

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE FISICOQUIMICA

MANUAL DE PRÁCTICAS DE
LABORATORIO DE TERMODINÁMICA
CLAVE: 1212

**Elaborado y revisado por profesores del
Departamento de Físicoquímica.**

Elaborado por: Dra. Aline Villarreal Medina
Revisado por: Dr. Gerardo Omar Hernández Segura M. en D. Ricardo Manuel Antonio Estrada Ramírez
Agradecemos a la DGAPA por los recursos otorgados mediante el proyecto PAPIME PE 102122 para el desarrollo de este protocolo.

GUÍA EXPERIMENTAL PARA EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING

Objetivo general

Conocer el principio de operación del motor Stirling y relacionarlo con los ciclos termodinámicos.

Objetivos particulares

Determinar las temperaturas del foco caliente y foco frío de la máquina térmica.

Calcular la eficiencia de la máquina térmica en la cual se lleva a cabo el ciclo de Stirling.

Obtener el calor absorbido y cedido por la máquina térmica.

Determinar el trabajo entregado por la máquina térmica.

Resumen

Mediante un motor de Stirling y su relación con los ciclos termodinámicos, se midieron experimentalmente las temperaturas del foco frío (pistón a temperatura ambiente) y del foco caliente (pistón a una temperatura mayor que la ambiente), con la finalidad de determinar su eficiencia. A partir del cálculo de la entalpía de reacción de combustión del etanol y midiendo la masa de etanol como combustible que se consumió durante este proceso, se determinó el calor absorbido por el motor (foco caliente), a partir del calor suministrado por dicha reacción de combustión, así como el calor cedido por este hacia el ambiente (foco frío). Finalmente, con la aplicación de la segunda ley de la termodinámica, se calculó el trabajo entregado por el motor a partir de la eficiencia y del calor absorbido por este.

Problema

Determinar la eficiencia del motor de Stirling, el trabajo entregado por este, así como las cantidades de calor absorbida y cedida, relacionándolo con los ciclos termodinámicos y la aplicación de la segunda ley de la termodinámica.

Introducción

El motor Stirling es un motor térmico que funciona a través de un ciclo de compresión y expansión de un gas. Se utilizan dos niveles de temperatura que hace que haya una conversión neta de energía térmica en energía mecánica (trabajo mecánico) [1].

Es un motor alternativo que funciona en un ciclo regenerativo termodinámicamente cerrado [2]. Este ciclo es el denominado “*ciclo de Stirling*”. La característica principal de este ciclo es que funciona con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo a diferentes niveles de temperatura. Su ciclo de trabajo consta de 2 procesos isocóricos (calentamiento y enfriamiento a volumen constante) y 2 procesos isotérmicos (compresión y expansión a temperatura constante) [3], cuyo diagrama se presenta en la Figura 1.

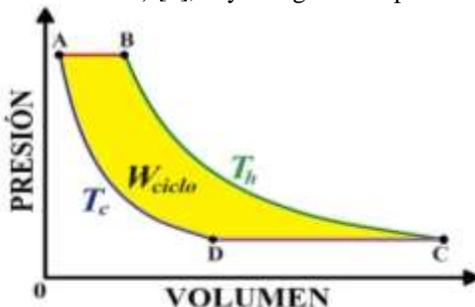


Figura 1. Diagrama de P vs V donde se representa el ciclo de Stirling.

Un ciclo termodinámico es una secuencia consecutiva de procesos, en los que el estado final, coincide con el estado inicial, cuya finalidad es mantener un suministro de energía útil como trabajo de forma continua y periódica.

Existen varios tipos de ciclos termodinámicos que poseen diferentes número y tipos de proceso. Sin embargo, uno en particular que se utiliza en los motores de combustión externa es el ciclo de Stirling, el cual se aplicará en este trabajo [3].

