

DEMO 186

MOTOR DE STIRLING



Autor de la ficha	Bertran Mollà Bononad, Enric Valor i Micó, Raquel Niclòs Corts, Lluís Pérez Planells
Palabras clave	Maquina térmica, ciclo termodinámico, motor de combustión externa, transformación de energía
Objetivo	Mostrar la transformación de energía térmica en energía mecánica mediante un motor de Stirling
Material	Motor de Stirling, taza, agua caliente y/o hielo
Tiempo de Montaje	5 minutos

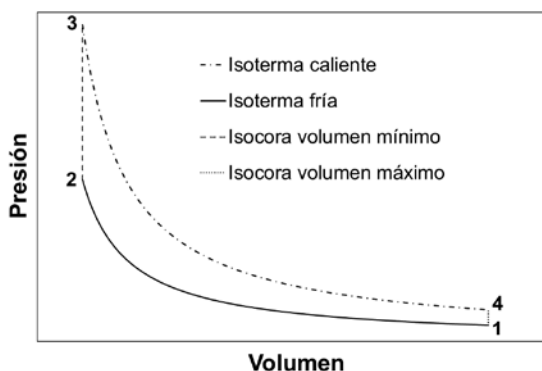
Descripción

Contexto histórico

El siglo XVIII marca el inicio de la Revolución Industrial en Gran Bretaña con la introducción de la máquina de vapor de James Watt en 1769, lo que llevó a cambios económicos que se difundieron a lo largo del siglo XIX en el resto del continente europeo. En este contexto de desarrollo tecnológico, Robert Stirling desarrolló en 1816 su motor como una alternativa a las peligrosas máquinas de vapor de su época. Sin embargo, este quedó en un segundo plano tras la aparición de los motores de combustión interna en la segunda mitad del siglo XIX y no fue hasta mediados del siglo XX cuando comenzó a tener de nuevo una mayor popularidad [1].

Ciclo de Stirling

El motor de Stirling sigue un ciclo termodinámico formado por 4 procesos: una expansión y compresión isotermas y dos transferencias de calor isocóricas. La Figura 1 muestra el ciclo de Stirling en un diagrama presión – volumen.



Los procesos del ciclo de Stirling mostrados en la Figura 1 son:

- Proceso 1-2: compresión a temperatura constante (proceso isoterma). Se cede calor al exterior.
- Proceso 2-3: absorción de calor a volumen constante (proceso isócoro).
- Proceso 3-4: expansión a temperatura constante (proceso isoterma). Se absorbe calor de la fuente externa.
- Proceso 4-1: cesión de calor a volumen constante (proceso isócoro).

Figura 1: Diagrama P-V del ciclo de Stirling

Podemos calcular el rendimiento del ciclo del motor, el cual se define como $\eta_{St} = \frac{W_{neto}}{Q_{abs}}$ donde W_{neto} es el trabajo neto llevado a cabo sobre el entorno y Q_{abs} es el calor absorbido a lo largo de un ciclo. Suponiendo el comportamiento de un gas ideal en el interior del cilindro y haciendo uso de la ecuación de estado del gas ideal ($PV = nRT$) podemos calcular el W_{neto} como:

$$W_{neto} = W_{12} + W_{34} = - \int_1^2 PdV - \int_3^4 PdV = -nR(T_{max} - T_{min}) \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (1)$$

donde n es el número de moles, R es la constante de gas ideal, T_{max} y T_{min} son la temperatura máxima y mínima de funcionamiento del motor, y V_{max} y V_{min} son el volumen máximo y mínimo en el interior del cilindro. Por otro lado, calculamos el calor absorbido como:

$$Q_{abs} = Q_{23} + Q_{34} \quad (2)$$

Dado que el proceso 23 es isócoro, el calor absorbido será igual a la variación de energía interna. Por otra parte, dado que el proceso 34 es isoterma, la variación de energía interna es nula y, por lo tanto, el calor en dicho proceso es igual al trabajo. Teniendo esto en cuenta, el calor absorbido durante el ciclo se obtiene como:

$$Q_{abs} = nc_v(T_{max} - T_{min}) + nRT_{max} \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (3)$$

