

Diseño y construcción de un prototipo de motor con base en el ciclo Stirling¹

RESUMEN

Resultado del proceso desarrollado en el Semillero de investigación en Energías Alternativas (SEA) de la Facultad Tecnológica, se muestra el proceso de diseño y construcción de un motor con base en el ciclo Stirling y se exponen los principales conceptos teóricos que se utilizan en el diseño del prototipo, como el análisis Schmidt, el número de Beale, el análisis de segundo orden, entre otros. Se muestra cómo convergen todos estos elementos en el diseño mecánico y en la construcción del prototipo.

Palabras clave: Motor de combustión externa, energías alternativas, regenerador, ciclo Stirling.

1. Introducción

La actual problemática energética mundial es grande y cada vez es más incierto el futuro del mercado energético, debido, entre otros factores, al incremento de la demanda, al bajo número de nuevos hallazgos de yacimientos petroleros y a la dependencia cada vez mayor de recursos no renovables, como carbón, petróleo, gas, etc. En estos momentos de crisis energética y económica es indispensable la utilización racional e inteligente de los recursos energéticos disponibles para lograr un crecimiento sustentable con el medio ambiente y para garantizar también un porvenir energético a las generaciones venideras.

Conociendo la problemática que tiene la energía mundial, una alternativa para suplir la fuerza motriz sería el empleo de un motor que sea capaz de funcionar con una gran variedad de combustibles (fósiles o no), en una diversidad de ambientes, y que a su vez sea de fácil operación y mantenimiento. Por esta y por muchas otras razones, un motor con base en el ciclo Stirling solucionaría, por lo menos parcialmente, la problemática energética descrita, debido a que solo se

Autor

Julián Camilo Restrepo Lozano²

Director

Germán López Martínez³

Semillero de investigación en energías alternativas (SEA).

1 Proyecto curricular de Tecnología Mecánica.

2 Tecnólogo Mecánico, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Investigador Semillero de investigación en energías alternativas (SEA). Correo electrónico: jcrestrepol@hotmail.com

3 Ingeniero Mecánico, docente Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, director del proyecto. Correo electrónico: galopezm@udistrital.edu.co

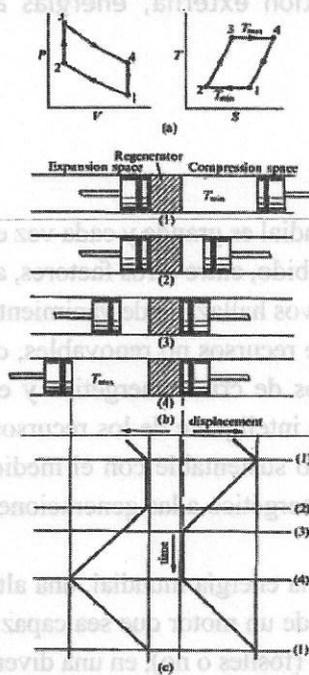
requiere disponer de una diferencia de temperaturas y un fluido de trabajo apropiado para que funcione adecuadamente. Con este propósito, en este artículo se exponen los principales conceptos teóricos que se utilizan en el diseño del prototipo, tales como el análisis de Schmidt, el número de Beale, el análisis de segundo orden, entre otros. Se muestra cómo convergen todos estos elementos en el diseño mecánico y en la construcción del prototipo.

2. Contenido

2.1 Ciclo Stirling

En la Figura 1 se pueden apreciar los diagramas de presión-volumen y de temperatura-entropía del ciclo Stirling teórico; también se observan las posiciones que deben tener los pistones en sus puntos terminales para poder completar el ciclo teórico; por último se muestra el diagrama correspondiente al desplazamiento de los pistones [1].

Figura 1. Ciclo Stirling.



- a). Diagrama presión-volumen y entropía-temperatura,
- b). Posición de los dos pistones en los puntos terminales del ciclo, c). Diagrama del desplazamiento en los puntos terminales del ciclo.

Se considera un cilindro que contiene dos pistones opuestos, con un regenerador entre ellos. El regenerador es el mecanismo que permite almacenar o ceder calor, función que puede cumplir un medio poroso o, en algunos casos, el mismo aire, si se usa como fluido de trabajo. El regenerador es el elemento “mágico” del ciclo Stirling, porque regula la temperatura en el ciclo y lo mantiene en movimiento.