En la Figura 1, se presenta el ciclo termodinámico de Stirling, el cual consta de cuatro procesos cuasiestáticos reversibles y cuyo fluido de trabajo es aire: de A→B es un proceso de expansión isocórica; de B→C es un proceso de expansión isotérmica; de C→D es un proceso de compresión isocórica y de D→A es un proceso de compresión isotérmica [4].

Para este trabajo, se adquirió un motor Stirling tipo gamma (véase la Figura 2), comúnmente utilizado con fines recreativos [5]. Para las mediciones de temperatura, se utilizó un termómetro infrarrojo.



Figura 2. [] Fotografía que muestra el motor de Stirling, el cual consta de un cigüeñal y dos pistones (caliente que está en contacto con un mechero que le suministra calor a partir de la combustión de etanol y frío, que transfiere calor hacia los alrededores).

En todo ciclo termodinámico, el estado final, coincide con el estado inicial. Por lo tanto, si x es una función de estado, se cumple que:

$$\Delta x_{ciclo} = 0 \quad (1) \quad \text{o bien:} \quad \oint dx = 0 \quad (2)$$

Por lo tanto, para el ciclo termodinámico de Stirling que se lleva a cabo en este motor:

$$\Delta U_{ciclo} = 0 \quad (3) \quad \Delta H_{ciclo} = 0 \quad (4)$$

No obstante, al aplicar la primera ley de la termodinámica (ecuación energética) para un sistema cerrado como es el motor de Stirling, en donde se asume que todos los procesos son cuasiestáticos reversibles en este ciclo termodinámico:

$$\Delta U_{ciclo} = Q_{ciclo} + W_{ciclo} \quad (5)$$

Pero de acuerdo con la ecuación (3):

$$0 = Q_{ciclo} + W_{ciclo} \quad \text{o bien:} \quad Q_{ciclo} = -W_{ciclo} \quad (6)$$

Donde $W_{ciclo} < 0$, el cual está representado por el área contenida entre los cuatro procesos del ciclo termodinámico de Stirling y $Q_{ciclo} > 0$.

De acuerdo con este ciclo termodinámico, durante las etapas A→B de expansión isotérmica y de B→C de expansión isotérmica, la máquina térmica absorbe calor del foco caliente (Q_{abs}), el cual en este caso es suministrado por la combustión de una masa de etanol colocada en un mechero, en tanto que durante las etapas de C→D de compresión isocórica y de D→A de compresión isotérmica, el motor disipa calor hacia el foco frío (Q_{ced}) (medio ambiente) [4].

De acuerdo con el postulado de Carnot de la segunda ley de la termodinámica, no es posible construir una máquina térmica con un 100% de eficiencia. Esto implica que no toda la energía absorbida por la máquina térmica ($Q_{abs} > 0$), se puede convertir en su totalidad en trabajo entregado por esta ($W_{ciclo} < 0$), ya que parte de esta energía se disipa y se degrada en forma de calor hacia los alrededores que en este caso es el medio ambiente ($Q_{ced} < 0$). Por lo tanto, la eficiencia se puede definir como [6]:

$$\eta = \frac{\text{energía útil como trabajo}}{\text{energía suministrada como calor}} \quad (7)$$

Donde la eficiencia corresponde con los valores de $0 < \eta < 1$. Y en términos de la energía útil como trabajo que entrega la máquina térmica (W_{ciclo}) y la energía suministrada o absorbido por la máquina térmica (Q_{abs}), corresponde con [6]:

$$\eta = -\frac{W_{ciclo}}{Q_{abs}} \quad (8)$$

Pero de acuerdo con la ecuación (6), $Q_{ciclo} = -W_{ciclo}$ entonces:

$$\eta = \frac{Q_{ciclo}}{Q_{abs}} \quad (9)$$

Además, $Q_{ciclo} = Q_{abs} + Q_{ced}$. Por lo tanto, al sustituir dicha ecuación en (9):

$$\eta = \frac{Q_{abs} + Q_{ced}}{Q_{abs}} \text{ o bien } \eta = 1 + \frac{Q_{ced}}{Q_{abs}} \quad (10)$$

