e+07
Conductividad térmica (k), [W/(m·K)]	0.0263	203
Porosidad	*	0.9

A fin de tener un flujo oscilatorio recíprocante, la simulación se llevó a cabo en estado transitorio. La velocidad del pistón se determinó por medio de $a \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$, donde a correspondió a la mitad de la distancia recorrida por el pistón ($L/2$), y ω fue la frecuencia de oscilación de cada pistón. La velocidad máxima obtenida en cada pistón fue de 0.5 m/s para la cual se obtuvo un número de Mach inferior a 0.3, por lo tanto, se consideró un gas incompresible en régimen laminar ya que el número de Reynolds fue menor a 2300.

El paso de tiempo establecido fue $\Delta t = 4.861 \times 10^{-4}$ s, el cual correspondió al tiempo en que cada pistón se desplazó un grado. Aunado a esto, el mallado constó de 6220 elementos y 6355 nodos. Para la malla dinámica se programó una *User Defined Function* (UDF) en la cual se estableció la ecuación de velocidad del flujo oscilatorio y la cual es compilada en el software. Esta ecuación se estableció en los extremos del ducto que es donde están los pistones, para ello, se usó el método de *layering*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la IMAGEN 2 se muestran las líneas de corriente correspondientes a la velocidad del fluido para la posición $\theta = 90^\circ$ en la cual la velocidad de los pistones es máxima. En esta posición se observa que el fluido incrementa su velocidad en el centro del ducto entre el medio poroso, esto se debe a que el fluido encuentra una resistencia a fluir a través del medio poroso. En esta imagen también se observa que el fluido se desplaza principalmente en la dirección horizontal positiva. En las posiciones de los pistones entre $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, en el lado derecho del ducto se tiene un comportamiento hidrodinámico del fluido en el cual se van creando entre 5 o 6 vórtices, mientras que en el lado izquierdo del ducto se tienen dos vórtices que muestran cómo el fluido al ir en una dirección comienza a fluir en la dirección opuesta, aunado a esto, el fluido al interior del medio poroso incrementa su velocidad principalmente en la parte central de éste. Para el caso en el cual los pistones se encuentran entre $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ la dinámica del fluido es similar a cuando los pistones se desplazaban en la dirección positiva.

En la IMAGEN 3 se muestran los contornos de temperatura para la posición de los pistones $\theta = 90^\circ$. En esta imagen se observa que en el lado derecho del medio poroso la temperatura es mayor que en el lado izquierdo, lo cual corresponde a la condición de frontera de temperatura impuesta. En esta imagen se observa que una fracción del flujo ingresa al medio poroso en donde absorbe parte del calor almacenado en el mismo, lo cual genera un precalentamiento del fluido, una vez que éste sale del medio poroso, absorbe otra fracción del calor en la región con temperatura mayor. Una vez que los pistones alcanzan su máximo desplazamiento ($\theta = 180^\circ$), el fluido ha adquirido el suficiente calor para transmitir una parte de éste al medio poroso y otra parte a la región de menor temperatura, durante el regreso de los pistones ($180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$).

CONCLUSIONES

Se analizó la dinámica del fluido en un regenerador de calor y se comprobó que el regenerador es una parte importante de los motores Stirling, debido a que éste absorbe y/o entrega calor desde o hacia el fluido de trabajo. El análisis mostró que el regenerador permite precalentar el fluido una vez que éste ha sido enfriado en el reservorio frío, esto permite tener una mejor eficiencia del motor Stirling ya que se requiere una menor cantidad de energía para calentar nuevamente el fluido. El regenerador de calor es eficiente debido a que se incrementa el área de contacto ya que éste es poroso. Los resultados muestran que la presencia del regenerador genera una desestabilización en el flujo, esto ocasiona que se tenga una mayor cantidad de vórtices en comparación a cuando no se tiene el regenerador, esto es favorable ya que el fluido se mezcla entre sí ocasionando que la distribución de temperaturas sea más uniforme. Los resultados muestran que el uso de la malla dinámica permite imponer condiciones de frontera más realistas a diferencia de imponer un ducto abierto en ambos extremos en donde se tiene un flujo recíprocante. Los resultados obtenidos dan puerta a realizar una investigación más a fondo en la cual se varíe el tamaño del medio poroso en el regenerador de calor, esto permitirá conocer y determinar cómo es la dinámica y transferencia de calor en el fluido cuando se tiene un flujo oscilante.

