

## Modelado de la distribución de temperatura de un motor Stirling

Ricardo Enrique Pérez Blanco<sup>1</sup>; Luis Leobardo Alfaro Avena<sup>1</sup>; Eli Palma Soto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

[riperez@uacj.mx](mailto:riperez@uacj.mx)

### Resumen

El modelado de dispositivos en la vida real, para predecir su comportamiento es una de las partes importantes de la Ingeniería. El uso de programas computacionales para modelar estos dispositivos es cada vez más frecuente y cobran día a día mayor importancia. Esto se debe a que el modelado es más barato que la fabricación. Además de que es posible que no se cuente con todo el equipo necesario, para llevar a cabo dichas mediciones en forma física. Sin mencionar que durante la simulación, se pueden corregir algunos de los errores que pudieran existir. En este trabajo, se presenta el modelado de la temperatura de un motor Stirling tipo beta de un solo pistón. Este motor tiene una sola fuente de calor y un intercambiador de calor. Se utilizó FEMLAB para hacer las simulaciones de la distribución de la temperatura del motor. En las simulaciones se varió la posición de la fuente de calor para observar cómo afecta al funcionamiento del motor Stirling.

**Palabras clave:** FEMLAB, Fricción, Motor Stirling.

### Introducción

Se define como motor Stirling a aquel dispositivo que convierte calor en trabajo. Se realiza a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresiones y expansiones cíclicas de un fluido de trabajo [Moran]. Este fluido se encuentra entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío. Para nuestro caso usamos aire como fluido de

trabajo, el cual está confinado en una cámara cerrada y no interactúa con el medio ambiente. El aire se desplaza de un extremo a otro de la cámara. Cuando está en un extremo una fuente de calor externa lo calienta, haciendo que el aire se expanda. Una vez que alcanza su máxima expansión, el aire se traslada al otro extremo de la cámara. Ahí está un

disipador de calor que enfría el aire y provoca que se comprima. Después se lleva nuevamente al extremo caliente para iniciar un nuevo ciclo. Un tambor desplazador mueve el aire entre los dos extremos de la cámara. Otro dispositivo, el pistón de potencia, aprovecha la expansión y produce la fuerza del motor [Allan, Moran]. Algunos autores ya han realizado algunos modelados del motor Stirling [Campos, Martaj], pero en ningún trabajo se estudia el cambiar la posición de la fuente de calor. Para realizar el modelado, usamos el software FEMLAB.

“FEMLAB es un ambiente interactivo que permite modelar y resolver toda clase

de problemas de carácter científico o de ingeniería basados en ecuaciones diferenciales parciales (EDP) a través del método de elemento finito. FEMLAB está diseñado con el propósito de permitir la modelación y simulación de los fenómenos físicos tan fácil como sea posible. Para lo cual el usuario puede acceder de forma independiente a cada una de las EDP base, o utilizar los modelos de aplicación especializados que presenta el programa. Estos modelos físicos consisten en plantillas predefinidas e interfaces de usuario preparadas con las ecuaciones y variables para las áreas de la aplicación específica” [Sandoval]

## Metodología

El ciclo de Stirling está integrado por cuatro procesos termodinámicos, compuestos de transformaciones isotérmicas e isocóricas, que actúan sobre el fluido de trabajo [Allan, Moran]. Para modelar un fluido incomprensible, en nuestro caso aire seco, se usaron las ecuaciones de Navier-Stokes [Sedat]. Sin embargo, para coordenadas asimétricas el software FEMLAB usa la versión de Navier-Stokes más general para permitir una viscosidad variable. Las ecuaciones generalizadas de las características de transporte y los gradientes de velocidad están dadas por las ecuaciones 1 y 2.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot [\eta(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho(u \cdot \nabla)u + \nabla p = F \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0$$

(2)

donde:  $\rho$  es densidad;  $u$  es la velocidad de campo;  $\eta$  es la viscosidad dinámica;  $T$  es la temperatura;  $p$  es la presión;  $F$  es la fuerza. La primera ecuación es la ecuación de equilibrio y la segunda es la ecuación de continuidad para fluidos incomprensibles.

Para modelar matemáticamente la transferencia de calor por conducción, usaremos la ecuación de calor la cual se muestra en la ecuación 3:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q$$

(3)

donde:  $C_p$  es la capacidad calorífica;  $k$  es la conductividad térmica y  $Q$  es el calor.