Por otra parte, la entropía es una función de estado y es una propiedad extensiva que si se aplica para un ciclo termodinámico, entonces, también se cumple que:

$$\Delta S_{ciclo} = 0 \quad (11)$$

Desarrollando el cambio de entropía para cada uno de los procesos involucrados en el ciclo termodinámico (véase la Figura 2), se obtiene:

$$\Delta S_{ciclo} = \Delta S_{A \rightarrow B} + \Delta S_{B \rightarrow C} + \Delta S_{C \rightarrow D} + \Delta S_{D \rightarrow A} \quad (12)$$

Las ecuaciones para gas ideal en proceso isocórico (procesos A→B y C→D) en términos de las temperaturas del foco caliente (T_h) y foco frío (T_c), (véase la Figura 2), se obtiene [7]:

$$\text{Para la expansión: } \Delta S_{A \rightarrow B} = nC_{v,m} \ln \frac{T_h}{T_c} \quad (13)$$

$$\text{Para la compresión: } \Delta S_{C \rightarrow D} = nC_{v,m} \ln \frac{T_c}{T_h} \quad (14)$$

Por su parte, las ecuaciones para gas ideal en proceso isotérmico (procesos B→C y D→A) en términos de las temperaturas del foco caliente (T_h) y foco frío (T_c), (véase la Figura 2), se observa que [7]:

$$\text{Para la expansión: } \Delta S_{B \rightarrow C} = \frac{Q_{B \rightarrow C}}{T_h} \quad (15) \quad \text{Para la compresión: } \Delta S_{D \rightarrow A} = \frac{Q_{D \rightarrow A}}{T_c} \quad (16)$$

Sustituyendo las ecuaciones (13), (14), (15) y (16) en la ecuación (12), entonces [6-8]:

$$\Delta S_{\text{ciclo}} = nC_{v,m} \ln \frac{T_h}{T_c} + \frac{Q_{B \rightarrow C}}{T_h} + nC_{v,m} \ln \frac{T_c}{T_h} + \frac{Q_{D \rightarrow A}}{T_c} \quad (17)$$

$$\text{O bien: } \Delta S_{\text{ciclo}} = nC_{v,m} \ln \frac{T_h}{T_c} + \frac{Q_{B \rightarrow C}}{T_h} - nC_{v,m} \ln \frac{T_h}{T_c} + \frac{Q_{D \rightarrow A}}{T_c} \quad (18)$$

$$\text{Simplificando: } \Delta S_{\text{ciclo}} = \frac{Q_{B \rightarrow C}}{T_h} + \frac{Q_{D \rightarrow A}}{T_c} = 0 \quad (19)$$

Pero: $Q_{B \rightarrow C} = Q_{\text{abs}}$ y $Q_{D \rightarrow A} = Q_{\text{ced}}$, entonces, al sustituir en la ecuación (19):

$$\Delta S_{\text{ciclo}} = \frac{Q_{\text{abs}}}{T_h} + \frac{Q_{\text{ced}}}{T_c} = 0 \quad (20)$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{Q_{\text{abs}}}{T_h} + \frac{Q_{\text{ced}}}{T_c} = 0 \quad \text{o bien:} \quad \frac{Q_{\text{ced}}}{T_c} = -\frac{Q_{\text{abs}}}{T_h} \quad (21)$$

$$\text{Reacomodando términos, se obtiene:} \quad \frac{Q_{\text{ced}}}{Q_{\text{abs}}} = -\frac{T_c}{T_h} \quad (22)$$

Sustituyendo la ecuación (22) en la ecuación (10), se puede construir una ecuación para la eficiencia de la máquina térmica en términos de las temperaturas del foco caliente (T_h) y foco frío (T_c), es decir [6-8]:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (23)$$

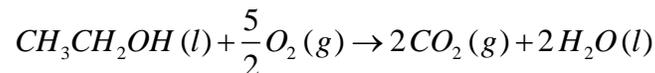
Cabe mencionar que las temperaturas T_h y T_c se expresan en escala absoluta (K).

