

PROYECTO MOTOR STIRLING

Bergesio, Agustín

Yacob, Santiago

Director de proyecto: Ing. Jorge Pruvost

*Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela
M. Acuña 49, 2300 Rafaela, Santa Fe, Argentina*

Palabras claves: Stirling, motor, energía

RESUMEN

En esta investigación hemos detectado que el ciclo Stirling real se aparta del ideal, puesto que cuando se produce la expansión en la cámara caliente, el pistón de la cámara fría sigue desplazándose hacia abajo (P.M.I) con lo que suponemos que parte de la masa que debería estar expandiéndose en el cilindro caliente pasa a la cámara fría, lo que restaría masa caliente en expansión, es decir, menos trabajo.

Nuestra hipótesis de trabajo radica en lograr que el pistón de la cámara fría permanezca lo más próximo a la posición de P.M.S, de esta manera el reflujo másico se reducirá.

Para ello hemos diseñado el motor que cuenta con un tren de engranajes que relaciona los dos cigüeñales (uno por cada pistón) para poder variar el ángulo de desfase entre los pistones y experimentar la influencia que tiene dicha variación sobre el trabajo y el rendimiento obtenido. Actualmente los motores utilizan 90° de desfase entre sus pistones.

También hemos tratado de predecir el resultado en forma teórica, lo cual es el motivo de este trabajo.

INTRODUCCIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR STIRLING DESARROLLADO

Después de evaluar los parámetros de los motores Stirling existentes, definimos para nuestro desarrollo, los parámetros básicos de diseño que consideramos factibles desde el punto de vista técnico-económico:

Condiciones de trabajo:

- Fluido: en primera instancia aire y luego helio.
- Temperatura máxima del gas en la cámara caliente: 400 °C.
- Temperatura del gas en la cámara fría 100 °C.
- Presión máxima del gas en la cámara caliente: 50 bar.

Por tratarse de la máquina prototipo y no tener ninguna experiencia previa se optó por acotar el valor de la presión máxima a un valor intermedio 50 bar y la temperatura del gas en la fuente caliente a 400°. Realizando una apuesta a poder lograr un buen rendimiento en base a mejoras en el ciclo real de la máquina, como ya se explicó; estos valores arrojarían los siguientes resultados termodinámicos:

El trabajo de expansión sería de 98848,818 [Kg/kg], el trabajo de compresión -54785,452[Kg/kg] ; siendo entonces el *trabajo útil* de 44063,366 [Kg/kg].

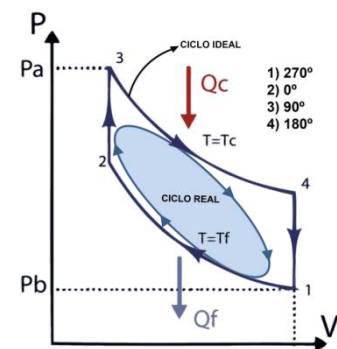


Figura 1. Ciclos Stirling.

Como se observa la potencia teórica surge de multiplicar el trabajo específico por el gasto o caudal másico, arrojando un valor de 8,16 KW.

Si partimos de que en los casos relevados obtuvieron un rendimiento del orden del 60% del teórico, podemos estimar la potencia de la máquina en 5 KW, o sea un rendimiento real igual a 0,267.

Tabla 4. Cálculo de potencia

MASA QUE EVOLUCIONA		POTENCIA	
m =	0,00075 Kg	$N_{3-4} =$	18,28 KW
VEL. ROT.=	1500 R.P.M	$N_{eje} =$	11,07 CV
GASTO =	0,019 Kg/s	$N =$	8,15 KW
		$N_{real} =$	5 KW

OBJETO DE ESTE ESTUDIO
 Nuestra hipótesis de trabajo radica en lograr que el pistón de la cámara fría permanezca lo más próximo a la posición de P.M.S, de esta manera el reflujo másico se reducirá.

La cantidad de trabajo a obtener en cada embolada dependerá fundamentalmente de la cantidad de masa que se expanda en la cámara caliente. Esta expansión se dará entre los 90° y 180° de ángulo de giro del cigüeñal, para nuestro estudio utilizaremos como base el cigüeñal del pistón caliente.

Como ya hemos mencionado, el motor ha sido diseñado con el fin de poder experimentar la influencia del ángulo de desfase entre los dos pistones sobre el trabajo y el rendimiento obtenido.

Por dicha razón nuestro motor cuenta con doble cigüeñal y un tren de engranajes que los relaciona, a fin de poder cambiar el ángulo que para un motor actual es de 90°.

Lo que desarrollamos a continuación es el estudio teórico que nos permita predecir las posibles mejoras obtenibles al variar el desfasaje entre los pistones.

