Manual de prácticas del laboratorio de Termodinámica

Elaborado por:	Revisado por:	Autorizado por:	Vigente desde:
Ing. Agustín Hernández Quintero Ing. Gerardo Pacheco Hernández Ing. Alejandro Rojas Tapia M.I. Javier Alejandro Rosas Flores Dr. Jorge Ramírez Cruz	M.E. Antonia del Carmen Pérez León Q. Esther Flores Cruz Dr. Rogelio Soto Ayala M.I. Javier Alejandro Rosas Flores Ing. Gabriel Jaramillo Morales Ing. Martín Bárcenas Escobar Dr. Jorge Ramírez Cruz	Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales.	31 de julio de 2023

Índice de prácticas

		Página
Práctica 1	Presiones	3
Práctica 2	Temperatura	12
Práctica 3	Calor y variación de energía interna	21
Práctica 4	Calorimetría	30
Práctica 5	Equivalente mecánico del calor	38
Práctica 6	Entalpia de transformación	48
Práctica 7	Gasto másico, potencia y eficiencia de una bomba	57
Práctica 8	Ley de Charles	65
Práctica 9	Ley de Boyle-Mariotte	73
Práctica 10	Constante particular del aire	80
Práctica 11	Coeficiente de Joule-Thomson	88
Práctica 12	Análisis energético en un compresor	94

Práctica 1
Presiones

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Vasos de precipitados	Se pueden romper durante su utilización.
2	Campana de inmersión	Se puede romper durante su utilización.

2. Objetivos

- Demostrar la aplicación de presión relativa y absoluta para un fluido estático mediante el uso de un manómetro diferencial en U.
- Establecer el modelo matemático que relaciona la presión absoluta con la profundidad en distintos fluidos estáticos, asociándolos a la medición del manómetro diferencial.

3. Bases teóricas

Presión (P)

La presión es una propiedad intensiva, que se define como la razón de la fuerza normal (F), ejercida sobre un área (A) en cualquier punto de la frontera de un sistema. Sus unidades en el SI es el Pascal [Pa], definido como [N/m^2].

Matemáticamente: $P = \frac{F}{A}$

Presión absoluta (P_{abs}): Es la presión en un punto determinado del sistema que se mide con respecto a la presión cero absoluto (Figura 1).

Presión relativa (P_{rel}): Es la diferencia entre dos presiones absolutas (por lo general, la P_{atm} es una de ellas. La medición de la presión con un manómetro es un ejemplo de presión relativa, y el valor de la presión relativa puede ser positiva (Presión manométrica) o negativa (Presión vacuométrica) (Figura 1).

Presión relativa positiva (Presión manométrica- P_{man}): Es la diferencia entre la presión absoluta de un sistema y la presión atmosférica, siendo la presión del sistema mayorque la presión atmosférica. En este caso la presión absoluta del sistema se calcula como, (figura 1).

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

Presión relativa negativa (Presión vacuométrica- P_{vac}): Es la presión que se presenta cuando la presión atmosférica es mayor que la presión absoluta de un sistema. La presión absoluta de un sistema cuyo valor de presión manométrica es negativo y se calcula como:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac}$$

El estudio de la presión a diferentes profundidades en fluidos sin movimiento se denomina **presión hidrostática**. Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente debido a la aplicación de un esfuerzo cortante. Dentro de los fluidos existen dos tipos: Los **fluidos incompresibles**, donde la densidad es constante (*líquidos*), y **fluidos compresibles**, donde la densidad es variable (*gases*)

Presión barométrica o atmosférica (P_{atm} o P_{bar}): Es la presión que ejerce la atmósfera, es decir, el peso de la atmósfera que hay por encima de un área. Normalmente se conoce como presión barométrica debido a que se determina utilizando un barómetro de Torricelli. Su valor depende de la ubicación geográfica y el clima local. La atmósfera estándar se utiliza como valor de referencia y se define en función de la altura de una columna de mercurio que es soportada a nivel del mar en un barómetro de Torricelli, definiéndose así, como la presión ejercida por una columna de mercurio, cuya longitud es precisamente de 760 [mmHg] a una temperatura correspondiente al punto de fusión del agua sometido a una aceleración gravitacional estándar.