La ecuación (23) se justifica con el Teorema de Carnot el cual afirma que la eficiencia de cualquier ciclo termodinámico reversible y que funcione entre las temperaturas T_h y T_c es la misma [8].

Para calcular la cantidad de calor absorbida por la máquina térmica (Q_{abs}) en unidades de (J), asumiendo que las pérdidas de calor son mínimas hacia el ambiente, primeramente se debe calcular la masa de etanol consumida en el proceso de combustión (en g), es decir:

$$m_{\text{etanol}} = m_{\text{mechero+etanol inicial}} - m_{\text{mechero+etanol final}} \quad (24)$$

El siguiente paso es plantear la reacción de combustión del etanol:



A partir de las entalpías de formación a condiciones estándar de cada una de las especies que participa en dicha reacción química, se calcula la entalpía de combustión del etanol (en kJ/mol), utilizando la siguiente ecuación [:

$$\Delta H_r^0 = \sum_i \nu_i \Delta H_{f, \text{productos}}^0 - \sum_i \nu_i \Delta H_{f, \text{reactivos}}^0 \quad (25)$$

Posteriormente, se convierte esta entalpía de reacción de kJ/mol a J/g, empleando la ecuación:

$$\Delta h_{\text{etanol}} = \left(\frac{\Delta H_r^0}{M_{\text{etanol}}} \right) \left(\frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right) \quad (26)$$

El calor absorbido por la máquina térmica (en J), a través de la ecuación:

$$Q_{\text{abs}} = -m_{\text{etanol}} \Delta h_{\text{etanol}} \quad (27)$$

A partir de la ecuación (23), se determina la eficiencia de la máquina térmica. A partir de la ecuación (8), se determina el trabajo entregado por la máquina térmica (en J), es decir:

$$W_{\text{ciclo}} = -\eta Q_{\text{abs}} \quad (28)$$

Y finalmente, a través de la ecuación (10), el calor cedido hacia los alrededores (en J), proveniente de la máquina térmica se puede calcular como:

$$Q_{\text{ced}} = (\eta - 1) Q_{\text{abs}} \quad (29)$$

Reactivos

Etanol (R.A. $\geq 99\%$).

Material y equipo

- 1 Motor Stirling configuración Gamma.
- 1 Motor generador de voltaje variable (Modelo: JQ24-125H670).
- 1 Multímetro (Stereon, MUL-601) ($\pm 0.001 \text{ V}$).
- 1 Termómetro infrarrojo ($\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$).
- 1 Balanza digital ($\pm 0.1 \text{ g}$).
- 1 Mechero de alcohol de 150 mL.
- 2 cables para multímetro.
- 1 encendedor.
- 1 cronómetro.

Procedimiento experimental

1. Colocar el motor Stirling en una superficie limpia y plana.
2. Conectar el multímetro a las terminales del motor utilizando los cables correspondientes.
3. Pesar el mechero de alcohol vacío y registrar la masa.
4. Llenar el mechero con etanol hasta el máximo de su capacidad.
5. Pesar el mechero y registrar su nueva masa.
6. Colocar el mechero debajo de la fuente caliente del motor y encender con ayuda de un encendedor.
7. Esperar aproximadamente 30 s, empujando rápidamente la biela, repetir esta operación hasta que los pistones comiencen a moverse por sí mismos.