DESARROLLO TEORICO

El objetivo es determinar cómo varía la masa promedio durante la expansión en la cámara caliente, según variamos el ángulo de desfase entre los pistones. Nos interesa particularmente esto, porque como ya hemos mencionado, el trabajo obtenido va a depender de esta cantidad.

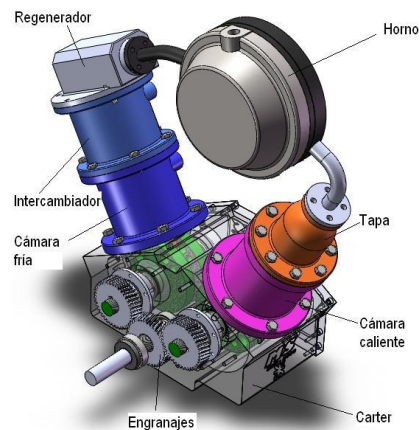
En el diseño original de los motores Stirling de configuración “tipo α ”, el ángulo es fijo y de 90°, y aquí, a nuestro entender, hay un importante reflujo de masa hacia el cilindro frío, (que comienza a moverse hacia abajo), por esto buscaremos estudiar la evolución de masa entre cilindros para cada ángulo de giro de los cigüeñales y, de esta manera, tratar de determinar, el ángulo de desfase óptimo entre estos. También, es útil determinar la masa total de fluido que se encuentra en evolución.

A continuación se realizarán los respectivos cálculos para poder predecir de manera teórica el posible resultado a obtener al variar el desfasaje entre ambos pistones en la puesta en marcha del motor Stirling “Heliogénesis”.

MODELIZACIÓN Y CÁLCULO:

Para nuestro desarrollo teórico deberemos realizar algunas simplificaciones en el modelo a estudiar las cuales se irán mencionando a lo largo del trabajo. No obstante una consideración previa importante es que para el estudio utilizaremos una situación ideal que despreja los volúmenes muertos contenidos en cañerías de unión, horno, regenerador e intercambiador de calor lado frío.

Nos permitimos realizar esta simplificación ya que de considerarlas se aumentaría la complejidad del estudio, es por eso que solo estudiaremos las



variaciones de ambas cámaras.

Somos conscientes que un estudio detallado va a ser necesario a posteriori porque suponemos que esta masa trabajará como un gran amortiguador. Un efecto esperable es el retardo en los movimientos de la columna gaseosa que aquí se supondrán instantáneos, debido a los fenómenos de inercia. A bajas velocidades esto puede no ser tan importante, pero si pretendemos que el motor funcione a 1500 rpm seguramente influirá y tendrá repercusión en los resultados prácticos.

Como se puede intuir nuestro cálculo no considera los fenómenos de inercia y supone que los cambios de volúmenes de ambas cámaras son instantáneos y se relacionan en forma simple.

DESCRIPCIÓN:

a) Utilizando planillas de cálculo, se realizó el cálculo del volumen barrido por el émbolo de la cámara caliente en función del ángulo de giro del cigüeñal y se relacionó con el volumen de la cámara fría mediante el ángulo de desfase entre cigüeñales.

- La ecuación de volumen barrido del cilindro de la cámara caliente (C.C.) es:

$$\text{Volumen C.C} = S \cdot \Delta p = R \cdot \Delta p [1 - \cos \phi + (\text{sen}^2 \phi) \cdot \lambda / 2]$$

Dónde:

S = Longitud de desplazamiento del pistón, respecto del P.M.S.

$\Delta p = \pi * r^2 = \pi * 41,05^2 = 5293,9 \text{ mm}^2$. Área de la cabeza, del pistón a utilizar.

$R = 40 \text{ mm}$. Radio de volteo del cigüeñal.

ϕ = ángulo de giro del cigüeñal respecto de la vertical formada en P.M.S

$l = 137,5 \text{ mm}$. Longitud biela de centro a centro de ejes.

$\lambda = (R / l) = (40 / 137,5) = 0,291$. Relación de longitudes biela-manivela

- La ecuación utilizada para relacionar el volumen de la cámara fría (C.F.) con el de la cámara caliente es, considerando:

$$\text{Volumen C.F} = S \cdot \Delta p = R \cdot \Delta p [1 - \cos(\phi - \alpha) + \text{sen}^2(\phi - \alpha) \cdot \lambda / 2]$$

α = ángulo de desfase entre cigüeñales, tomado como la resta del ángulo recorrido por el cigüeñal de la cámara caliente con el ángulo recorrido por el cigüeñal de la cámara fría, la cual siempre nos dará un ángulo positivo. Cabe resaltar que el sentido de giro del cigüeñal se toma como "antihorario".

b) Realización de gráficas de evolución de masas en función del ángulo de giro de los cigüeñales.

