

EXPERIMENTO 9

Motor térmico

Objetivos

- * Llevar un sistema termodinámico por diferentes procesos termodinámicos, creando un ciclo cerrado.
- * Calcular el calor, el cambio de energía interna y el trabajo del ciclo y de cada proceso usando la primera ley de la termodinámica.
- * Calcular el cambio de entropía del sistema durante el ciclo.

Introducción

En esta práctica se llevará el aire dentro de un Erlenmeyer por diferentes procesos termodinámicos tal que se realice un ciclo cerrado, es decir, que sus variables de estado iniciales y finales sean las mismas. Durante los procesos se medirá la presión del gas con ayuda de un sensor, el cambio en volumen con la ayuda de una jeringa y la temperatura con un sensor.

Materiales

- * Recipiente metálico y calorímetro sin tapa
- * Erlenmeyer de 100 ml
- * 2 jarras de plástico
- * Agua con hielo
- * Jeringa graduada de 20 ml
- * Tapón con manguera y llave
- * Sensor de presión de gas Vernier
- * Sensor de temperatura Vernier
- * Computador con LoggerPro
- * Interfaz LabQuest Stream
- * Soporte universal con varilla larga, pinzas y nuez
- * Horno microondas



Figura 9.1: Montaje experimental

Teoría

Durante un proceso termodinámico que ocurre en un gas ideal se debe cumplir la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W, \quad (9.1)$$

donde ΔU es el cambio de energía interna, Q el calor que el gas cede ($Q < 0$) o que el gas gana ($Q > 0$) durante el proceso y W es el trabajo hecho por el gas.

Los procesos termodinámicos más comunes son: *isocórico*, *isobárico*, *isotérmico* y *adiabático*.

Para describir cada proceso, el aire se modela como un gas ideal. En este caso la presión P del gas, su volumen V , el número de moles n y su temperatura T están relacionados por la ecuación

$$PV = nRT, \quad (9.2)$$

donde la constante R se denomina la *constante de los gases ideales*, que toma el valor de $R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$.

Con esto en cuenta, la forma de calcular ΔU , Q y W para cada proceso se resume en la tabla 9.1.

Suponiendo que el aire es un gas ideal diatómico, su calor específico a presión constante, C_P , y a volumen constante, C_V , son respectivamente $C_P = \frac{7R}{2}$ y $C_V = \frac{5R}{2}$.

En el caso del proceso adiabático, $Q = 0$ para cualquier gas y se cumple que $P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma$, donde $\gamma = C_P/C_V$.

Tabla 9.1: Resumen de calor Q , trabajo W y energía interna ΔU para procesos termodinámicos. $\Delta T = T_f - T_i$, $\Delta V = V_f - V_i$.

Proceso	Q	W	ΔU
Isocórico	$nC_V\Delta T$	0	$nC_V\Delta T$
Isobárico	$nC_P\Delta T$	$P\Delta V$	$Q - W$
Isotérmico	$nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$	$nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$	0

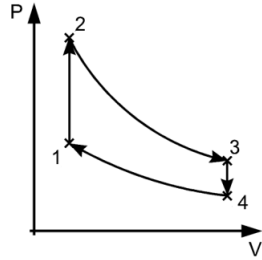


Figura 9.2: Diagrama PV del ciclo de Stirling

El trabajo y calor neto de un ciclo siempre serán la suma del trabajo y calor neto de cada proceso del ciclo respectivamente. Estas cantidades siempre son iguales, tal que $\Delta U_{\text{Ciclo}} = 0$. Una forma de calcular el trabajo en un ciclo es calcular el área encerrada por el ciclo en un diagrama P-V. El signo del trabajo lo da el orden en el que ocurren los procesos.

La eficiencia ϵ del ciclo se define como la cantidad de trabajo que se logra extraer de la máquina térmica (o motor térmico) dividido entre la cantidad de calor que gana el sistema Q_H

$$\epsilon = \frac{W}{Q_H}. \quad (9.3)$$

El cambio de entropía ΔS del sistema se calculará de acuerdo a la expresión

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dQ}{T}, \quad (9.4)$$

por lo que cada proceso tendrá un cambio de entropía asociado que se presenta en la tabla 9.2.