En nuestro caso la conductividad térmica es isotrópica, ya que estamos hablando de un solo fluido de trabajo. Si fuera anisotrópica, la constante  $k$  se convertiría en el tensor de conductividad térmica. Para modelar la conducción y convección de calor a través de un fluido, se debe incluir el término de convectividad en la ecuación de calor.

FEMLAB incluye la aplicación de conducción y convección por medio de la ecuación 4:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T u) = Q$$

(4)

Si se desea una explicación más detallada de las ecuaciones anteriores y de su manejo dentro de FEMLAB, se puede consultar en [Palma].

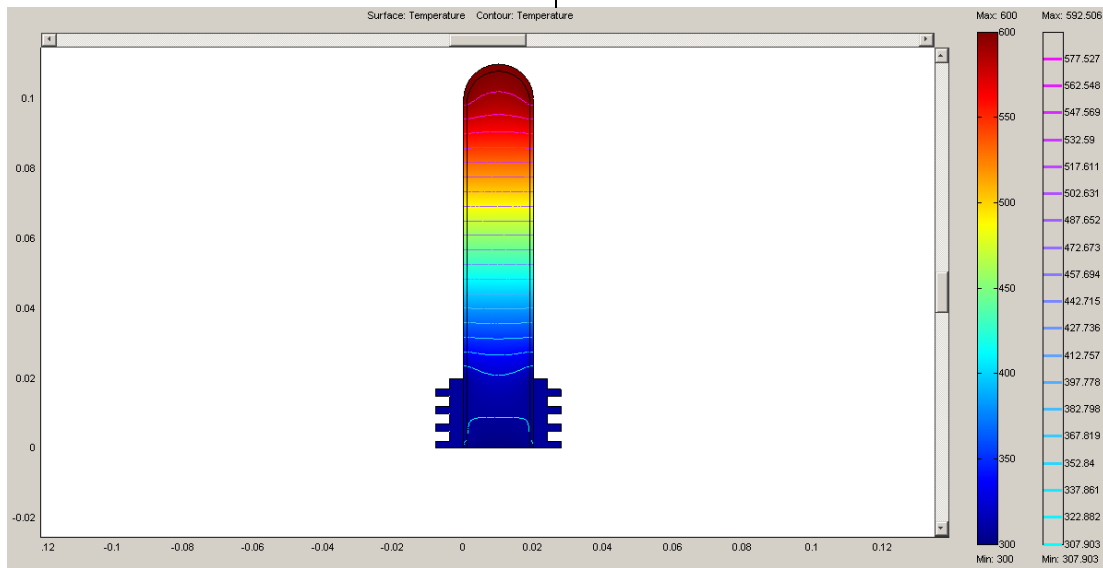
## Resultados y Discusión

pistón y el cilindro Las simulaciones se realizaron en FEMLAB. Se varió la fuente de calor en diferentes puntos del cilindro para ver el comportamiento termodinámico del aire encerrado y como afecta el funcionamiento del motor Stirling. Las figuras 1-4, muestran los resultados obtenidos de las simulaciones al variar la fuente de calor. En la figura 1, se colocó la fuente de calor en la punta del cilindro. La parte más caliente está con un color rojo y la más fría con un color azul. En esta figura podemos observar que el desplazamiento del frente de ondas del aire es en forma constante y le llega al intercambiador de calor de forma uniforme [Palma]. Lo que ocasiona que la presión, sea la misma para todos los puntos de la cara del pistón. Haciendo que se mueva sin problemas de fricción con las paredes del cilindro, al no tener fricción el pistón se mueve libremente y es cuando tenemos el mejor rendimiento del motor [Martaj]. En la figura 2, la