Equivalencia de la Presión atmosférica en otras unidades:

29.92 [in]Hg	1 [atm]	1.013 [bar]	101 325 [Pa]	14.7 [psi]	10.33 [m]H_2O	1.043 [kg_f/cm^2]

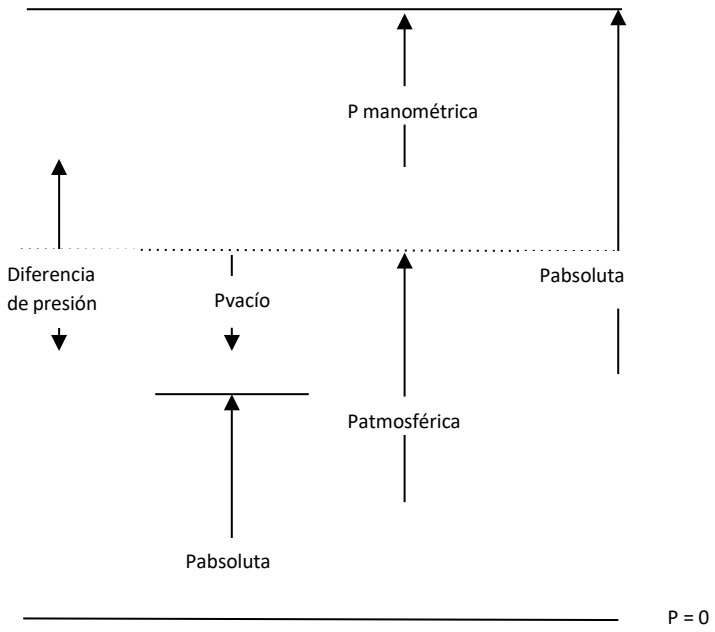

Figura 1. Tipos de presión.

Un **manómetro** es un instrumento que permite obtener el valor de la presión relativa de un sistema. Puede consistir en un tubo en forma de U que contiene un líquido manométrico, donde un extremo del tubo está a una presión P que se desea medir (la del sistema) y el otro, en contacto con la atmósfera, P_{atm}. Se necesita medir esta diferencia de presión en términos de la altura de una columna de líquido.

4. Equipo y material

Cantidad	Material
2	Flexómetro de 3 y/o 5 [m]
2	Manómetro diferencial en U con agua y campana de inmersión
2	Vaso de precipitados de 1000 (ml)
1	Litro de anticongelante (etilenglicol)
1	Litro de agua

5. Desarrollo

1. Sumergir la campana de inmersión, que se encuentra conectada al manómetro diferencial, en cada uno de los líquidos contenidos en los vasos de precipitados de 1 litro y observar el cambio en el nivel del líquido manométrico. Ver figura 2.

2. Utilizando el manómetro diferencial y los líquidos proporcionados:

   - Tomar lecturas de la diferencia de niveles del líquido manométrico que se establece entre los ramales del manómetro, cuando se sumerge la campana de inmersión a distintas profundidades en un líquido estático. Repetir el procedimiento para cada uno de los líquidos proporcionados y registrar los datos obtenidos en la tabla 1.

3. Calcular las diferencias de presión obtenidas.

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{atm} = \rho_{fm} g Z$$

Siendo ρ_f la densidad del fluido en el manómetro.

4. Convertir los valores de presión relativa o manométrica obtenidos a valores de presión absoluta. Consultar el instrumento.

5. Realizar y analizar el gráfico:

   - P_{abs} vs profundidad (para un fluido de densidad constante)

   - Determinar el modelo matemático que relaciona la presión absoluta con la profundidad para fluidos estáticos. Para ello se propone utilizar un modelo matemático lineal según:

$$P_{abs} = mh + P_0$$

Siendo “m” la pendiente y P_0, la ordenada al origen.

- Determinar el valor y significado de la pendiente, y la ordenada al origen en la gráfica **P_{abs} vs h** (profundidad).

- Determinar el valor de la densidad de la sustancia utilizada mediante el modelo matemático obtenido.