El ciclo está compuesto por cuatro procesos a saber (Figura 1):

Proceso 1-2: Compresión isotérmica: Se rechaza calor del fluido de trabajo hacia el exterior (a T-mínimo constante).

Proceso 2-3: Compresión a volumen constante: Transferencia de calor del regenerador hacia el fluido de trabajo.

Proceso 3-4: Expansión isotérmica: Transferencia de calor del exterior al fluido de trabajo (a T-máximo constante).

Proceso 4-1: Expansión a volumen constante: Se rechaza calor del fluido de trabajo hacia el regenerador.

Si el calor transferido en el proceso 2-3 tiene la misma magnitud que en el proceso 4-1, entonces los únicos pasos de calor entre el motor y el ambiente serán: a) el calor transferido a la temperatura constante máxima (T-máx, o sea, T₃); y b) el calor rechazado a la temperatura constante mínima (T-mín, o sea, T₂). Este aporte y rechazo de calor a temperatura constante satisface el requerimiento de la segunda ley de la termodinámica para la máxima eficiencia térmica, por lo que la eficiencia térmica teórica de un ciclo Stirling sería igual a la del ciclo de Carnot, con lo cual se cumple que:

$$\eta = \frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}}{T_{\text{máx}}}$$

La principal ventaja que tiene el ciclo Stirling sobre el ciclo Carnot radica en el reemplazo de los dos procesos isoentrópicos de compresión y expansión por dos proce-

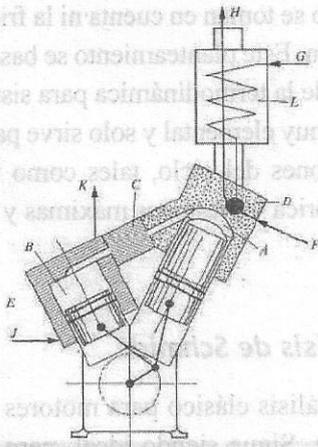
... a volumen constante, lo que incrementa el área en el diagrama presión-volumen y, por tanto, permite obtener más trabajo en el ciclo Stirling que en el de Carnot, de manera que no habría necesidad de que el ciclo Stirling trabajara a presiones tan altas como en un hipotético ciclo de Carnot para alcanzar el mismo trabajo útil de salida.

2.2 Ciclo real

En cualquier motor real, factores tales como fricción entre el cilindro y el pistón, fricción aerodinámica del fluido de trabajo, y el comportamiento no perfecto del regenerador, hacen que la eficiencia térmica del ciclo disminuya en comparación con el ciclo teórico.

Como se indicó en el ciclo ideal, se usan como dispositivos mecánicos dos cilindros en direcciones opuestas, con el regenerador entre ellos. La configuración de los pistones puede tener muchas variaciones mecánicas. Una aplicación funcional de un motor de dos pistones se muestra en la Figura 2. Este consiste en un motor en V, con sus dos pistones acoplados a un mismo cigüeñal [1].

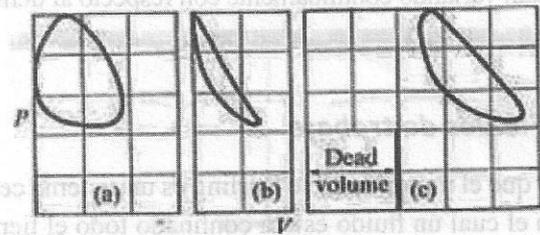
Figura 2. Diagrama de un motor Stirling funcional de cilindros en V.



A: Zona de expansión, B: Zona de compresión, C: Regenerador, D: Calentador, E: Enfriador, F: Entrada de combustible, G: Entrada de aire para la combustión, H: Productos de salida de la combustión, J: Entrada de refrigerante (agua fría), K: Salida refrigerante (agua caliente), L: Sistema de precalentamiento del aire de entrada.

En la operación de este motor existe una importante desviación del ciclo ideal debido al movimiento de los pistones. En la Figura 3 se muestran los diagramas presión-volumen de las zonas de expansión, compresión y trabajo de un motor Stirling real. Los cuatro procesos del ciclo ideal no se ven bien definidos ya que en este diagrama no se muestra la variación del volumen de manera ideal, como en la Figura 1, sino de manera real, o sea, con una variación sinusoidal con respecto al eje del cigüeñal [1].