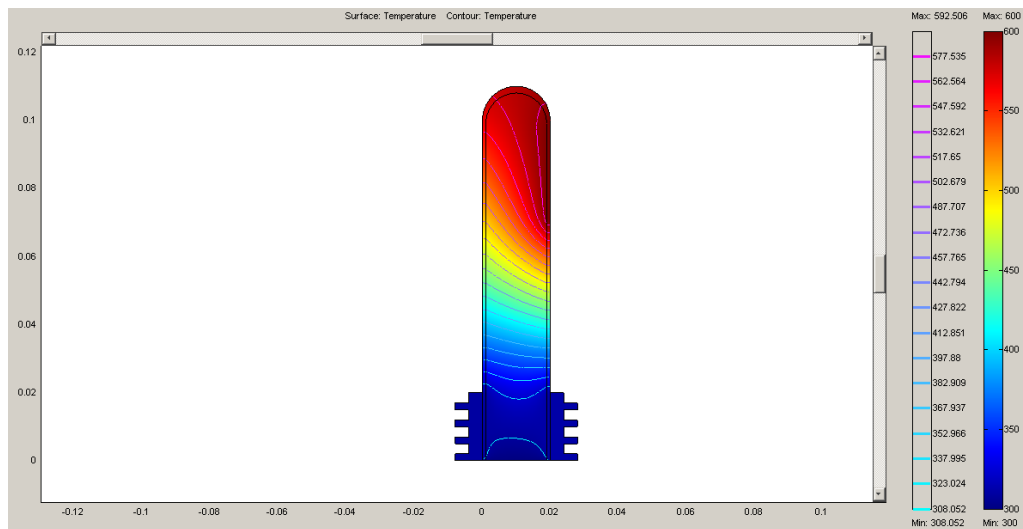
fente de calor se colocó al lado derecho de la punta. Se puede observar como el desplazamiento del frente de ondas del aire, ya no le llega al pistón de forma frontal, sino que ejerce más presión del lado derecho que del izquierdo. Esto lo que va a ocasionar es que el pistón se flexione hacia un lado por la diferencia de presiones y empiece a rozar con el cilindro. Esto incrementará la fricción y el pistón no se moverá con la misma velocidad que cuando la fuente de calor está colocada en la punta del cilindro. Se perderá parte del trabajo en vencer la fricción y el rendimiento del motor disminuirá. En la figura 3, la fuente de calor se colocó a la mitad del cilindro. Se puede observar que la presión de un lado es mucho mayor que el otro, lo cual hará que el pistón se flexione más que en el caso anterior. En este caso la fricción entre el pistón y el cilindro también se incrementará y por ende la velocidad del pistón disminuirá. En la figura 4, la

fente de calor se colocó a un lado del disipador de calor. En esta figura observamos que la presión en un lado del pistón, es mucho mayor que en cualquiera de los casos anteriores. Además, el lado del disipador que está junto a la fuente de calor también se empieza a calentar. Este

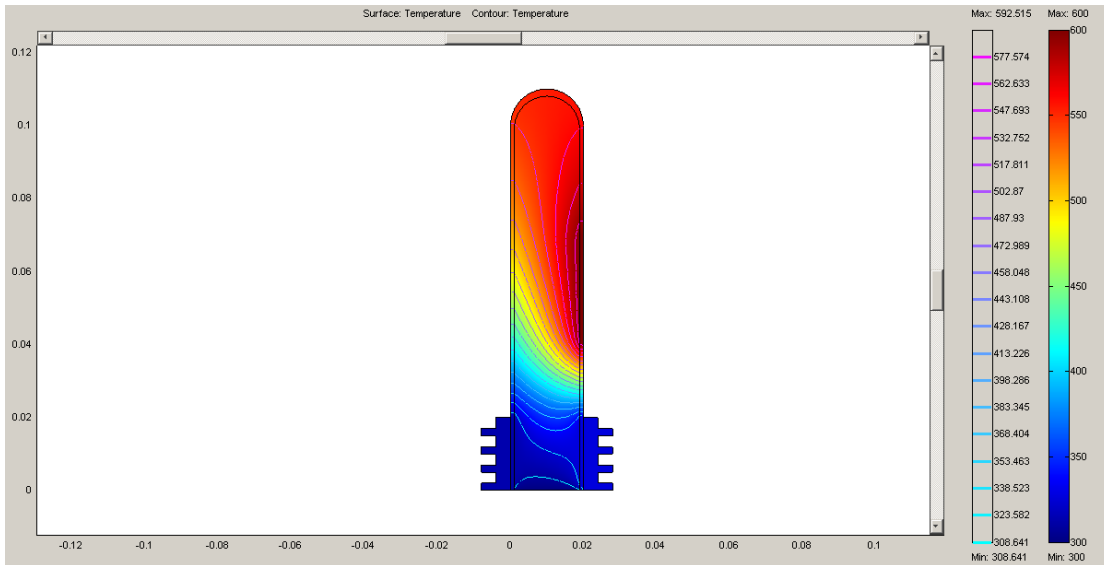
es el peor de los casos de donde se debe colocar la fuente de calor, ya que creemos que la fricción entre eles la más alta de todas. Además, el disipador al calentarse perderá su función de enfriar el aire y con ello hará que el funcionamiento del motor no sea el adecuado.



