

ANEXO N° 1



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA
Facultad de Ingeniería
Departamento de Mecánica
Ingeniería en Mecánica

Experiencia N°1: “**DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD TÉRMICA DEL MECHERO Y CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DEL MOTOR STIRLING CON EL MEDIDOR DE MOMENTO DE GIRO**”

i. Objetivos:

- Observar detalladamente el funcionamiento de un motor de aire caliente (ciclo Stirling).
- Determinar la capacidad térmica del mechero.
- Interpretar cuantitativamente el diagrama p-V del ciclo.
- Graficar las energías en función de la velocidad de giro.
- Calcular el rendimiento.

ii. Materiales:

- Motor Stirling transparente.
- Medidor de momento de giro.
- Conjunto chimenea y mechero.
- Medidor pVnT.
- Unidad sensor pVn.
- Osciloscopio.
- Termopares.
- Probeta graduada.
- Alcohol de quemar.

- Cables BNC.
- Jeringa para gas 20 ml.
- Cronómetro.

iii. Fundamento teórico:

Una meta importante de la ingeniería es la de desarrollar dispositivos que permitan convertir el calor en trabajo. Mientras que la conversión del trabajo en calor se puede conseguir con un rendimiento del 100 %, la conversión de calor en trabajo viene limitada por el segundo principio de la Termodinámica: “No es posible un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor procedente de un foco y la conversión íntegra de este calor en trabajo, sin producir ningún otro efecto” (enunciado de Kelvin-Planck).

En general, un motor térmico (Fig.1) es un dispositivo mediante el cual un sistema realiza un ciclo en el que absorbe calor de un foco de temperatura alta, cede una cantidad de calor a un foco de temperatura inferior realizando un trabajo sobre el exterior.

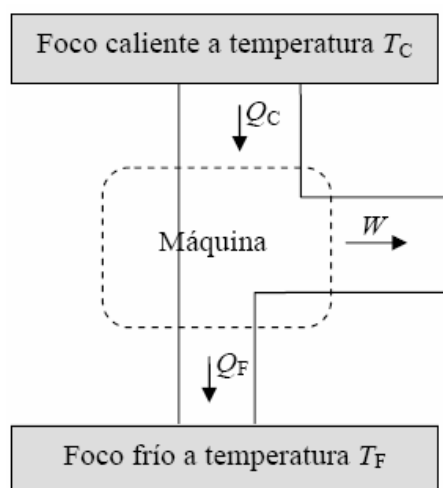


Fig.1 Esquema de un motor térmico.

En 1816, Stirling diseñó un motor de aire caliente que podía convertir en trabajo parte de la energía liberada al quemar combustible. Tenía la ventaja de trabajar a más bajas presiones y ofrecer, por lo tanto, un menor riesgo de explosión que la máquina

de vapor. Posteriormente, el motor Stirling fue abandonado al desarrollarse el motor de combustión interna.

En la actualidad, el motor Stirling está en una nueva fase de desarrollo debido a sus muchas ventajas. Por ejemplo: constituye un sistema cerrado, trabaja muy suavemente y puede funcionar con diferentes combustibles, lo cual permite investigar también los aspectos ambientales en nuestra sociedad.

El motor Stirling permite estudiar el principio de las máquinas térmicas, ya que el proceso de conversión de la energía térmica en energía mecánica es particularmente más claro y relativamente fácil de entender.

Los émbolos de trabajo y de desplazamiento del motor Stirling del laboratorio se muestran en la figura 2, donde éstos van montados en V formando 90° . El émbolo de trabajo (A) es de metal y va encajado con precisión en el tubo de vidrio. El émbolo de desplazamiento (V) de vidrio se encarga al mismo tiempo de la función de regenerador tan importante para el funcionamiento de un motor Stirling: enfría el gas caliente que circula, almacena su energía y la transfiere de nuevo al gas frío de retorno.