Figura 3. Diagramas presión-volumen de un motor real.



a) Diagrama de la zona de expansión, b) Diagrama de la zona de compresión, c) Toda la zona de trabajo.

El ciclo de trabajo total (Figura 3c) está corrido hacia la derecha del eje de presión en el diagrama presión-volumen de toda la zona de trabajo, en comparación con los otros dos diagramas, debido al volumen muerto que debe existir en el motor. Este es un concepto de mucha importancia en el motor Stirling que corresponde a la cantidad de volumen que está dentro del motor y que no produce trabajo. Este volumen se encuentra dentro de los intercambiadores de calor y en el sistema de tubería que conecta las partes del motor. El volumen muerto hace disminuir la eficiencia del motor.

2.3 El regenerador

El regenerador es la parte más importante del motor Stirling, dado que es el elemento que le añade calor en los procesos críticos del ciclo. Conceptualmente, el funcionamiento del regenerador es sencillo, pues funciona a modo de un acumulador térmico de manera análoga a un condensador en un circuito eléctrico o a un volante de inercia en

un sistema mecánico. Por tanto, cuando el motor necesita rechazar energía del sistema, se la añade al regenerador; la temperatura pasa de T-máx a T-mín, y luego, cuando el fluido de trabajo necesita calor, el regenerador le suministra el previamente almacenado y esto hace que la temperatura del ciclo aumente de T-mín a T-máx.

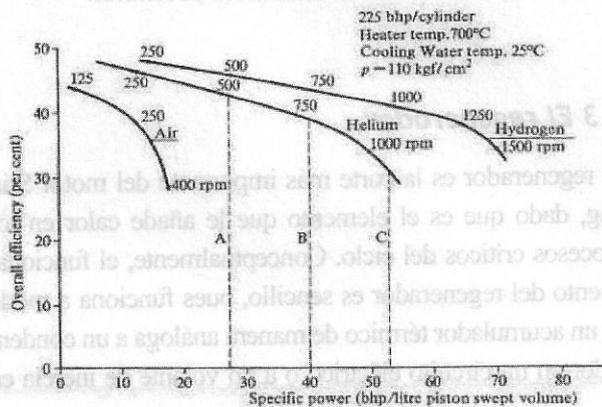
El diseño del regenerador en un motor Stirling corresponde a un análisis muy complejo, debido, entre otras causas, a la complicada geometría con la cual se construye y a que todas las variables del proceso (la temperatura, la presión, el volumen específico y la viscosidad del fluido de trabajo) están variando continuamente con respecto al tiempo.

2.4 Fluidos de trabajo

Dado que el motor de ciclo Stirling es un sistema cerrado en el cual un fluido estará confinado todo el tiempo en su interior, es necesario determinar las características de funcionamiento que tendrá el motor, dependiendo del fluido de trabajo que se encuentre en este.

El fluido de trabajo más usado es el aire, por ser el más abundante en la naturaleza y por su fácil utilización; sin embargo, viéndolo desde un punto de vista energético, es muy poco eficiente en comparación con otros fluidos, como el hidrógeno o el helio. En la Figura 4 se muestran el rendimiento y las características de rendimiento de los tres tipos de fluidos de trabajo [1].

Figura 4. Comparación de la eficiencia del ciclo con diferentes fluidos de trabajo.



Como se puede observar, el fluido que tiene mejor comportamiento es el hidrógeno, lo cual lo convierte en la mejor opción desde el punto de vista energético. Sin embargo, problemas como su alta inflamabilidad y sus efectos corrosivos a altas temperatura hacen que su uso requiera cuidado. El helio es una muy buena opción, pues genera buena eficiencia y es un gas inerte, por lo que no trae mayores problemas de seguridad en cuanto a su manipulación; sin embargo, su alto costo con respecto al aire y al hidrógeno limitan su uso. Para aplicaciones de baja eficiencia y potencia bajas, es buena opción utilizar el aire como fluido de trabajo, pero en aplicaciones más exigentes es mejor utilizar fluidos como el helio o el hidrógeno.