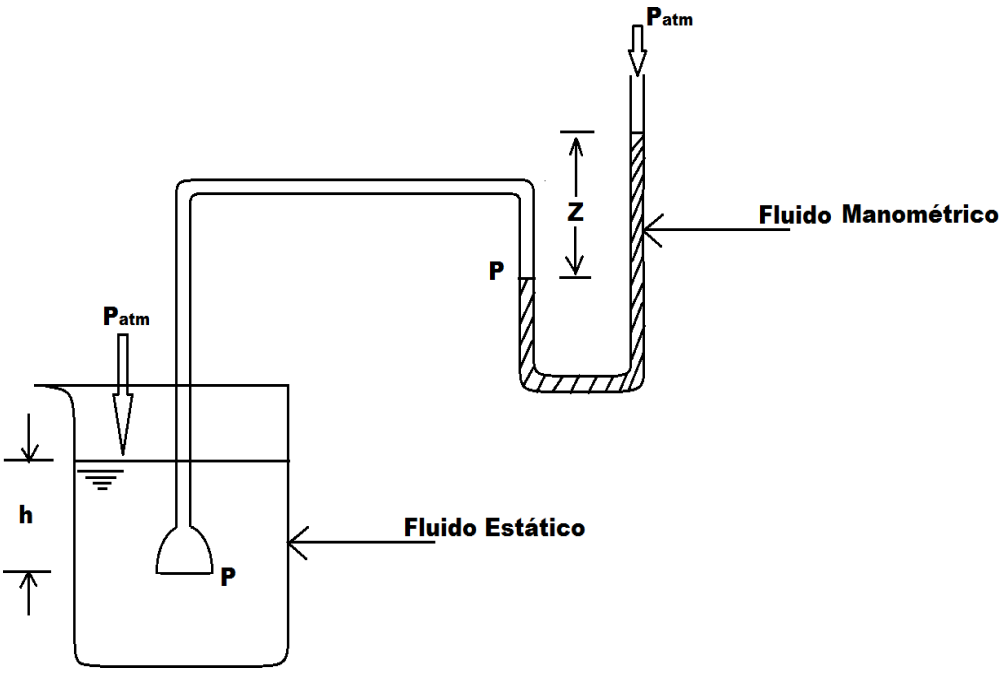

Figura 2. Esquema experimental

6. Resultados

Tabla No. 1 Valores experimentales obtenidos con el manómetro diferencial Fluido 1 (agua).

Evento	h [m]	Z [m]	P_{rel} [Pa]	P_{abs} [Pa]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Fluido 2 (anticongelante).

Evento	h [m]	Z [m]	P_{rel} [Pa]	P_{abs} [Pa]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

7. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Octava edición, 2010 España. Reverté.

8. Anexos

Cuestionario previo.

1. Defina: presión, presión absoluta, presión relativa (manométrica y vacuométrica).
2. Mencione las unidades en que puede expresarse la presión (al menos cinco unidades distintas).
3. Mencione al menos cinco instrumentos para medir la presión y explique brevemente su principio de funcionamiento.
4. ¿Qué es la presión atmosférica y cómo se mide?
5. Dé el valor de la presión atmosférica en las siguientes localidades: Playa Dos Bocas, Tabasco y Ciudad de México. Exprese su resultado en [mm] de mercurio, pascales y kilopascales.
6. La presión, ¿es una propiedad extensiva o intensiva? Justifique su respuesta.
7. Investigue las densidades del agua y etilenglicol a la presión de la Ciudad de México y 20 [°C].
8. La presión atmosférica promedio registrada durante 6 semanas en la Ciudad de México, es la siguiente:

Altura h [m]$_{Hg}$	**0.25**	**0.35**	**0.45**	**0.55**	**0.65**	**0.75**
Patm [kPa]	**110.90**	**124.03**	**134.40**	**150.00**	**163.00**	**175.80**

Use el método de los mínimos cuadrados para obtener el modelo matemático de la presión en función de la altura y determine el valor de la presión atmosférica a una altura de 0.50 $[m]_{Hg}$.

9. Indique cómo varía la presión en un fluido que se encuentra estático.

10. Escriba la ecuación del gradiente de presión.

9. Índice de temas de estudio

Práctica núm. 1. Presión

- Investigue sobre el Sistema Internacional de Unidades.
- Definir los siguientes conceptos:
- Densidad
- Densidad relativa
- Masa
- Volumen
- Volumen específico
- Peso
- Peso específico
- Presión
- Presión relativa
- Presión absoluta
- Presión hidrostática
- Presión atmosférica
- Barómetro de Torricelli.
- Manometría.