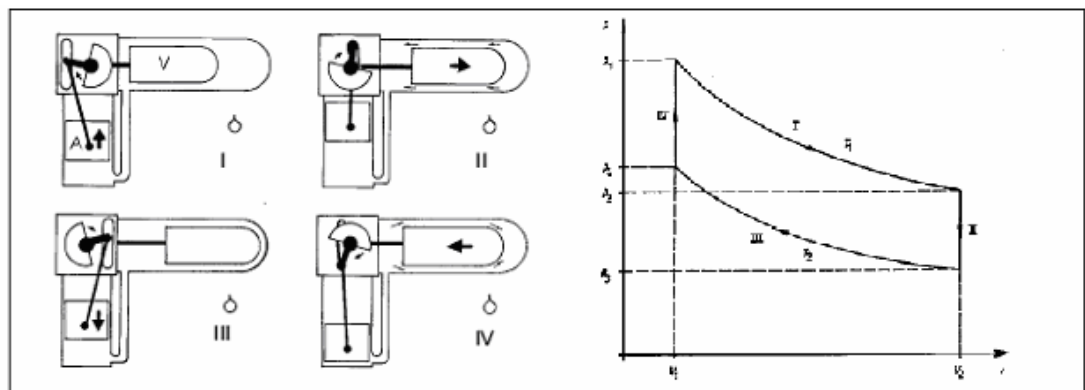


Fig. 2: Principio de funcionamiento del motor Stirling

El motor Stirling ideal es un motor térmico cuya sustancia de trabajo es aire caliente (al que consideramos gas perfecto) y sigue los siguientes procesos:

Proceso I: Expansión isotérmica a la temperatura T_C del foco caliente, del cual se absorbe la cantidad de calor Q_C .

$$\Delta U_I = 0 \rightarrow Q_C = W_I = \int p dV = (nRT_C / V) dV = nRT_C \ln(V_{\max} / V_{\min}) > 0$$

Proceso II: enfriamiento isócoro desde T_C a T_F . En este proceso, el regenerador absorbe del aire el calor Q_R .

$$W_{II} = 0 \rightarrow Q_R = \Delta U_{II} = nc_v(T_F - T_C) < 0$$

Proceso III: Compresión isotérmica a la temperatura T_F del foco frío, al cual se cede la cantidad de calor Q_F .

$$\Delta U_{III} = 0 \rightarrow Q_F = W_{III} = nRT_F \ln(V_{\min} / V_{\max}) < 0$$

Proceso IV: Calentamiento isócoro desde T_F a T_C . Para ello, el regenerador absorbe la misma cantidad de calor Q_R que absorbió en el proceso II.

$$W_{IV} = 0 \rightarrow Q_R = \Delta U_{IV} = nc_v(T_C - T_F) > 0$$

Sin embargo, un ciclo Stirling real, difiere mucho del ideal y se asemeja mucho más al esquema derecho de la figura 3 y de hecho es la que se visualiza en el osciloscopio.

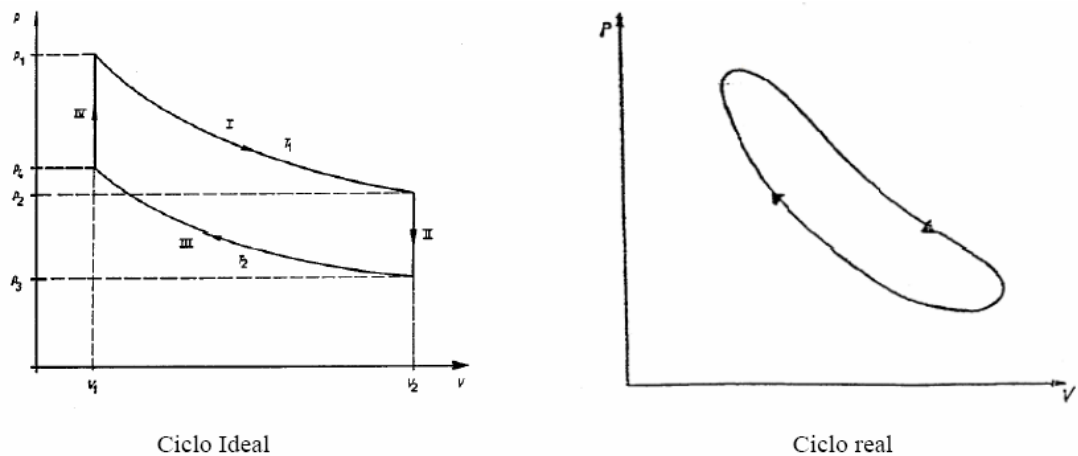


Fig.3 Ciclo de funcionamiento del motor Stirling ideal como real.

iv. Montaje e instalación.

