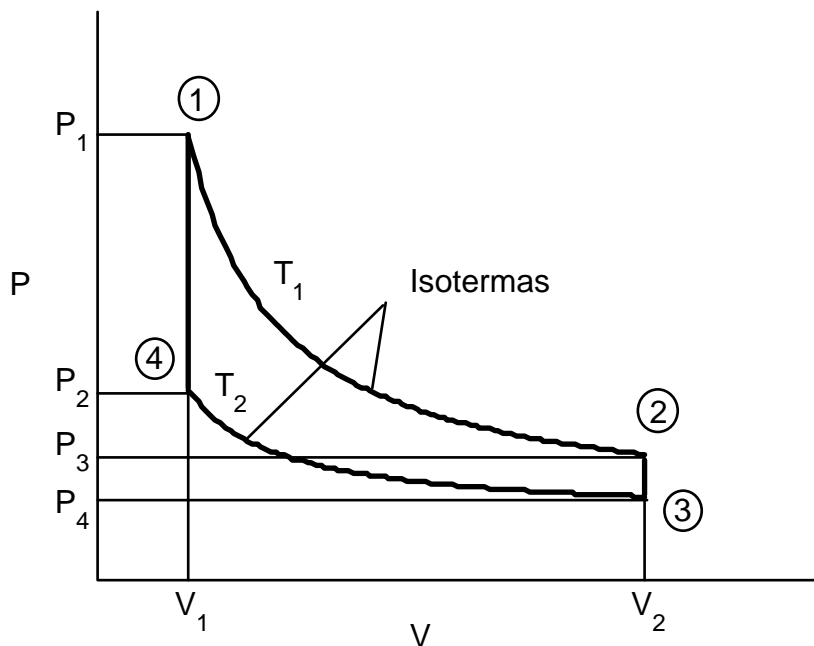


MÁQUINAS TÉRMICAS: CICLO DE STIRLING

Objetivo: Entender el funcionamiento y calcular la eficiencia de dos máquinas térmicas que funcionan realizando ciclos de Stirling.

Fundamento teórico: Un ciclo de Stirling es un proceso que permite la conversión entre energía mecánica y calorífica. En esta práctica se estudia la máquina de Stirling, que permite la obtención de trabajo a partir del intercambio de calor entre un foco caliente y otro frío, según el motor diseñado por Robert Stirling y patentado en 1816. El motor funciona mediante combustión externa, y el fluido térmico que utiliza es aire contenido en un cilindro.

El ciclo teórico de Stirling consta de cuatro procesos: una expansión isoterma (1-2) a temperatura T_1 , un enfriamiento isócoro (2-3) a volumen V_2 , una compresión isoterma (3-4) a temperatura T_2 y un calentamiento isócoro (4-1) a volumen V_1 , según se muestra en la gráfica P-V de la figura:



El rendimiento teórico de este ciclo está dado por la expresión:

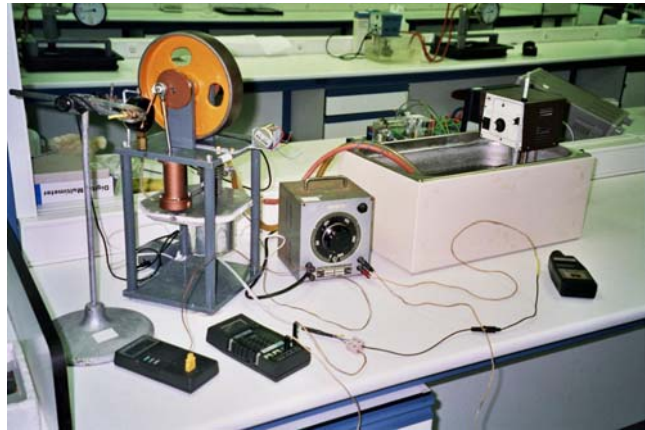
$$\varepsilon = 1 - \frac{RT_2 \ln(V_2/V_1) + c_v(T_1 - T_2)}{RT_1 \ln(V_2/V_1) + c_v(T_1 - T_2)}$$

Para la realización de la práctica disponemos de dos motores distintos. La operación de ambos está basada en el ciclo de Stirling pero su construcción y funcionamiento son