8. En caso de que no se observe movimiento de los pistones, ajustar el motor pidiendo ayuda al profesor.
9. Una vez que el motor comience la operación, accionar el cronómetro.
10. Registrar la temperatura del pistón caliente y frío con ayuda del termómetro infrarrojo cada minuto aproximadamente por un par de minutos.
11. Registrar el voltaje entregado por el motor cada minuto durante un par de minutos.
12. Después de que el motor ha trabajado por un par de minutos, apagar el mechero y parar el cronómetro.
13. Con ayuda de un par de guantes, medir nuevamente la masa del mechero.
14. Regresar los materiales a su estado inicial.

Tabla de datos experimentales

Tabla 1. Registro de las masas del mechero y del combustible.

objeto:	masa (g):
Mechero vacío:	
Mechero + etanol al inicio:	
Etanol colocado al inicio:	
Mechero + etanol al final:	
Etanol sobrante al final:	
Masa de etanol consumida:	

Tabla 2. Registro de lectura del termómetro y del voltaje.

tiempo (min)	Temperatura pistón caliente (T_h °C)	Temperatura pistón frío (T_c °C)	Voltaje (V):
1			
2			
3			

Tratamiento de datos experimentales

A continuación, se registran los datos de las Tablas 1 y 2, los cuales son los siguientes:

Tabla 1. Registro de las masas del mechero y del combustible.

objeto:	masa (g):
Mechero vacío:	200.3
Mechero + etanol al inicio:	205.9
Etanol colocado al inicio:	5.6
Mechero + etanol al final:	200.3
Etanol sobrante al final:	0
Masa de etanol consumida:	5.6

Tabla 2. Registro de lectura del termómetro y del voltaje.

tiempo (min)	Temperatura pistón caliente (T_h °C)	Temperatura pistón frío (T_c °C)	Voltaje (V):
1	102.3	26.7	1.591
2	195.7	27.4	1.623
3	274.0	28.0	1.568



Figura 3. Fotografía que muestra el motor de Stirling, junto con el mechero de alcohol y el motor generador de voltaje.

En la Figura 3, se muestra una fotografía del montaje experimental del motor de Stirling en funcionamiento, acoplado a un motor generador de voltaje variable, en donde el calor del foco caliente es suministrado por la reacción de combustión del etanol en el mechero (pistón caliente), en tanto que el calor disipado por el motor hacia el ambiente (alrededores), se realiza en el pistón frío.

A partir de los datos de la Tabla 1, la masa de etanol que se consumió durante la combustión es:

$$m_{\text{etanol}} = m_{\text{mechero+etanol inicial}} - m_{\text{mechero+etanol final}} = 205.3 \text{ g} - 200.9 \text{ g} = 5.6 \text{ g}$$

El cálculo de la entalpía de la reacción de combustión del etanol a condiciones estándar se realiza a partir de las entalpías de reacción de las especies químicas involucradas, cuyos valores se muestran en la Tabla 3 [10,11]:

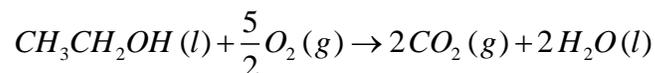


Tabla 3. Entalpías de formación a condiciones estándar de las especies químicas que participan en la reacción de combustión del etanol como combustible [10,11].

Sustancia:	ΔH_f^0 / (kJ/mol)
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} (l)$	-277.01
$\text{O}_2 (g)$	0
$\text{CO}_2 (g)$	-393.51
$\text{H}_2\text{O} (l)$	-285.83

Empleando la ecuación (25):
$$\Delta H_r^0 = \sum_i \nu_i \Delta H_{f, \text{productos}}^0 - \sum_i \nu_i \Delta H_{f, \text{reactivos}}^0$$