2.5 Análisis del ciclo Stirling

2.5.1 Análisis ideal del ciclo Stirling

La principal deficiencia del ciclo ideal es que se asume que todo el fluido de trabajo está instantáneamente en cualquiera de las dos zonas, la de compresión y la de expansión. Esto hace que se asuma que el volumen del regenerador y de los ductos de comunicación debe ser cero. Los procesos de expansión y de compresión son asumidos como isotérmicos y la regeneración, como perfecta, y no se toman en cuenta ni la fricción ni las caídas de presión. Este planteamiento se basa en el uso de la primera ley de la termodinámica para sistemas cerrados, que lo hace muy elemental y solo sirve para brindar unas básicas nociones del ciclo, tales como trabajo teórico, eficiencia teórica y presiones máximas y mínimas.

2.5.2 Análisis de Schmidt

Este es el análisis clásico para motores con base en el ciclo Stirling. Sigue siendo ideal, pero ya se tiene en cuenta el movimiento armónico de los elementos recíprocos y la manera como posiblemente variará la presión en el sistema. Sin embargo, retiene las hipótesis fundamentales del análisis termodinámico básico, que estiman que tanto la expansión como la compresión

sión son isotérmicas y que el regenerador funciona de manera ideal. Con este análisis se pueden determinar valores tales como variación de la presión, variación de los volúmenes de compresión y expansión, y la presión teórica del ciclo, entre otros.

- Principales suposiciones del análisis Schmidt:

- El proceso es regenerativo y perfecto.
- La presión en un mismo momento es la misma para todo el sistema.
- El gas de trabajo obedece la ecuación de $PV = mRT$.
- No hay fugas del fluido, por tanto, este permanece constante.
- Las variaciones de volumen ocurren de manera sinusoidal, lo que significa que varía de manera sinusoidal con respecto al ángulo del cigüeñal.
- La temperatura en la pared del cilindro permanece constante.
- La velocidad de la máquina permanece constante.

Estas suposiciones son la columna vertebral del proyecto, ya que gracias a eso se puede obtener el diagrama presión-volumen del motor, muy útil para calcular la fuerza que ejerce el gas sobre los elementos o el calor que necesita la máquina para funcionar, entre otras variables.

2.5.3 Métodos de diseño de primer orden

Son los más básicos y en ellos se aglomeran las variables más significativas del motor, como temperatura, presión media y velocidad estimada. Los más representativos son el número de Beale y el método de predicción de Koichi Hirata.

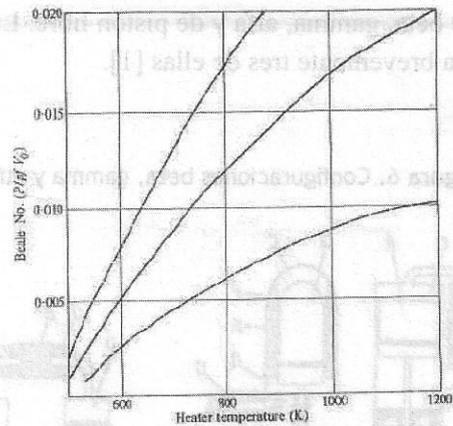
El método del número de Beale indica que aproximadamente todos los modelos de motores Stirling tienen un

número adimensional, completamente relacionado con la temperatura del foco caliente, como lo ilustra la Figura 5 [1]. En esta figura se presenta en el eje X la temperatura del foco caliente y en el eje Y el número de Beale. En la Figura 5 se muestran dos trazos, entre los cuales se encuentran los valores característicos del número de Beale; adicionalmente, se tiene una línea continua que representa los valores típicos de este número. La expresión que involucra el número de Beale es la siguiente:

$$P = Be.P_{media}.V_o.f$$

Donde P es la potencia (Watts), Be es el número de Beale, V_o es el volumen en el cilindro de expansión (cm^3), f es la frecuencia de rotación del motor (Hertz), P_{media} es la presión media del ciclo-(bar).

Figura 5. Variación del número de Beale en función de la temperatura.



El método de Koichi Hirata plantea ciertas expresiones desarrolladas experimentalmente que involucran la presión media, la temperatura del foco frío y caliente y las propiedades físicas del fluido de trabajo, como la constante del gas y la viscosidad, que dan como resultado la velocidad angular del motor y la potencia de salida. Este método es muy útil para tener una idea de los parámetros de salida del motor. Efectivamente, se usó este método para obtener una aproximación de la potencia

de salida del motor y su velocidad angular: su potencia fue de 1.15 Watts y la velocidad angular fue de 83 rad/seg .