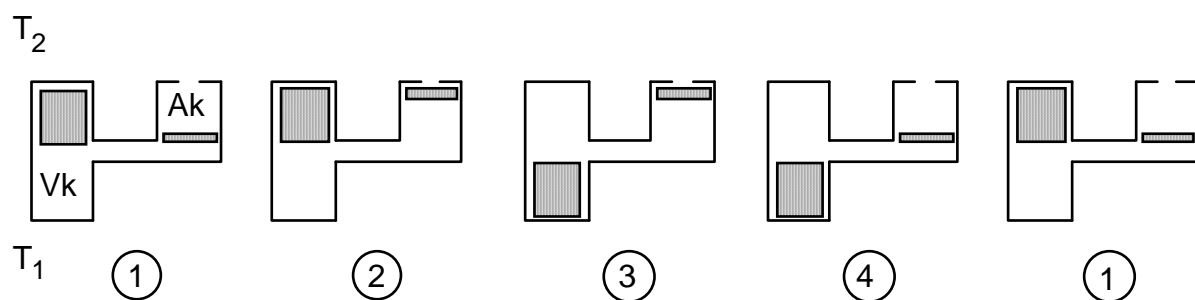
diferentes. En ambos casos el fluido motor de la máquina es aire (una mezcla de aproximadamente un 78% de N_2 y un 22% de O_2), cuya capacidad en las condiciones de trabajo de la práctica se considerará constante, con un valor $C_v = 0.71 \text{ kJ / Kg K}$ ($=20.50 \text{ J/mol K} = 2.47 \text{ R}$).

MOTOR 1

Montaje experimental: Consta de un cilindro intercambiador de calor en cuyo interior se mueve un pistón. Conectado al primero mediante un tubo, hay un segundo cilindro de trabajo cerrado por un segundo pistón. Ambos pistones están conectados por bielas a un cigüeñal fijado a un volante de inercia. En el cilindro intercambiador de calor, un extremo está refrigerado mediante un serpentín por el que circula agua que proviene de un reservorio a temperatura constante, mientras el otro extremo se calienta con un horno eléctrico.



Las cuatro etapas del ciclo de Stirling corresponden al movimiento de los pistones según se muestra en la figura (ver también la figura anterior) siguiente. Hay que notar que el pistón Vk no cierra totalmente el cilindro de modo que cuando el pistón está arriba el aire está abajo y cuando el pistón está abajo el aire se va arriba, por los lados.



En la **posición 1**, debido a que la temperatura T_1 es alta, la presión del aire es alta y se produce su expansión (isoterma) en el cilindro Ak hasta la **posición 2**. Ahora el pistón se desplaza dentro del cilindro Vk transfiriendo el aire a la zona de temperatura más baja; en esa situación tiene lugar una reducción isocora de la presión hasta la **posición 3**. En ese momento, el volante de inercia acciona el pistón en Ak, produciendo una compresión isoterma del aire hasta la **posición 4**. El posterior movimiento del pistón en el cilindro Vk traspassa el aire a la zona caliente, de manera que tiene lugar un aumento isocoro de la

presión, y el ciclo comienza de nuevo en la **posición 1**. Notar que el volumen del aire en el pistón izquierdo es siempre el mismo, mientras en el derecho es máximo cuando el pistón está arriba y mínimo cuando está abajo.

Realización de la práctica:

El horno que mantiene la temperatura del **foco caliente** consiste en una resistencia calefactora alimentada a través de un transformador por una corriente alterna cuyo voltaje es regulable. Intercalaremos en el circuito un amperímetro para controlar la corriente de alimentación y se aumentará el voltaje de la fuente de alimentación hasta que circule una corriente aproximada de 0.7 A. El voltaje en la resistencia de calefacción lo mediremos con un voltímetro en paralelo, lo cual nos da la potencia eléctrica suministrada. El **foco frío** está refrigerado por un serpentín en el que circula, mediante una pequeña bomba, agua a temperatura ambiente.