Antes de realizar la experiencia, se debe montar e instalar cada equipo a utilizar en forma correcta.

El montaje correspondiente a esta experiencia se observa en la figura 4, donde en la placa inferior del motor Stirling se monta la escala graduada del medidor de momento de giro, fijándola en dos ranuras. Luego se instala el freno de Pony en el eje del motor Stirling, teniendo en cuenta que éste debe quedar suelto (con su regulación abierta al máximo) para permitir el libre movimiento del eje al momento del encendido. Una vez hecha esta operación se conecta el cable del sensor pVn al terminal del medidor pVnT y se procede a conectar las salidas V y p de dicho medidor a los canales X e Y del osciloscopio, respectivamente. A continuación se debe medir con la probeta graduada la cantidad de alcohol que se le suministrará al mechero, posicionando este último en la base del motor Stirling lo más cercano al extremo del cilindro desplazador, por último, los termopares van conectados desde el medidor pVnT a los racores del cilindro desplazador del motor Stirling. Debe usarse el canal T1 para medir la temperatura en el foco caliente (en el racor más cercano al mechero) y el canal T2 para medir la temperatura en el foco frío (en el racor más lejano del mechero).



Fig.4 Esquema de instalación.

v. **Calibración de los equipos**

Una vez montado e instalado en equipamiento se procede a las calibraciones del medidor pVnT y del sensor manométrico.

Para calibrar el medidor pVnT se debe encender, apareciendo en la pantalla central “**CAL**”. En este momento los extremos de ambos termopares ya descubiertos deben introducirse en un depósito con agua (destilada) con el objeto de que queden a igual temperatura y se pulsa la tecla “**KALIBRIEREN T**” (calibrar T). El calibrado de los termopares influye sólo en la diferencia de la temperatura que marcan, pero no en los valores absolutos.

Después aparece en la pantalla superior “**ot**” (punto muerto superior) que indica la posición en la que el motor tiene el menor volumen. En émbolo de trabajo del motor Stirling (émbolo dorado) se pone en su posición más baja y se pulsa la tecla “**KALIBRIEREN V**” (calibrar V). Si este calibrado no es correcto, se produce un desplazamiento de fase en la tensión de salida relativa al volumen deformando el diagrama pV.

Para el caso del sensor manométrico es necesaria su calibración para el análisis cuantitativo del diagrama pV.

Se quita el trozo de tubo flexible de la placa de montaje y se mide primero con el osciloscopio la tensión referente a la presión atmosférica exterior P_0 . El osciloscopio debe estar en modos DC e Yt, con la escala Y calibrada. Después se tira el émbolo de la jeringa de gas de cierre hermético (por ejemplo hasta 15 ó 20 ml) y se empalma la jeringa al extremo del trozo de tubo del sensor. Empujando o tirando del émbolo se varía la presión isotérmicamente. La presión en la jeringa se puede calcular y la tensión correspondiente del sensor manométrico se mide en el osciloscopio.

Al variar la presión isotérmicamente con este procedimiento se cumple que $pV =$ constante. En el volumen inicial V_0 , la presión p es igual a la presión atmosférica exterior p_0 . En la tabla 1 se procede a anotar las medidas tanto para la compresión como la expansión de la jeringa, en el que se ha tomado por p_0 la presión atmosférica normal. El volumen del tubo pequeño (0.2 ml) se puede despreciar.