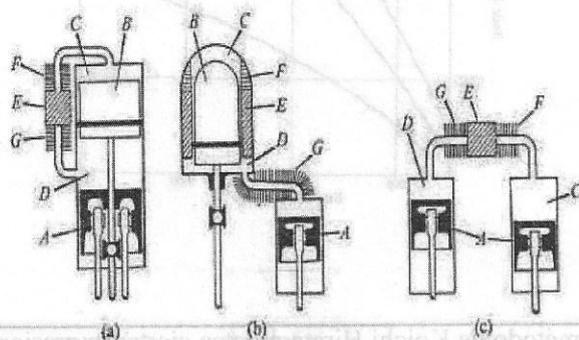
2.5.4 Métodos de diseño de segundo orden

Estos métodos son más complejos, desde el punto de vista físico y matemático, pues analizan los procesos termodinámicos y físicos que suceden dentro del motor, con el fin de optimizarlo. Por ejemplo, es posible analizar las pérdidas de presión que suceden dentro de los intercambiadores de calor, las pérdidas energéticas debido a la fricción aerodinámica, la forma aproximada del proceso de intercambio de calor en el interior del regenerador, entre muchos procesos que se desarrollan dentro del motor.

2.6 Configuraciones básicas del motor Stirling

El motor Stirling tiene muchas configuraciones posibles. Se toman aquí las cuatro más importantes, denominadas beta, gamma, alfa y de pistón libre. La Figura 6 explica brevemente tres de ellas [1].

Figura 6. Configuraciones beta, gamma y alfa.



a) Configuración beta, b) Configuración gamma, c) Configuración alfa; A: Pistón de potencia, B: desplazador, C: Espacio de expansión, D: Espacio de compresión, E: Regenerador, F: Calentador, G: Sistema de enfriamiento.

2.6.1 Configuración beta o coaxial

Esta fue la primera configuración del motor con base en el ciclo Stirling que existió y fue la que diseñó el mismo Robert Stirling. La configuración beta, Figura 6a, tiene como característica principal que tanto el espacio de compresión como el de expansión están en el mismo cilindro, lo cual es una ventaja pues ocupa menos espacio; es más compacto y disminuye al máximo el volumen muerto. En este motor aparece el concepto de desplazador, que consiste de un pistón que ayuda a desplazar el fluido del foco caliente al frío o viceversa, y, dependiendo del diseño y la holgura existente entre el desplazador y su camisa, puede funcionar como regenerador. También lo compone un pistón de potencia, que es el que en realidad mueve el motor debido a que en este la presión ejerce la fuerza, aunque su principal inconveniente está en su fabricación, que es compleja debido al mecanismo que debe existir para sincronizar el pistón con el desplazador.

2.6.2 Configuración gamma

Básicamente, la configuración gamma es la misma beta, salvo que posee dos cilindros; en uno de ellos se aloja el desplazador y en el otro se aloja el pistón de potencia (Figura 6b). Esta configuración es fácil de fabricar y operar debido a que los sellos se encuentran en la zona fría del motor, lo cual hace más sencilla la función de sellar. La desventaja que tiene con respecto a las otras configuraciones es que se aumenta el volumen muerto, lo cual disminuye la eficiencia de la máquina.

2.6.3 Configuración alfa

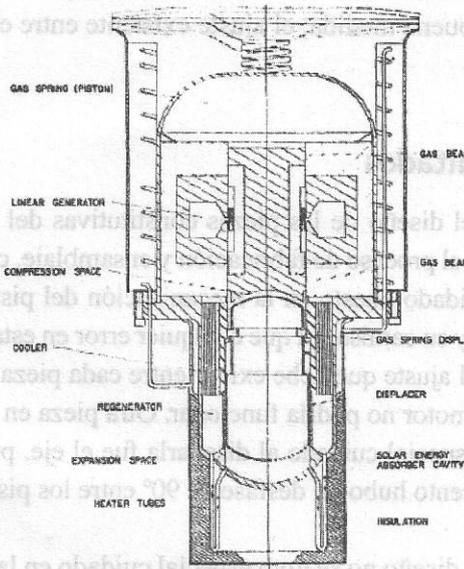
La configuración alfa (Figura 6c) se caracteriza por ser la única en la cual existen dos pistones de potencia. Ambos pistones realizan trabajo sobre el eje y están perfectamente definidos: en uno se encuentra el espacio de compresión y en el otro el espacio de expansión, lo cual los hace más eficientes en comparación con las otras configuraciones. El principal inconveniente es la

dificultad de sellado del motor, pues uno de los sellos siempre se encontrará en la zona caliente del motor.