En cualquier momento la presión se lee en un manómetro que lleva acoplado y que indica la diferencia con la atmosférica (puede ser negativa). Cuando la diferencia de temperatura entre los focos es suficiente ($\Delta T \sim 200^\circ$), el volante de inercia es capaz de mantener el giro a una frecuencia constante (para que comience a girar es necesario dar un primer impulso al volante con suavidad). Una vez en marcha, se considerará que la máquina está en el rango de trabajo adecuado cuando tanto las temperaturas del foco caliente y el frío como la frecuencia de giro sean constantes. Para eso tardará unos 15 ó 20 minutos aunque no serán exactamente constantes sino que habrá fluctuaciones que depreciaremos.

Deben obtenerse los valores de todos los parámetros relevantes:

- Temperatura de los focos caliente y frío (T_1 y T_2).
- Volumen mínimo y máximo del ciclo (V_1 y V_2).
- Variación de la presión (ΔP).
- Frecuencia de rotación del volante de inercia (ν). Para ello utiliza el cuentavueltas suministrado, que indica en número de revoluciones por minuto.
- Dibujo del ciclo real: La máquina de nuestro experimento está preparada para obtener mediante un montaje óptico una gráfica P - V del ciclo real recorrido, aunque en una escala arbitraria que habrá que averiguar. Para ello, una de las ruedas del cigüeñal que conecta los pistones al volante está dispuesta con el eje excéntrico, de forma que produce movimientos angulares horizontales en un espejo. La posición angular del espejo está relacionada con la posición de los pistones en los cilindros, que a su vez está relacionada con el volumen de aire. El espejo está también conectado al manómetro, de manera que los cambios de presión producen desplazamientos angulares verticales en el espejo. Reflejando un haz de luz láser en ese espejo, se proyecta una gráfica en una pantalla cuyo eje de abscisas es proporcional al volumen, y el de ordenadas a la presión. El ciclo real se obtendrá dibujando a mano sobre un papel milimetrado fijado a la pantalla el trazo por el que pasa el punto de luz reflejado. Para poder hacer medidas sobre el papel milimetrado,

hay que calibrar las unidades de cada eje. Ello se consigue midiendo los valores máximo y mínimo de la presión y el volumen en el experimento, y haciéndolos corresponder con las posiciones máxima y mínima alcanzadas en cada eje por el dibujo experimental del ciclo.

- Potencia suministrada por el horno (P_{sum}): La potencia eléctrica suministrada se obtiene de la fórmula $P_{sum} = I^2 R = I \times Voltaje$. La resistencia puede medirse directamente, desconectando el horno de la fuente de alimentación y utilizando un polímetro como óhmetro, pero si se dispone de otro voltímetro lo mejor es no desconectar y medir independientemente V e I cuando está en marcha.
- Potencia extraída en forma de trabajo (P_{ext}): Puede obtenerse midiendo el área de la gráfica P - V del ciclo real y dividiendo para el tiempo empleado. Para medirla, nos aprovechamos de que el área del papel es proporcional a su peso. Recortando el ciclo en el papel milimetrado y pesándolo en una balanza de precisión, obtendremos su área comparando su peso con el de un trozo de papel de área conocida (por ejemplo, recortando y pesando un cuadrado de $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 100 \text{ cm}^2$). Se desprecia el peso de la tinta.

Cuestiones:

- a) Es de esperar que la temperatura efectiva en cada isoterma ($T_{1_ef.}$ y $T_{2_ef.}$) no coincida con las temperaturas medidas, ¿porqué? Dichas temperaturas efectivas se pueden aproximar ajustando (a ojo) a dos isothermas los tramos inferior y superior del ciclo dibujado. Para realizar dichos ajustes es necesario conocer el número de moles de aire en el motor. Calcule dicho número suponiendo que el punto central del ciclo corresponde a la isoterma de temperatura igual al valor medio de las temperaturas medidas, $T_{media} = (T_1 + T_2)/2$, y donde P y V están dadas por la gráfica. El aire se puede considerar gas ideal a esas presiones y temperaturas. Utilizar dicho valor de N para ajustar las isothermas de mayor y menor temperatura. Calcule el rendimiento del ciclo, ϵ_{teo_ef} , con las temperaturas máxima y mínima del aire estimadas. Compárelo con el obtenido si se hubieran utilizado las temperaturas medidas en lugar de las corregidas ϵ_{teo} .
- b) El dibujo del ciclo que ha obtenido en el papel milimetrado difiere claramente de la forma del ciclo de Stirling teórico. El esquema que muestra las distintas fases del movimiento de los pistones en sus cilindros puede darle una idea de cuál es el ciclo termodinámico real que tiene lugar en nuestra máquina, frente al teórico. Discuta cuáles son, a su juicio, los factores más importantes que influyen en la diferencia entre el ciclo real obtenido en el papel y el teórico.
- c) A partir del cálculo de la potencia suministrada y la extraída, calcula el rendimiento experimental del ciclo (ϵ_{exp}) y compáralo con el rendimiento teórico. Discutir