Tabla 9.2: Entropía en procesos termodinámicos

Proceso	ΔS
Isocórico	$nC_V \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$
Isobárico	$nC_P \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$
Isotérmico	$nR \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$

En nuestro caso estaremos trabajando con un ciclo de Stirling, cuyo diagrama PV se muestra en la Fig. 9.2.

Procedimiento

⚠ Advertencia: En esta práctica tiene que manipular agua cerca al punto de ebullición. Sea muy cuidadoso con usted y sus compañeros al transportar agua caliente del punto de calefacción a su puesto de trabajo, así como de no derramarla en su puesto de trabajo. Asimismo, evite a toda costa que los elementos electrónicos como el LabQuest Stream o el computador se mojen con el agua o el hielo usados durante la práctica.



Asegúrese de que en LoggerPro las unidades de presión sean kPa. Tómese un momento para verificar el valor de presión que arroja el sensor sin ningún montaje conectado. Ese será el valor de la presión atmosférica. Compárelo con el valor teórico de la presión atmosférica en Bogotá y evalúe si son similares.

Nota: Para su comodidad y eficiencia en la toma de datos, se sugiere que una persona del grupo manipule el montaje en cada caso (la jeringa, los recipientes, el agua), y la otra se encargue de tomar los datos en LoggerPro.

Se realizarán dos procedimientos durante la práctica de laboratorio: el primero servirá para estimar el volumen de gas en el contenedor, y el segundo será realizar un ciclo termodinámico sobre este gas.

1. Estimando el volumen de gas

A temperatura ambiente (medirla con el sensor), inserte el tapón con manguera conectada al sensor de presión en el Erlenmeyer y asegúrese que la llave esté cerrada. Siga los siguientes pasos:


- * Conecte la jeringa en 0 mL (sin aire) al Erlenmeyer y abra la llave.
- * Seleccione el modo eventos con entrada . La entrada será el volumen de la jeringa.
- * Tome el primer dato (el volumen será 0 mL) y luego lentamente, con la llave siempre abierta, aumente el volumen de aire en la jeringa en intervalos de 5 mL hasta llegar a 20 mL. Cada 5 mL tome un dato con el botón .
- * Al terminar, cierre la llave, retire la jeringa y abra la llave para equilibrar la presión del gas con la atmosférica.
- * Realice una gráfica de V_{Jeringa} vs $1/P$ y ajuste una recta, el punto de corte con el eje vertical le dará el volumen del gas dentro del recipiente (multiplicado por menos). Verifique que este valor sea coherente; lo necesitará para la siguiente

parte del procedimiento. De lo contrario repita el procedimiento. Registre este valor en la casilla de LoggerPro **Volumen Inicial Gas**.

- * Guarde el conjunto de datos con **Ctrl+L** y pase a la siguiente sección del procedimiento.

2. Ciclo Termodinámico

Nota: Para este proceso es importante que siga cuidadosamente y en orden las instrucciones que se dan a continuación, porque de lo contrario deberá repetir el procedimiento cuantas veces sea necesario.

- * Acople la jeringa (con volumen 0 mL) al Erlenmeyer y abra la llave del tapón. La jeringa no se debe retirar en ninguna instancia del procedimiento.
- * Coloque el Erlenmeyer dentro del vaso metálico (sin agua) y sujételo con las pinzas como se ve en la figura 9.3.
- * Agregue agua fría al recipiente metálico hasta el tope (la idea es que la mayoría del Erlenmeyer esté en contacto con el agua). Inserte el termómetro para medir la temperatura del agua. Espere a que la temperatura se estabilice. El punto donde esto suceda será su punto de partida.
- * Seleccione el modo de eventos con entrada . Configure su sistema para tener 1 entrada manual: volumen jeringa. El volumen total será calculado por la columna calculada **Volumen Total** donde

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{Inicial}} + V_{\text{Jeringa}} \quad (9.5)$$

La temperatura y la presión serán medidas por los sensores. Asegúrese que la temperatura T sea medida en $^{\circ}\text{C}$, el volumen V en mL y la presión en P en kPa.