2.6.4 Motor Stirling de pistón libre

Un motor Stirling de pistón libre posee una configuración en la cual el movimiento reciprocante no es realizado por dispositivos mecánicos, sino por las fuerzas del fluido y las fuerzas de interacción dinámicas entre los componentes. La energía en este tipo de máquinas se extrae de un generador lineal (Figura 7) [1]. Las ventajas de este tipo de motor están en su bajo costo de producción (véase [1]), en el autoencendido y en la larga vida útil, que lo hacen idóneo para aplicaciones termoeléctricas. Entre sus desventajas se encuentran la dificultad de diseño y los sofisticados métodos de control.

Figura 7. Motor Stirling de pistón libre.



2.7 Selección de la mejor alternativa

Para seleccionar la mejor opción se decidió realizar un sistema de valoración que tuvo en cuenta cinco criterios: facilidad de diseño, facilidad de construcción, eficiencia del motor, espacio y facilidad de manteni-

miento; adicionalmente, se definió un sistema de calificación de 0 a 3, donde 0 es malo o complicado, 1 es regular, 2 es bueno, 3 es excelente.

2.7.1 Configuración seleccionada

Después de efectuar la valoración de los cinco criterios escogidos (Tabla 1), se seleccionó la configuración gamma por obtener la mejor evaluación, correspondiente a 12 puntos.

2.8 Diseño mecánico

El diseño mecánico es la síntesis de toda la teoría anterior. Es necesario hacer los análisis descritos para poder obtener las cargas y ambientes en que funciona el motor. Una vez se seleccionó la configuración gamma, se procedió a escoger el mecanismo que le daría el movimiento a los pistones y los sincronizaría. Para este caso se eligió el mecanismo de manivela corredera, por la facilidad que tiene para determinar sus cargas producto de las fuerzas dinámicas y de las fuerzas del gas, y por su facilidad de balanceo y su sencillez en el proceso de fabricación y posterior ensamblaje.

Una vez identificado el mecanismo a utilizar, se procedió a realizar un diseño preliminar de las piezas, considerando únicamente el análisis cinemático; después se pasó a un análisis dinámico del mecanismo y, por último, a validar las piezas con este diseño preliminar. Para saber si soportaban las cargas, se realizó un análisis de resistencia de materiales asumiendo que la mayoría de las piezas estaban sometidas a cargas cíclicas, y para ello se asumió la velocidad angular del motor como constante.

A continuación se describe brevemente cada pieza con valor relevante en el motor.

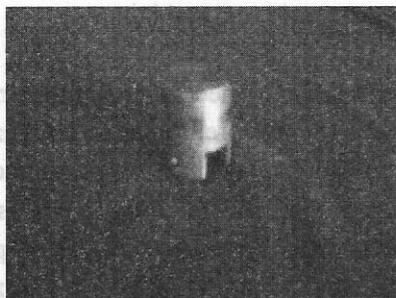
Tabla 1. Comparación de diferentes configuraciones para la selección de la mejor alternativa.

Configuración del motor	Beta	Gamma	Alfa	Pistón libre
Facilidad de diseño	1	3	2	0
Facilidad de construcción	2	3	1	3
Eficiencia del motor	2	1	3	2
Espacio	3	2	2	3
Facilidad de mantenimiento	1	3	1	2
Puntaje total	9	12	9	10

2.8.1 Pistón de potencia

El pistón y la camisa son de las piezas más importantes del motor, por ser los elementos que contienen el gas y permiten mantenerlo confinado. Se decidió que el material del pistón tuviese un coeficiente de fricción muy bajo y fuese autolubricante, de modo que permitiera un ajuste preciso con la camisa. Por esta razón se escogió el bronce al fósforo SAE 40.

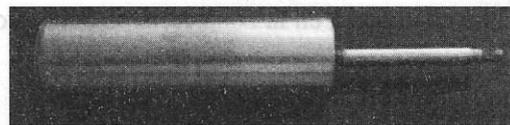
Figura 8. Pistón de potencia.



2.8.2 Desplazador

El desplazador, por ser la pieza que mueve el aire del foco frío al foco caliente, o viceversa, se necesitaba de un material con un bajo coeficiente de transferencia de calor así como un bajo coeficiente de expansión térmica; y por esta razón se escogió el acero inoxidable AISI 304.