razonadamente el origen de las posibles diferencias. Comparar también el rendimiento real obtenido con el esperado para una máquina endorreversible y las temperaturas medidas.

- d) Al finalizar la toma de datos rellena la siguiente tabla y entrega una copia con los datos que hayas medido.

TABLAS DE RESULTADOS

T_1 (°C)	T_2 (°C)	V_1 (cm ³)	V_2 (cm ³)	ΔV (cm ³)	ΔP (Pa)	ν (Hz)

I (A)	R (Ω) o Voltaje (V)	Peso ciclo (gr)	Densidad papel (gr/cm ²)	Área (cm ²)

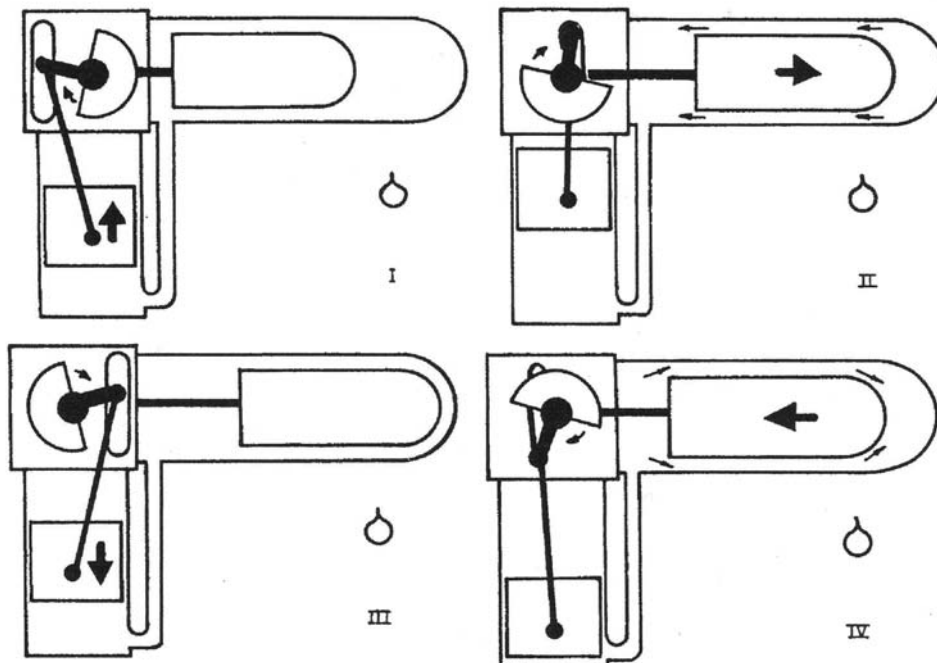
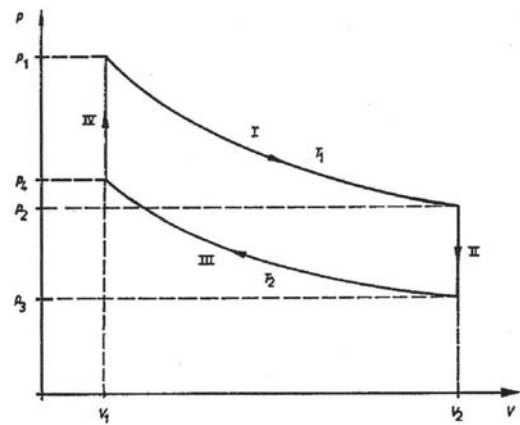
$(T_1 + T_2)/2$ (°C)	N (moles)	T_{1_ef} (°C)	T_{2_ef} (°C)	$W = \int p dV$ (julios)	P_{ext} (W)	P_{sum} (W)

ϵ_{teo}	ϵ_{teo_ef}	ϵ_{exp}

MOTOR 2

Montaje experimental: A diferencia del montaje anterior, el extremo del intercambiador se calienta ahora con un quemador de alcohol. Las distintas etapas de funcionamiento y su correspondencia en el ciclo de Stirling teórico se ilustran en las figuras.