Para simplificación del cálculo, partimos de las siguientes hipótesis:

- Las temperaturas del gas, tanto en la cámara caliente como en la cámara fría permanecen constantes (como es en el ciclo ideal) y tienen un valor de 673 °K y 373 °K respectivamente.
- Calculamos la masa total, para el inicio de la expansión en la cámara caliente, pues si depreciamos los volúmenes muertos, en este instante toda la masa estará allí, y se conocen todos los parámetros termodinámicos. Esta situación se da a los 90° de manivela o giro del cigüeñal que se toma como referencia.
- La masa que sigue evolucionando en la cámara caliente resultará la resta entre la masa total y la que retorne a la cámara fría.
- La presión de la cámara fría se considera constante y, para el cálculo, viene dada por una media logarítmica entre la presión máxima y mínima teóricas en esta cámara, calculadas anteriormente en un análisis de ciclo.

$$P_{\text{máx. C.F.}} = 27,71 \text{ bar.}$$

$$P_{\text{mín. C.F.}} = 13,86 \text{ bar.}$$

$$P_{\text{med. Log.}} = \frac{27,71 - 13,86}{\ln(27,71/13,86)} = 19,98 \text{ bar}$$

- La presión máxima se logra cuando el émbolo de la cámara caliente se encuentra a mitad del recorrido de expansión, ya que en ese punto se logra el máximo par motor de la máquina.

Datos:

$$Pres. = 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$Temp. = 400 \text{ }^\circ\text{C} = 673 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Vol. = 242,56 \text{ cm}^3$$

$$R_{\text{gas (He)}} = 211,90 \text{ [Kgcm/Kg. }^\circ\text{K]}$$

De la ecuación de estado de los gases ideales despejamos la densidad y la multiplicamos por el volumen preestablecido de la cámara caliente, así obtenemos el valor de *masa total en evolución*.

$$M_{\text{total}} = \rho \cdot V \Rightarrow M_{\text{total}} = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}$$

$$M_{\text{total}} = \frac{50 \times 242,56}{21190 \times 673} = 0,0008504 \text{ Kg.} = \mathbf{0,8504 \text{ grs}} \quad [1]$$

La masa en la cámara caliente viene dada por la diferencia de masas entre, masa total en evolución y masa de cámara fría.

$$M_{\text{total}} = M_{C.C} + M_{C.f} \Rightarrow M_{C.C} = M_{\text{total}} - M_{C.f}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la ecuación [1] la *masa total que evoluciona es de 0,8504grs.*

Los resultados teóricos obtenidos demuestran que nuestras hipótesis son válidas ya que la masa media en evolución para un *ángulo de desfase de 130 y de 110° son 0,780 grs y 0,733 grs.* Mientras que para un desfase de 90° la masa es 0,632 grs [ver fig.2]. Pudiendo deducir de esta manera, *una mejora del rendimiento de 23,41% y 15,98% respectivamente.*

CONCLUSIONES

De nuestro trabajo podemos llegar a dos *conclusiones una cualitativa y otra cuantitativa.*

La primera nos dice que *si aumentamos el ángulo por sobre los 90° se deberá observar una mejora en rendimiento de la máquina.*

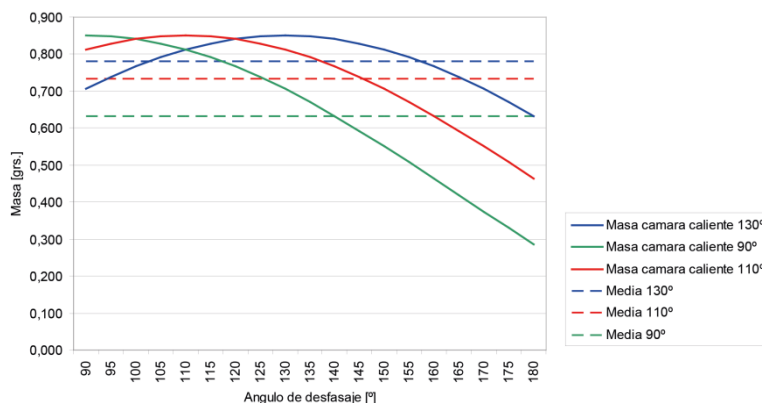


Figura 2. Gráfica comparativa de evolución de masa vs. ángulo

Por otro lado de acuerdo a nuestros cálculos la *mejora obtenible para 130° sería del orden del 23 %.*

Si se comprobara en los ensayos con el motor, el primer punto y parcialmente el segundo, ya podremos decir que nuestro desarrollo teórico ha sido exitoso.