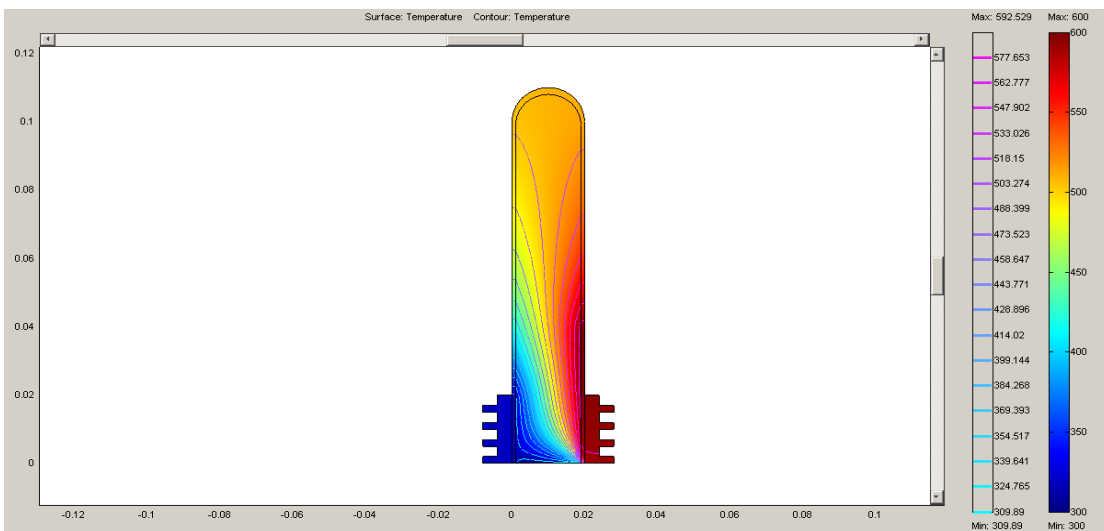
**Figura 1.-** Distribución de la temperatura y desplazamiento del aire dentro del cilindro, para cuando la fuente de calor está en la punta del cilindro.



**Figura 2.-** Distribución de la temperatura y desplazamiento del aire dentro del cilindro, para cuando la fuente de calor está a un lado de la punta del cilindro.



**Figura 3.-** Distribución de la temperatura y desplazamiento del aire dentro del cilindro, para cuando la fuente de calor está a la mitad del cilindro.



**Figura 4.-** Distribución de la temperatura y desplazamiento del aire dentro del cilindro, para cuando la fuente de calor está a un lado del enfriador.

## Conclusiones

En este trabajo se presentó el modelado de la distribución de la temperatura de un motor Stirling, esto con el objetivo de

estudiar su comportamiento en función de la posición de la fuente de calor. Para el modelado se usaron las ecuaciones de

Navier Stokes en el software FEMLAB. Se observó la importancia de que el pistón del motor Stirling se mueva de manera libre y que no tenga ninguna fricción con el cilindro. Después de analizar las figuras anteriores, se recomienda que la fuente de calor se coloque siempre en la punta del cilindro para que el funcionamiento del motor sea el óptimo. O en su caso en un punto donde el desplazamiento del frente de

ondas del aire sea en forma constante, y le llegue al intercambiador de calor de forma uniforme. Con esto la presión será la misma para todos los puntos de la cara del pistón. Haciendo que se mueva sin problemas de fricción con las paredes del cilindro, y mejorando rendimiento del motor. De lo contrario se reducirá drásticamente el funcionamiento y la eficiencia del mismo.

## Referencias

Allan J. Organ.. (2013). *Stirling Cycle Engines: Inner Workings and Design*. New York: John Wiley & Sons.

Martaj N & Rochelle P. (2014). 1D Modelling of an Alpha Type Stirling Engine. *Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim.*, 5, A07.

M.C. Campos, J.V.C. Vargas, J.C. Ordonez.. (2012). Thermodynamic Optimization of a Stirling Engine. *Energy*, 44.

Moran MJ, Shapiro HN. (2011). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (7<sup>th</sup> ed). New York: John Wiley & Sons.

Palma-Soto, Eli. (2010) *Análisis Termodinámico del Motor Stirling Tipo Beta por Medio de FEMLAB*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Sandoval N. Francisco A. (1999). FEMLAB Introspección a los Fenómenos Electromagnéticos a través de PDE's. 7 de Agosto del 2016, Universidad Técnica Particular de Loja. Sitio web: [https://fralbe.files.wordpress.com/2008/05/tutorial-femlab\\_seg.pdf](https://fralbe.files.wordpress.com/2008/05/tutorial-femlab_seg.pdf)

Sedat Biringen, Chuen-Yen Chow. (2011). *An Introduction to Computational Fluid Mechanics by Example*. New York: John Wiley & Sons.