Además, el montaje cuenta con un medidor (pVnT) en el que instantáneamente se muestran los valores de la frecuencia de rotación del motor y las temperaturas del foco caliente (T_1) y foco frío (T_2). Esta unidad dispone de dos salidas de voltaje proporcionales a los valores de presión y volumen que permiten visualizar el ciclo en la pantalla de un osciloscopio.



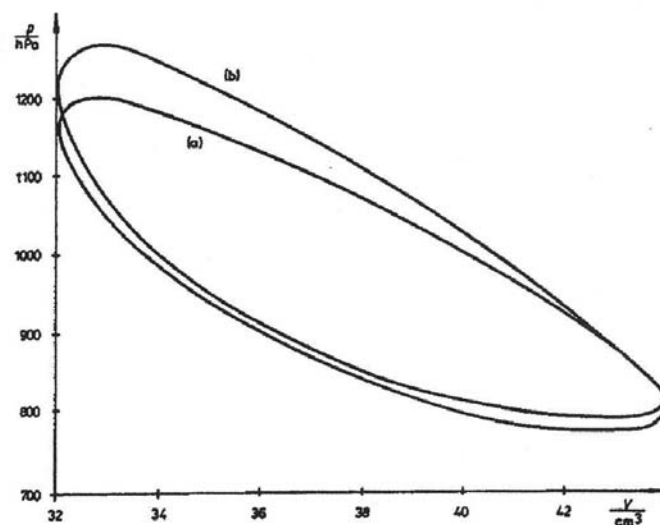
Realización de la práctica:

Una vez realizadas todas las conexiones, encienda la unidad de medida $pVnT$. Deberá aparecer el mensaje “cal”. Presione “Calibration ΔT ”; el mensaje debe cambiar a “0T”. Baje el pistón a la posición inferior (esto corresponde al mínimo volumen V_1) y presione “calibration V ”. Los tres indicadores deben estar en funcionamiento con los valores iniciales de revoluciones (0 revs/min) y las temperaturas T_1 y T_2 (temperatura ambiente). La salida de voltaje proporcional al volumen queda calibrada (los valores de volumen mínimo y máximo para este montaje son de $V_1 = 32 \text{ cm}^3$ y $V_2 = 44 \text{ cm}^3$, respectivamente). El canal de presión ha de calibrarse independientemente y se ha obtenido un valor de $\approx 3.6(1) \times 10^{-5}$ Voltios/Pa. El voltaje, medido en el osciloscopio, correspondiente a la presión atmosférica es de 1.6 voltios.

Para poder estimar el rendimiento del motor hay que conocer cuál es la potencia calorífica del quemador de alcohol P_H . Para ello mediremos la diferencia de volumen de alcohol utilizado ΔV (ml) y el tiempo de la práctica Δt (s). Emplearemos la relación siguiente:

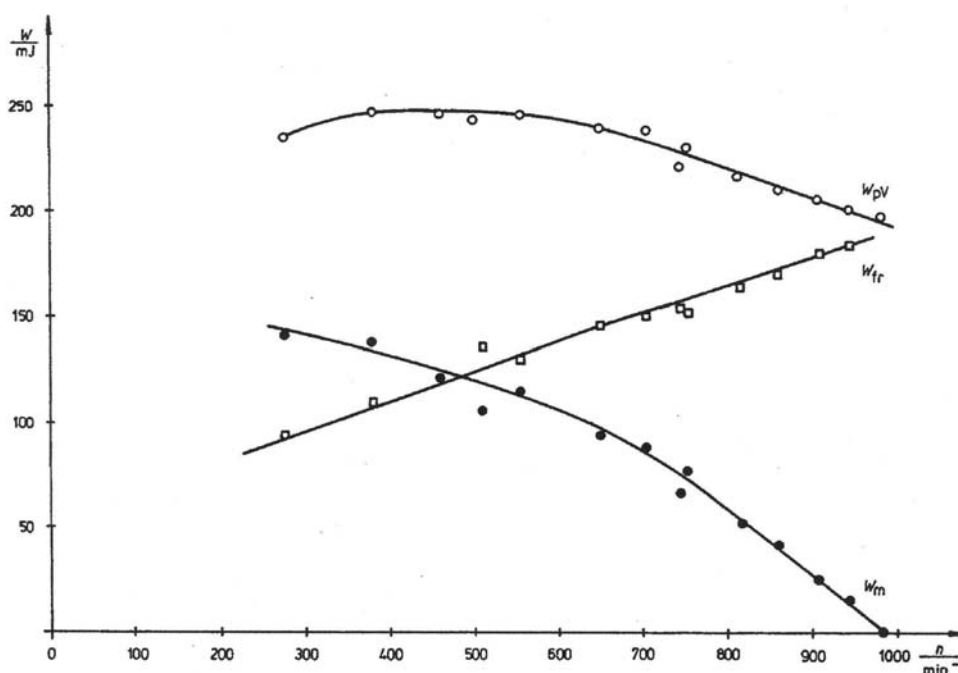
$$P_H = 20.75 (\Delta V / \Delta t) \text{ en kW}$$

Mida el volumen de alcohol inicial (se recomiendan unos 100 ml), encienda la mecha y anote la hora de comienzo. Cuando la diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el frío sea de unos 80 K comience a girar el volante y espere hasta que el sistema alcance el equilibrio. Anote los valores alcanzados de revoluciones, T_1 y T_2 y visualice el ciclo en la pantalla del osciloscopio (se recomienda una escala de 0.5 volts/div para CH I y 0.25 volts/div para CH II). Deberá observar un ciclo con la siguiente forma (a) o si está aplicando carga mecánica, ver más adelante, (b):



Para obtener el área W_{pV} , dibujaremos el ciclo a mano en un trozo de transparencia previamente recortado del tamaño de la pantalla del osciloscopio. Recuerda dibujar también la cuadrícula y anotar las escalas. Podemos usar el método comentado anteriormente de estimación del área mediante comparación del peso con el de un trozo de la misma transparencia pero de área conocida (toda el área cuadrículada de la pantalla).

A continuación, se estudiará el efecto de una carga mecánica sobre el rendimiento del motor. Sitúe sobre el soporte la escala de medida de momentos y coloque con cuidado en el eje del volante la pieza que tiene la aguja indicadora con un peso; el tornillo permite ajustar el valor del momento ejercido. Una vez que el sistema se encuentre en equilibrio, anotaremos los nuevos valores de revoluciones, temperaturas, momento y dibujaremos el ciclo como se ha descrito anteriormente. Realizaremos esta parte para dos valores diferentes de 8 y 16×10^{-3} Nm. El trabajo mecánico por vuelta se puede evaluar simplemente como $W_m = 2\pi M$, donde M es el momento del par ejercido. En la siguiente gráfica se muestran valores típicos obtenidos para W_m en función de la frecuencia, los correspondientes valores de W_{pV} y la energía de fricción definida como $W_{fr} = W_{pV} - W_m$:

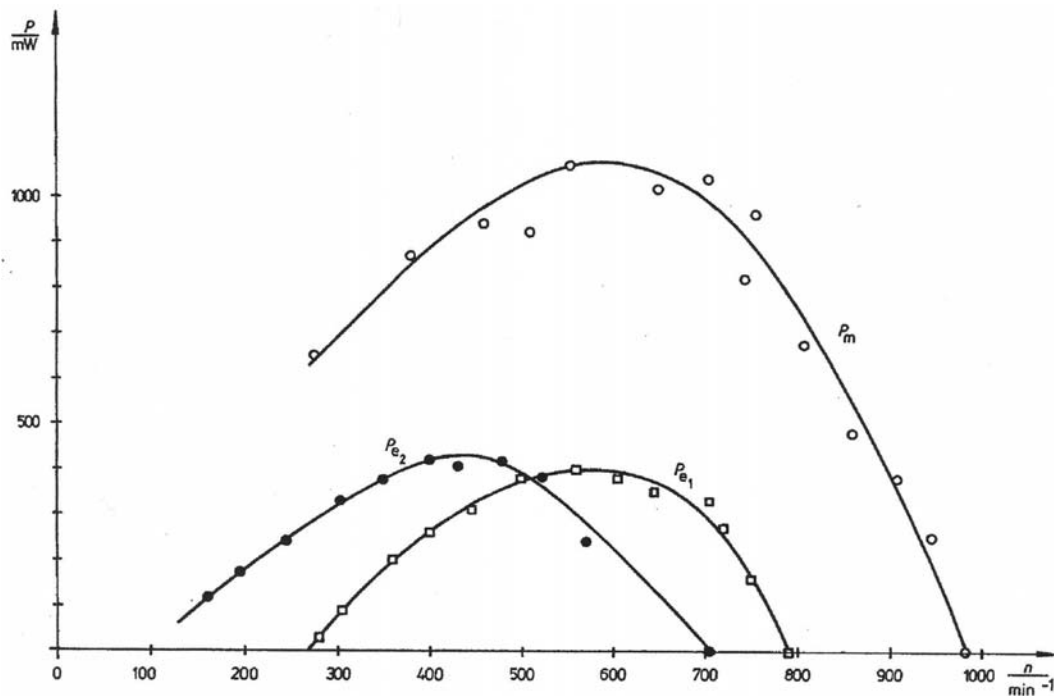


Estudiaremos ahora el efecto de una carga eléctrica. Sustituya el montaje de carga mecánica por el generador eléctrico y conecte la salida al reostato. Conecte un polímetro en serie para medir intensidad y otro en paralelo para medir el voltaje en bornes del reostato. Usando la goma elástica conecte el volante del motor con una de las ruedas del generador. Mida en función de la resistencia del reostato, los valores de voltaje, intensidad, frecuencia de rotación y temperaturas T_1 y T_2 . Deje suficientemente tiempo entre las medidas para que el sistema

alcanza el equilibrio. Compare los datos obtenidos con la gráfica siguiente (los valores de potencia eléctrica correspondientes al acoplamiento con la rueda grande son P_{e1} y los correspondientes al acoplamiento con la rueda pequeña P_{e2}).

Para concluir, desconecte el reostato y apague la llama. **Importante: no olvide de anotar la hora de finalización y medir la cantidad de alcohol que queda en el quemador para poder estimar P_H .**

Ahora forzaremos a girar la rueda mediante un motor que alimentaremos con una fuente de continua a 12 V. Observe como el dispositivo funciona como una bomba refrigeradora. Se recomienda haber realizado la práctica en ambos motores y realizar esta parte ambos grupos simultáneamente.



Cuestiones:

- Obtenga el rendimiento del motor en ausencia de carga y compárelo con su valor teórico.
- Obtenga el rendimiento del motor cuando ha sido cargado por una carga mecánica aproximada de 8 y $16 \times 10^{-3} \text{ Nm}$. Compare con los resultados obtenidos en el apartado anterior.

c) Estudie la potencia de la máquina en función de la carga eléctrica. Presente en una tabla los resultados de medir n (frecuencia de rotación), T_1 , T_2 , I , U y P_e y represente gráficamente $P_e(n)$.

Para contestar al apartado a) deberás cumplimentar la tabla que sigue adjuntando una copia de la misma al informe. Asimismo, al finalizar la práctica entrega una copia con los datos que hayas medido.

T_1 (°C)	T_2 (°C)	V_1 (cm ³)	V_2 (cm ³)	ΔV (cm ³)	ΔP (Pa)	ν (Hz)

Escala vertical (Pa/cm)	Escala hztal. (cc./cm)	Peso ciclo (gr)	Densidad papel (gr/cm ²)	Area (cm ²)	$W = \int p dV$ (julios)

Volumen de alcohol consumido (ml)	Tiempo transcurrido (s)	Potencia calorífica P_H (W)	P_{ext} (W)	ϵ_{teo}	ϵ_{exp}