Desglosando la ecuación (25) en términos de la reacción de combustión del etanol, se tiene que:

$$\Delta H_r^0 = 2\Delta H_{f,CO_2} + 2\Delta H_{f,H_2O} - \left[\Delta H_{f,CH_3CH_2OH} + \frac{5}{2}\Delta H_{f,O_2} \right]$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 3, se obtiene:

$$\Delta H_r^0 = (2)(-393.51 \text{ kJ/mol}) + (2)(-285.83 \text{ kJ/mol}) - [(1)(-277.01 \text{ kJ/mol})]$$

$$\Delta H_r^0 = -1081.67 \text{ kJ/mol}$$

Enseguida, se realiza el cálculo de esta entalpía de reacción de kJ/mol a J/g, utilizando la masa molar del etanol, la cual tiene un valor de $M = 46 \text{ g/mol}$ y empleando la ecuación (26):

$$\Delta h_{etanol} = \left(\frac{\Delta H_r^0}{M_{etanol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right) = \left(\frac{-1081.67 \text{ kJ/mol}}{46 \text{ g/mol}} \right) \left(\frac{1000 \text{ J}}{1 \text{ kJ}} \right) = -23514.6 \text{ J/g}$$

El calor absorbido por la máquina térmica es suministrado por la reacción de combustión del etanol. Asumiendo que las pérdidas de calor hacia los alrededores es mínima, entonces, al aplicar la ecuación (27), se tiene que:

$$Q_{abs} = -m_{etanol} \Delta h_{etanol} = -(5.6 \text{ g})(-23514.6 \text{ J/g}) = 131681.6 \text{ J}$$

La eficiencia de la máquina térmica se puede calcular a partir de las temperaturas del foco frío (T_c) y del foco caliente (T_h), con ayuda de la ecuación (23):

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{301.15 \text{ K}}{547.15 \text{ K}} = 0.45$$

Por lo tanto, la eficiencia en porcentaje es del 45 %.

El trabajo entregado por la máquina térmica de Stirling, se determina con ayuda de la ecuación (28):

$$W_{ciclo} = -\eta Q_{abs} = -(0.45)(131681.6 \text{ J}) = -59204.4 \text{ J}$$

Como consecuencia de la degradación de la energía durante una transformación energética, el calor cedido por la máquina térmica, se puede obtener con la ecuación (29), esto es:

$$Q_{ced} = (\eta - 1)Q_{abs} = (0.45 - 1)(131681.6 \text{ J}) = -72477.2 \text{ J}$$

El resumen de los datos medidos experimentalmente y calculados, se muestran a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4. Resumen de datos medidos experimentalmente y calculados para la máquina de Stirling.

Magnitud:	Valor:
Temperatura del foco caliente T_h (°C):	274.0
Temperatura del foco frío T_c (°C):	28.0
Temperatura del foco caliente T_h (K):	547.15
Temperatura del foco frío T_c (K):	301.15
Entalpía de combustión del etanol ΔH_r^0 (kJ/mol):	-1081.67
Masa molar del etanol M (g/mol):	46
Entalpía de combustión del etanol Δh_{etanol} (J/g):	-23514.6
Masa de etanol consumida en la combustión m_{etanol} (g):	5.6
Calor absorbido por la máquina térmica Q_{abs} (J):	131681.6
Calor cedido por la máquina térmica Q_{ced} (J):	-72477.2
Trabajo entregado por la máquina térmica W_{ciclo} (J):	-59204.4
Voltaje promedio de salida (V)	1.594

Discusión de resultados

En la Tabla 4, se muestran los resultados experimentales y calculados. Se observa que esta máquina térmica absorbe 131681.6 J como calor, suministrado por la combustión de una masa de 5.6 g de etanol (foco caliente), asumiendo que las pérdidas de calor hacia los alrededores son mínimas. Se aprecia que la temperatura alta al interior de la máquina térmica durante la expansión isotérmica es de 274.0°C (547.15 K). Parte de esta energía suministrada se convierte en trabajo que desarrolla el ciclo y que entrega la máquina térmica de -59204.4 J. Esto quiere decir que el sistema (aire como fluido de trabajo) desarrolla trabajo contra los alrededores en esa magnitud de forma continua y periódica, mientras la máquina térmica permanezca en funcionamiento y que la diferencia de temperaturas entre los focos frío y caliente se mantenga continuamente. Sin embargo, como lo establece la segunda ley de la termodinámica y de acuerdo con el postulado de Carnot, en toda transformación energética, particularmente al transformar calor en trabajo, la eficiencia nunca es del 100 %, debido a que parte de la energía se disipa y se degrada irremediablemente como calor hacia los alrededores (ambiente). Aquí se aprecia que la máquina térmica disipa -72477.2 J como calor hacia el medio ambiente (foco frío), cuando su temperatura es de 28.0°C (301.15 K), cuando ocurre el proceso de compresión isotérmica.