Práctica 2
Temperatura

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Termómetro de inmersión	Se puede romper el bulbo que contiene el alcohol.
2	Vasos de precipitados	Se pueden romper durante su utilización
3	Parrilla eléctrica	Tener cuidado en su manejo debido al calentamiento de la misma.

2. Objetivos

- Comprender el fundamento termodinámico de la medición de la temperatura.
- Construir la curva de calentamiento del agua.
- Obtener mediciones de temperatura con tres termómetros distintos y para cada uno determinar:
  - Rapidez de respuesta (sensibilidad).
  - Facilidad de lectura.
  - Rango.
  - Resolución.

3. Bases teóricas

Temperatura

Definir la temperatura no es sencillo, frecuentemente se dice que la temperatura es una propiedad termodinámica intensiva que ayuda a clasificar a los sistemas como calientes o fríos. Esta forma de definir a esta propiedad en ocasiones es confusa y ambigua. Sin embargo, podemos decir que la temperatura es la propiedad termodinámica que se encuentra asociada al equilibrio térmico, o bien, es la propiedad que establece cuando dos o más sistemas que interaccionan entre sí, se encuentra en un estado térmico de equilibrio.

Equilibrio térmico.

El equilibrio térmico se presenta cuando dos sistemas, uno a mayor temperatura que el otro, se ponen en contacto; en el sistema de mayor temperatura, al transcurrir el tiempo, su temperatura disminuye y por el contrario, el sistema que inicialmente tenía baja temperatura, aumenta, de tal manera que la diferencia de

temperaturas disminuirá. Si ambos sistemas se encontraran aislados del entorno y únicamente se presenta la interacción entre ellos, la diferencia en el valor de sus propiedades disminuirá de tal manera que ambos lleguen a las mismas condiciones y, por tanto, a la misma temperatura, en este momento los sistemas se encuentran en equilibrio térmico.

Ley cero de la Termodinámica.

Esta ley establece que, si un sistema A se encuentra en equilibrio térmico con un sistema B y, si a su vez, el sistema B se encuentra en equilibrio con un sistema C, forzosamente, los tres sistemas se encuentran en equilibrio térmico entre sí.

Termómetros

Para conocer la temperatura de un sistema termodinámico se utilizan los instrumentos conocidos como termómetros y cada uno de éstos tiene su principio de operación, entre los cuales se encuentran los siguientes:

Termómetro de bulbo con alcohol o inmersión.
Termómetro bimetálico.
Termopar.
Termómetro de gas a presión constante.
Pirómetro de radiación.

Existen diferentes propiedades de las sustancias que se encuentran asociadas a la propiedad termodinámica llamada ***temperatura***, como son: longitud, volumen, resistividad eléctrica, etc., esto significa que al modificar alguna sustancia su temperatura, modificará también las propiedades mencionadas. Bajo este principio es como operan los termómetros.

Escalas de temperatura:

Escala Celsius	[°C]
Escala Fahrenheit	[°F]
Escala Kelvin	[K]
Escala Rankine	[R]

4. Equipo y material

Cantidad	Material
1	Termómetro de bulbo con alcohol
1	Termopar de cromel-alumel (color amarillo)
1	Termómetro Bimetálico
1	Vaso de precipitados de 250 [ml] con mezcla de hielo y agua líquida
1	Parrilla eléctrica
1	Soporte Universal
1	Pinza de tres dedos
1	Pinza para tubo de ensayo
1	Pinza para termómetro
1	Cronómetro
1	Agitador magnético
1	Multímetro digital

5. Desarrollo

1. Ensamble el equipo tal como se muestra en la figura 1, cuidando que los termómetros estén lo más juntos posible sin tocarse entre sí y sin tocar el recipiente.
   Nota: Asegúrese que el termopar no toque la parrilla ni las paredes de vaso de precipitados, y que las puntas de los termómetros se ubiquen al mismo nivel.

2. Tomar las lecturas iniciales de temperatura en cada termómetro.

3. Encender la parrilla a su máximo nivel de calentamiento y con agitación media.

4. Tomar cada medio minuto las lecturas de temperatura de cada termómetro, hasta que el agua esté en ebullición, registrando los valores en la **Tabla 1**.