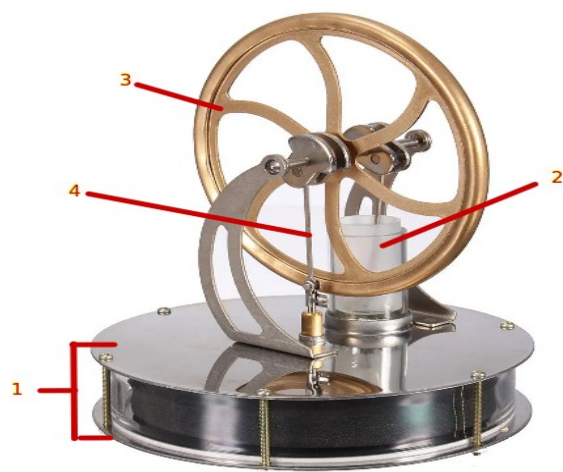
donde c_v es el calor molar a volumen constante del gas. De esta manera, el rendimiento del ciclo de Stirling se determina como:

$$\eta_{St} = \frac{|W_{neto}|}{Q_{abs}} = \frac{R(T_{max} - T_{min}) \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)}{c_v(T_{max} - T_{min}) + RT_{max} \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)} \quad (4)$$

Cabe añadir que a las máquinas que funcionan con el motor de Stirling se les suele añadir un regenerador, un componente que tiene como función almacenar el calor cedido por el gas durante el proceso de enfriamiento de forma que lo pueda devolver al sistema en el proceso de calentamiento. Si definimos la eficiencia del regenerador como $\eta_R = \frac{Q_{devuelta}}{Q_{cedida}}$, el rendimiento del ciclo del motor de Stirling se obtiene como:

$$\eta_{St} = \frac{W_{neto}}{Q_{abs}} = \frac{R(T_{max} - T_{min}) \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)}{(1 - \eta_R)c_v(T_{max} - T_{min}) + RT_{max} \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right)} \quad (5)$$

De esta manera, cuando tenemos un regenerador ideal, $\eta_R \rightarrow 1$, la eficiencia del ciclo es la misma que la del ciclo de Carnot [2].



Funcionamiento del motor

La figura 2 muestra el modelo de motor de Stirling utilizado en esta demostración. Para poner el motor en funcionamiento es necesario crear una diferencia de temperatura significativa entre las dos placas metálicas, las cuales consideramos como foco caliente y foco frío, respectivamente. Esta diferencia de temperatura se consigue poniendo una taza de agua caliente, o bien muy fría, debajo de la base metálica, que actúa como uno de los focos, siendo el otro el ambiente. Es recomendable hacer uso de agua caliente, puesto que se consigue una diferencia de temperatura mayor entre el foco caliente y el foco frío, el cual está a temperatura ambiente, y de este modo el rendimiento del motor será mayor.

Figura 2: Motor de Stirling. Las partes del motor son: 1. Cilindro primario con bases metálicas y cara lateral de plástico, dentro está el pistón; 2. Cilindro secundario y pistón; 3. Volante de inercia; 4. Biela-manivela.

Una vez se ha logrado una diferencia de temperatura suficiente entre los dos focos, el motor empezará a funcionar siguiendo el siguiente proceso que consiste en 4 movimientos o etapas (suponemos que estamos haciendo uso de agua caliente):

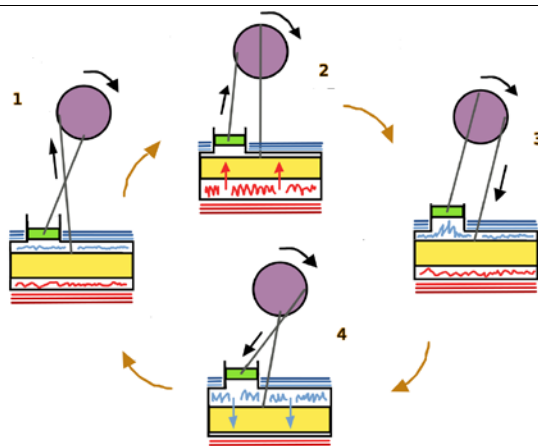


Figura 3. Esquema del funcionamiento del motor de Stirling.

Etapa 1. La placa inferior del cilindro transfiere el calor del agua (foco caliente) al aire dentro del cilindro primario que está inmediatamente encima. Las placas metálicas garantizan una buena conductividad térmica desde el foco, que es del orden de $10^2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [3]. Esto posibilita que la transmisión de calor hacia el aire en el interior del cilindro se produzca con la suficiente rapidez como para que este proceso sea, aproximadamente, a volumen constante, aumentando así tanto la presión como la temperatura (proceso 2-3 de la Figura 1; posición 1 en la Figura 3).