Tabla 1 Mediciones de compresión y expansión de la jeringa.

| COMPRESIÓN | | | | EXPANSIÓN | | | |
|------------|---------|------------------------|----------|-----------|---------|------------------------|----------|
| V [ml] | P [hPa] | p-p ₀ [hPa] | U [Volt] | V [ml] | P [hPa] | p-p ₀ [hPa] | U [Volt] |
| 20 | 1013 | 0 | 2,35 | 15 | 1013 | 0 | 2,35 |
| 19 | | | | 16 | | | |
| 18 | | | | 17 | | | |
| 17 | | | | 18 | | | |
| 16 | | | | 19 | | | |
| 15 | | | | 20 | | | |

Luego se procede a graficar los valores presión v/s voltaje para así obtener la relación entre la presión y el voltaje medidas en el osciloscopio, por medio de una regresión lineal (pendiente de la curva).

Para el área del diagrama pV el alcance X e Y del osciloscopio es de 0.5 [V/div].

El medidor pVnT da las siguientes tensiones para los volúmenes del motor Stirling

$$V_{\min.} = 32 \text{ [cm}^3\text{]} \quad \rightarrow U_{\min} = 0 \text{ [Volt]}$$

$$V_{\max.} = 44 \text{ [cm}^3\text{]} \quad \rightarrow U_{\max} = 5 \text{ [Volt]}$$

$$\Delta V = 12 \text{ [cm}^3\text{]} \quad \rightarrow \Delta U = 5 \text{ [Volt]}$$

La escala del eje X, es por lo tanto, 2.4[cm³/Volt] ó 1.2[cm³/div].

Leyendo las tensiones de las presiones máxima y mínima en el modo DC del osciloscopio, los valores de presión del diagrama pV se pueden dar también en Pascal. La línea cero (ground) se encuentra generalmente entorno a p₀.

vi. Descripción del método seguir.

Una vez realizado el montaje y las calibraciones, se procede con la probeta a medir la cantidad de alcohol que se suministrara al mechero, para encenderlo y posicionarlo en el extremo del cilindro desplazador, junto con esta ultima operación se acciona el cronómetro (el cual determinara el tiempo de duración de la experiencia).

Se debe esperar que vayan aumentando las temperaturas y cuando T1 supere los 100°C, se impulsa con la mano la rueda transparente, haciéndola girar en sentido horario, permitiendo el arranque del motor.

Cuando se alcanza un estado suficientemente estable (o sea, los valores de T y n varían poco), se tomará nota de los valores T1, T2 y n (la aguja del medidor de par M, marca 0[Nm]); A continuación se procede a apretar levemente el tornillo regulador de rozamiento del medidor de par, para distintas medidas y tomar nota de ellas, esperando entre cada una que se estabilicen la frecuencia de giro n y el momento M.

| M 10⁻³[Nm] | W_{pV} [mJ] | n min⁻¹ | T1 [°C] | T2 [°C] | f [Hz] | W_m [mJ] | P_m [mW] | W_{fr} [mJ] |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 198 | | | | | | | |
| 2,5 | 201 | | | | | | | |
| 4,0 | 205 | | | | | | | |
| 6,5 | 210 | | | | | | | |
| 8,2 | 216 | | | | | | | |
| 10,5 | 221 | | | | | | | |
| 12,2 | 230 | | | | | | | |
| 14,0 | 238 | | | | | | | |
| 15,0 | 239 | | | | | | | |
| 16,8 | 243 | | | | | | | |
| 18,3 | 245 | | | | | | | |
| 19,5 | 246 | | | | | | | |
| 22,0 | 247 | | | | | | | |
| 22,4 | 235 | | | | | | | |

Donde

M: Pares definidos de momento.

W_{pV}: Energía útil total, entregada por el fabricante para los pares establecidos.

n : Velocidad de giro (rpm).

T1: Temperatura del foco caliente.

T2: Temperatura del foco frío.

La energía mecánica útil durante un ciclo, (W_m), se calcula a partir del par M,

indicado en el medidor de momento de giro:

$$W_m = 2 \times \pi \times M$$

Frecuencia (revoluciones por segundos) (f)

$$f = \frac{rpm}{60}$$

Potencia mecánica (P_m)

$$P_m = W_m \times f$$

Energía de rozamiento por ciclo (W_{fr})

$$W_{fr} = W_{pV} - W_m$$

Al finalizar la última medida, se apaga el mechero y se detiene el cronómetro indicando este último el tiempo de duración de la experiencia. Luego se procede a medir, con la probeta, la cantidad de alcohol que queda en el interior del mechero (alcohol no quemado).