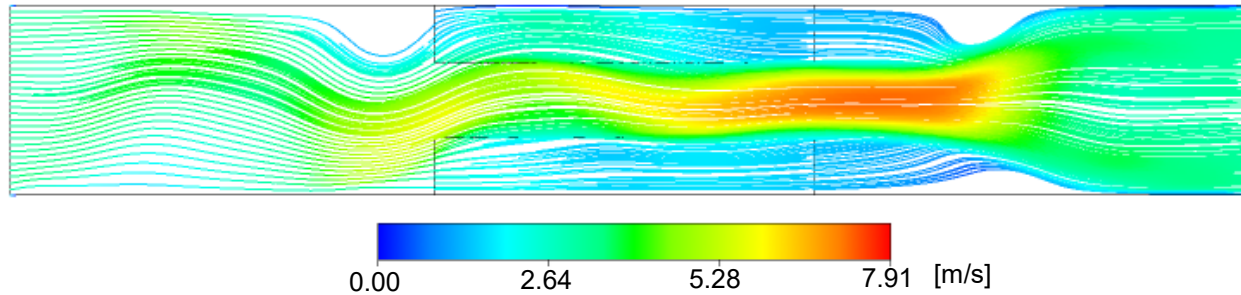


IMAGEN 2: Líneas de corriente en el regenerador para la posición de los pistones $\theta = 90^\circ$.

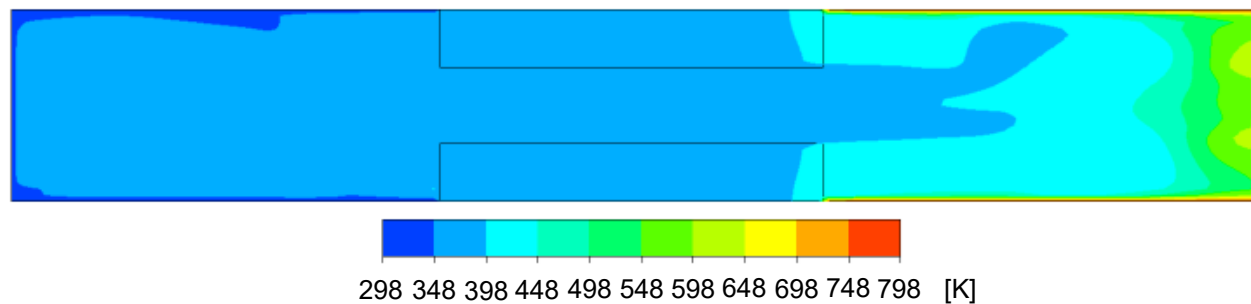


IMAGEN 3: Contornos de temperatura en el regenerador para la posición $\theta = 90^\circ$.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. José Luis Luviano Ortiz por su tiempo invertido brindándome consejos e importantes aprendizajes, los cuales me han ayudado a crecer de manera significativa en el área de la investigación. También a mis compañeros del grupo de investigación por su apoyo con su conocimiento transmitido.

REFERENCIAS

- [1] Fischer Carolyn, G. Newell Richard. (2008). Environmental and technology policies for climate mitigation. *Journal of Environmental Economics and Management*, volumen (55), pp. 142-162.
- [2] Mohammad H. Ahmadi, Mohammad-Ali Ahmadi, Fathollah Pourfayaz. (2017). Thermal models for analysis of performance of Stirling engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen (68), pp. 168-184.
- [3] Chen Wen-Lih, Yang Yu-Ching, Salazar Jose Leon. (2015). A CFD parametric study on the performance of a low-temperature-differential γ -type Stirling engine. *Energy Conversion and Management*, volumen (106), pp. 635-643.
- [4] Ahmad K. Almajri, Saad Mahmoud, Raya Al-Dadah. (2017). Modelling and parametric study of an efficient Alpha type Stirling engine performance based on 3D CFD analysis. *Energy Conversion and Management*, volume (145), pp. 93-106.
- [5] Gang Xiao, Hao Peng, Haoting Fan, Umair Sultan, Mingjiang Ni. (2017). Characteristics of steady and oscillating flows through regenerator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume (108), pp. 309-321.
- [6] M. Tanaka, I. Yamashita, F. Chisaka. (1990). Flow and heat transfer characteristics of the Stirling engine regenerator in an oscillating flow. *JSME Int. J. Ser. II* (33), pp. 283-289.
- [7] Chen NC, Griffin FP. (1983). Review of Stirling engine mathematical models. TN (USA): Oak Ridge National Lab.
- [8] A. Abuelyamen, R. Ben-Mansour, H. Abualhamayel, Esmail M.A. Mokheimer. (2017). Parametric study on beta-type Stirling engine. *Energy Conversion and Management*, volumen (145), pp. 53-63.
- [9] K. Mahkamov. (2005) Design Improvements to a Biomass Stirling Engine Using Mathematical Analysis and 3D CFD Modeling. *J. Energy Resource, Technology* 128(3), pp. 203-215.