Etapa 2. Una vez el aire ya ha logrado el equilibrio térmico con el foco caliente igualando su temperatura, esta será la temperatura máxima del funcionamiento del motor, el aire se expande reduciendo su presión (proceso 3-4 de la Figura 1; posición 2 en la Figura 3) y desplazando ambos pistones hacia arriba. Estos transmiten su movimiento mediante las bielas-manivelas al volante, que empieza a girar. Es importante destacar que las bielas se encuentran desfasadas 90° para maximizar la transferencia de momento y garantizar que el volante tenga suficiente energía como para continuar su movimiento.

Etapa 3. El movimiento del volante desplaza los pistones hasta situarlos en una situación análoga a la posición 1, pero esta vez con el foco frío para llevar a cabo el proceso inverso: el aire dentro del pistón entra en contacto con la placa metálica superior que se encuentra a temperatura ambiente, es decir, con el foco frío. El aire interno cede calor al exterior, enfriándose y disminuyendo su presión manteniendo un volumen constante (proceso 4-1 de la Figura 1; posición 3 en la Figura 3).

Etapa 4. Finalmente, el aire se ha enfriado hasta lograr la temperatura del foco frío, esta será la temperatura mínima del funcionamiento del motor, y en este movimiento contrae su volumen empujado por el retroceso del pistón, aumentando así su presión (proceso 1-2 de la Figura 1; posición 4 en la Figura 3). Esta contracción, junto con el movimiento de las bielas-manivelas, mueve los pistones hacia bajo, transfiriendo energía suficiente al volante y devolviendo el sistema a la posición inicial para empezar otra vez el ciclo.

Sugerencias

Siempre que sea posible, intentar emplear agua caliente ya que el rendimiento del motor es mayor y, consecuentemente, su funcionamiento es más fluido. Se suele obtener un mejor funcionamiento que con el uso de agua fría/hielo.

Generalmente es necesario iniciar el movimiento de forma manual dando un ligero empuje al volante; a partir de ese momento, así una vez empieza, permanece activo durante unos minutos.

Advertencias

Si se utiliza agua caliente, hay que tener en cuenta que la placa inferior se calentará después de un tiempo. Hay que tener precaución de no quemarse y utilizar un guante si se considera oportuno para su manipulación.

Bibliografía

- [1] Maier, C., Gil, A., Aguilera, R., Shuang, L. & Yu, X. (2007) 'Stirling Engine', University of Gävle, p5-7 [online]. Disponible en:
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.993&rep=rep1&type=pdf>
(Acceso: 12/10/2022)
- [2] Çengel A. Y., Boles, M. A. & Kanoglu, M. (2019) 'Thermodynamics: an Engineering Approach', McGraw-Hill Education, 9th Edition, pp. 493-496.
- [3] Tipler, P. A. & Mosca, G. (2010) 'Física para la ciencia y la tecnología', Editorial Reverte, 6ª Edición, Vol. 1, p. 676.

Cuestionario

- 1.- El motor de Stirling es un ejemplo de:
 - a) Máquina térmica
 - b) Motor de combustión externo
 - c) Máquina reversible
 - d) Todas las respuestas son correctas
- 2.- La eficiencia de un ciclo de Stirling ideal es la misma que la de un:
 - a) Ciclo de Otto
 - b) Ciclo de Carnot
 - c) Ciclo Diésel
 - d) Ciclo de Brayton
- 3.- El motor de Stirling genera un trabajo:
 - a) Mayor que el calor absorbido del foco caliente
 - b) Igual que el calor absorbido del foco caliente
 - c) Menor que el calor absorbido del foco caliente
 - d) Mayor o menor en función del calor absorbido y en función de la temperatura ambiente
- 4.- El rendimiento ideal del motor de Stirling será mayor:
 - a) A mayor temperatura del foco caliente
 - b) A menor temperatura del foco frío
 - c) A mayor diferencia de temperatura entre focos
 - d) Todas las respuestas son correctas
- 5.- Un motor de Stirling tiene un foco frío de hielo seco a -85°C que interactúa con un foco caliente a 37°C . Aproximadamente, ¿cuál es su rendimiento ideal?
 - a) 39%
 - b) 49%
 - c) 59%
 - d) 69%
- 6.- Un motor de Stirling realiza un trabajo de 0.72 J en un ciclo completo, absorbiendo 3.6 J del foco caliente. Su rendimiento aproximado será de:
 - a) 10%
 - b) 15%
 - c) 20%
 - d) 25%