Asimismo, el trabajo mecánico generado por el motor de Stirling, se transformó en trabajo eléctrico, a través de un motor generador de voltaje variable acoplado a este. La evidencia experimental de que ocurre este tipo de transformación es que al motor generador se conectó con un multímetro, el cual registró una lectura de voltaje de salida promedio de 1.594 V.

Conclusiones

La máquina térmica de Stirling puede modelarse como un ciclo termodinámico que consta de cuatro procesos cuasiestáticos reversibles: 2 de expansión y compresión isocórica alternados con 2 de expansión y compresión isotérmica.

El fluido de trabajo es aire, el cual se asume con comportamiento ideal.

Se confirmó que esta máquina térmica no posee un 100% de eficiencia, como lo establece el postulado de Carnot de la segunda ley de la termodinámica.

Esta máquina térmica de Stirling posee una eficiencia de 45 %, y produce -59204.4 J como trabajo mecánico.

Esta máquina térmica de Stirling absorbe 131681.6 J como calor que proviene de la reacción de combustión de una masa de 5.6 g de etanol (foco caliente), en tanto que disipa -72477.2 J hacia el ambiente (foco frío).

El trabajo mecánico que produce esta máquina térmica, a su vez se convierte en trabajo eléctrico, cuya evidencia es que proporciona un voltaje promedio de salida de 1.594 V.

Referencias

- [1] González-Bayón, J. J. y cols. (2011) Análisis de irreversibilidades en el comportamiento de un motor Stirling. *Ingeniería Mecánica*, 14 (2) 99-106.
- [2] Hernández-Millán, G. y col. (2012) ¿Cómo diversificar los trabajos prácticos? Un experimento ilustrativo y un ejercicio práctico como ejemplo. *Revista Educación Química*, 23 (no. extraordinario 1), 101-111.
- [3] Miranda Morales, José Arnulfo. (2008). Análisis termodinámico de un Motor de Ciclo Stirling [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional].
- [4] Cengel, Y. A. y Boles, M. A. (2012) *Termodinámica*. (pp. 508–511). Mc Graw Hill.

- [5] “Análisis de la operación de un motor Stirling como estrategia para el aprendizaje de ciclos termodinámicos” Aline Villarreal Medina y Gerardo Omar Hernández Segura. Memorias 3° Congreso Internacional de Educación Química, noviembre 2022.
- [6] Chang, R. (2008). *Fisicoquímica*. (pp. 134–135). Mc Graw Hill.
- [7] Atkins, P., De Paula, J. (2012). *Chimie* (pp. 559–697). De Boeck.
- [8] Laidler, K. J., Meiser, J. H. (2009). *Fisicoquímica*. (pp. 45–69). Grupo Editorial Patria.
- [9] Levine, I. N. (2009). *Physical Chemistry*. (pp. 141–144). Mc Graw Hill.
- [10] Speight, J. G. (2005). *Lange’s Handbook of Chemistry*. (pp. 1.262, 1.264). Mc Graw Hill.
- [11] Haynes, W. M. (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (pp. 5-1–5-42). CRC Press.

Agradecimientos

Agradecemos a la DGAPA por los recursos otorgados mediante el proyecto PAPIME PE 102122 “Actualización de la enseñanza experimental en Termodinámica 1212”, para el desarrollo de este protocolo.