Figura 9. Desplazador.



2.8.3 Camisa desplazador

La camisa en el desplazador se fabricó en acero AISI 1020. Acá no se tuvo ninguna consideración en especial, dado que esta pieza no está sometida a grandes cargas mecánicas ni tiene algún ajuste de relevancia.

2.8.4 Camisa pistón de potencia

Para esta camisa se escogió el mismo material del pistón de potencia (bronce SAE 40), de tal manera que, al aumentar la temperatura del aire y calentarse las piezas, ambas se calentarán de la misma manera y no se perderá, en buena medida, el ajuste existente entre ellas.

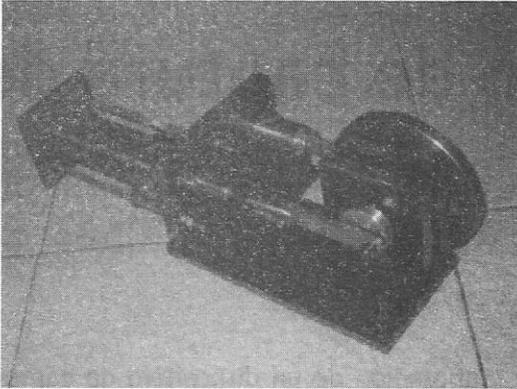
3. Resultados

Luego del diseño de las piezas constitutivas del motor comenzó el proceso de fabricación y ensamblaje, con especial cuidado puesto en la mecanización del pistón de potencia y su camisa, ya que cualquier error en esta parte dañaría el ajuste que debe existir entre cada pieza y, por tanto, el motor no podría funcionar. Otra pieza en la que se tuvo especial cuidado al diseñarla fue el eje, pues en este elemento hubo un desfase de 90° entre los pistones.

Para este diseño no se tuvo especial cuidado en la construcción de los intercambiadores de calor. De acuerdo con el alcance del trabajo, se decidió usar como foco caliente la misma camisa del desplazador, y como fuente de calor se usó un soplete que funciona a base de propano, para transmitirle calor; para el foco frío se usó una camisa refrigerada con agua.

Luego de haberse construido todas las partes del motor, se procedió a realizar el montaje (Figura 10).

Figura 10. Foto del ensamble del motor.



Entre los principales problemas que se presentaron en la fabricación y posterior montaje del prototipo de motor Stirling de configuración gamma se destaca la dificultad para determinar el ajuste entre la camisa y el pistón y el sellado en el vástago.

4. Conclusiones

- El motor de ciclo Stirling es una muy buena opción en lo que respecta al uso de energías alternativas, dado que se puede trabajar con cualquier fuente de calor.
- El diseño de un motor más eficiente requiere el diseño de otros materiales que permitan el perfecto sellamiento del motor y una muy buena transferencia de calor en los lugares que se requiera.
- Es una tecnología que en las actuales condiciones de dependencia de los recursos no renovables merece ser rescatada y explotada.

5. Recomendaciones

- Es una muy buena opción para que otros estudiantes de tecnología sigan desarrollando este y otros prototipos, como el motor de pistón libre, ya que integraría varios proyectos curriculares.
- Es necesario investigar y desarrollar tecnologías que permitan un mejor sistema de sellado en el motor.
- Es importante la implementación de un sistema adecuado de medición de las variables que intervienen en el motor y poder monitorearlas constantemente.

Referencias

- [1] W. Graham. *Stirling engines*. EE.UU.: Oxford University Press, 1980, 530 p.
- [2] Allan Organ. *The regenerator and the stirling engine*. Gran Bretaña: MEP, 1997, 623 p.
- [3] William R. Martini. *Stirling engine design manual*. Cleveland: NASA, 1983, 409 p.
- [4] R. L Norton. *Diseño de máquinas*. México: Prentice Hall, 1999.
- [5] Robert L. Mott. *Diseño de elementos de máquinas*, ED. México: Prentice-Hall, 2004.
- [6] R. L. Norton. *Diseño de maquinaria*, 3 ed. México: McGraw-Hill, 2005.
- [7] En línea (12 de enero de 2009): <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata>
- [8] En línea (12 de enero de 2009): <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/me422.html>
- [9] En línea (12-2-2009): <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=dfced4f11d63459e8ef8733d1c7c1ad2&ckck=1>