- * Empiece a tomar datos  y guarde el dato inicial . El valor de Volumen que debe ingresar inicialmente es el volumen de la jeringa, es decir 0 mL.
- * **Proceso isocórico:** Retire el agua fría y agregue agua caliente (70°C - 80°C) al recipiente metálico. Cuando las medidas de temperatura sean relativamente estables, conserve otro dato . El volumen que debe registrar es el mismo del paso anterior.
- * **Expansión isotérmica:** Usando la jeringa realice (lo más rápido posible) una expansión isotérmica del gas. Conserve datos  cada 5 mL hasta lo que permita la jeringa (que se pueda medir). Si la temperatura baja más de 5°C durante este proceso, debe repetir todos los pasos anteriores. Para minimizar este error puede



Figura 9.3: Detalle de Erlenmeyer

ir agregando agua caliente al vaso metálico mientras hace la expansión.

- * **Proceso isocórico:** Retire el agua caliente y agregue agua fría al vaso metálico; introduzca el Erlenmeyer y llévelo hasta una temperatura igual a la inicial (use hielo si es necesario). Cuando la temperatura se estabilice en el valor deseado, conserve un dato .
- * **Compresión isotérmica:** Ahora, usando la jeringa, realice una compresión isotérmica. Conserve datos  cada 5 mL hasta que la jeringa llegue a 0 mL. Para ayudar a mantener la temperatura constante puede usar el hielo.
- * Para saber que realizó bien el ciclo termodinámico, su punto final (con la jeringa en 0 mL) debe coincidir con su punto de partida. Si esto sucede, frene la toma de datos .
- * Para finalizar, cierre la llave, retire la jeringa y luego abra la llave. Deje todos los elementos como al inicio de la sesión.


Análisis cualitativo

- * Describa los 4 procesos que se realizaron. Indique en cada uno si el trabajo que hace el gas es positivo, negativo o nulo, si el gas cede o gana calor y qué sucede con el cambio de energía interna.
- * ¿Qué indica el área bajo la curva en un diagrama PV?
¿Qué significa que este valor sea positivo o negativo?
- * Sin realizar ningún cálculo, diga qué signo tendría el cambio de entropía en cada uno de los procesos y en

todo el ciclo.

Análisis cuantitativo

Nota: Recuerde que el volumen que debe usar en todos los cálculos es el volumen total
 $V_{\text{Total}} = V_{\text{Inicial}} + V_{\text{Jeringa}}$

- * Con la ecuación de gas ideal, y las variables de volumen en m^3 , presión en Pa y temperatura en Kelvin K, calcule el número de moles en el gas. A temperatura ambiente, presión atmosférica de Bogotá y en un recipiente de 150 mL, el orden de magnitud del número de moles del aire debe ser de 10^{-3} mol.
- * Con los datos del ciclo termodinámico, calcule el trabajo, el calor ganado/cedido y el cambio de energía interna en cada proceso. Calcule el trabajo total, el calor total y el cambio de energía interna total. ¿Corresponden los valores a lo esperado?
- * Con la herramienta de integral  encuentre el área encerrada por el ciclo termodinámico. Este será el trabajo del ciclo y el calor total que gana/cede en 1 ciclo. ¿Obtiene un valor positivo o negativo? ¿Cómo se obtiene un ciclo termodinámico con la misma magnitud de trabajo pero con signo opuesto? Compárelo con el valor previamente calculado.
- * Para cada ciclo, calcule el cambio de entropía y luego súmelos para calcular el cambio de entropía del ciclo completo. ¿Tiene sentido esto según la segunda ley de la termodinámica? Discuta sus resultados.
- * Calcule la eficiencia del ciclo termodinámico y compárela con un ciclo de Carnot operando entre las 2 temperaturas: la mayor y menor.