Para determinar la capacidad térmica del mechero se debe tomar en cuenta el tiempo transcurrido, el volumen de alcohol quemado, la densidad del alcohol y el índice calorífico específico.

Para el alcohol de trabajo se tiene:

- Densidad del alcohol $\delta = 0,83$ [g/ml].
- Índice calorífico específico $h = 25$ [kJ/g].

Para determinar el volumen de alcohol quemado se tiene:

$$V_q = V_i - V_f$$

Donde

V_q : Volumen de alcohol quemado [ml].

V_i : Volumen de alcohol inicial [ml].

V_f : Volumen de alcohol final [ml].

La masa de alcohol quemado en gramos se determina a partir de:

$$m = V_q \times \delta$$

Finalmente, la capacidad térmica del mechero, en watts, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$P_H = \left(\frac{m}{t} \right) \times h$$

Para el cálculo del rendimiento, se ha de tomar como base la medición en la zona de máxima potencia mecánica del motor Stirling. Tomando en cuenta esto último, se procede a calcular el número de moles ν .

Como el émbolo de trabajo del motor Stirling no cierra herméticamente, el número de moles que se encuentran en él durante su funcionamiento se debe valorar por medio del diagrama pV. Se selecciona un punto en el centro del área, con la finalidad de obtener para una presión un volumen determinado (p,V) y se asignan a la isoterma de la temperatura media (T_m) en Kelvin.

$$T_m = \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)$$

Aplicando la ecuación del gas ideal se tiene que el número de moles viene dado por:

$$\nu = \left(\frac{p \times V}{R \times T_m} \right)$$

Donde

p : Presión obtenida en un punto del centro del área del diagrama pV [hPa].

V : Volumen correspondiente a la presión obtenida del diagrama pV [cm³].

R : Constante del gas, para el aire 8,31 [J/mol °K].

T_m : Temperatura media [°K].

Finalmente, el rendimiento total (η_t) del motor Stirling viene dado por:

$$\eta_t = \eta_H \times \eta_{th} \times \eta_i \times \eta_m$$

Donde

η_H : Rendimiento del calentamiento.

η_{th} : Rendimiento térmico (Carnot).

η_i : Rendimiento interno.

η_m : Rendimiento mecánico.

➤ Rendimiento del calentamiento.

$$\eta_H = \frac{|W1|}{W_H} \times 100$$

Donde

$W1$: Trabajo efectuado en compresión isotérmica.

W_H : Energía térmica para un ciclo.

$$W_H = \frac{P_H}{f}$$

Finalmente, el rendimiento del calentamiento esta dado por:

$$\eta_H = \frac{\nu \times R \times T1 \times \ln\left(\frac{V2}{V1}\right)}{W_H} \times 100$$

➤ Rendimiento térmico (Carnot). (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{W_t}{W1} \times 100$$

Donde

W_t : Trabajo total cedido por el motor Stirling.

$$\eta_{th} = \frac{\nu \times R \times (T1 - T2) \times \ln\left(\frac{V2}{V1}\right)}{\nu \times R \times T1 \times \ln\left(\frac{V2}{V1}\right)} \times 100$$

$$\eta_{th} = \frac{T1 - T2}{T1} \times 100$$

➤ Rendimiento interno (η_i).

$$\eta_i = \frac{W_{pV}}{|W_t|} \times 100$$

$$\eta_i = \frac{W_{pV}}{\nu \times R \times (T1 - T2) \times \ln\left(\frac{V2}{V1}\right)} \times 100$$

➤ Rendimiento mecánico (η_m).

$$\eta_m = \frac{W_m}{W_{pV}} \times 100$$

vii. Informe.

La evaluación del informe será:

1. Introducción.

- Objetivos.
- Tipos de motor Stirling.

2. Esquema de la instalación.

3. Cálculos.

- Datos experimentales.
- Cálculo de la capacidad térmica del mechero.
- Cálculo del rendimiento.

4. Gráficos.

- Gráficos de todas las energías en función de la velocidad de giro.

5. Conclusiones.