5. Una vez que el agua ha hervido, registrar 5 lecturas más. Posteriormente, apagar la parrilla y retirarla con cuidado.

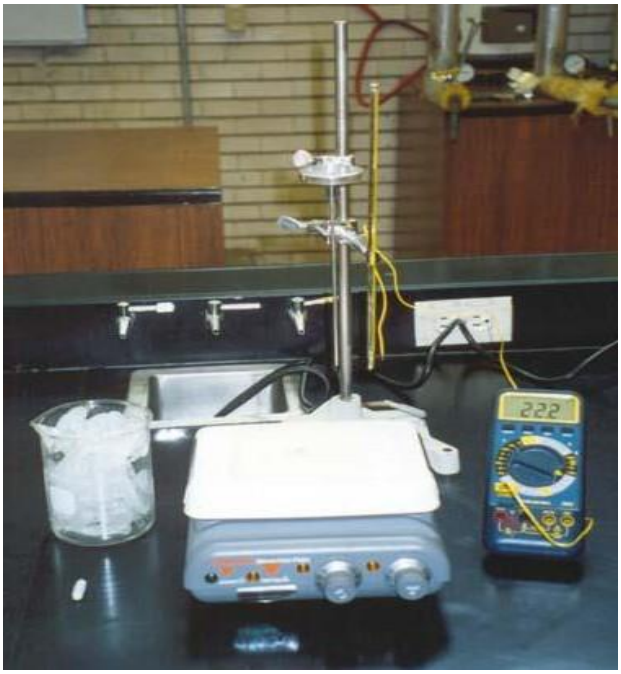

Figura 1. Ensamble de material.

6. Resultados

Tabla 1. Medición de las temperaturas durante el calentamiento de agua

Tiempo [min]	$T_{termopar}$ [°C]	$T_{bimetálico}$ [°C]	$T_{alcohol}$ [°C]
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0			
3.5			
4.0			
4.5			
5.0			
5.5			
6.0			

6.5			
7.0			
7.5			
8.0			
.			
.			
Hasta temperatura de ebullición			

Graficar:

- Temperatura en función del tiempo para el calentamiento.
- Colocar en este gráfico un diagrama de dispersión y una curva de ajuste por cada termómetro.

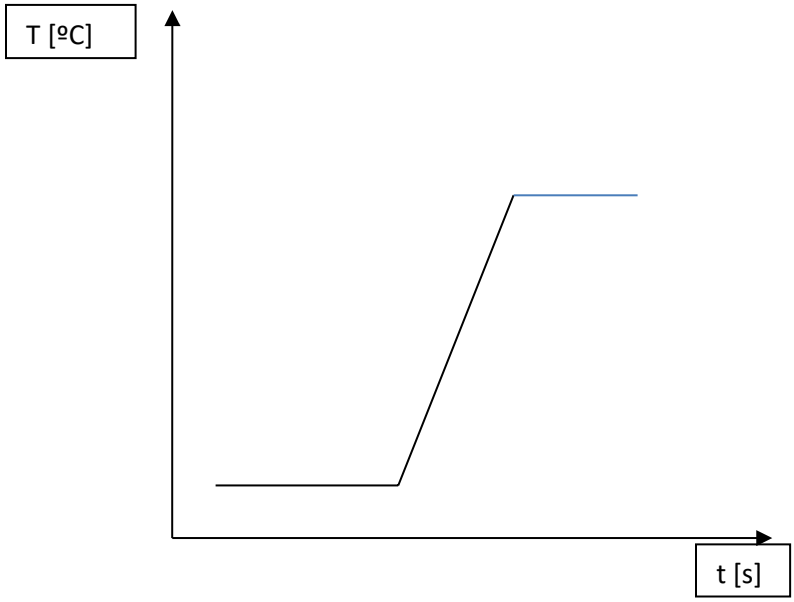

Figura 2. Curva de calentamiento de agua

Obtener:

- Rango: Es el intervalo que puede medir el termómetro. Nota: El rango del termopar se consulta en la bibliografía.
- Resolución: Es la lectura mínima que puedes leer en un instrumento de medición
- Rapidez de respuesta: Se toma como la pendiente de las curvas de ajuste, la ordenada al origen es el error de calibración.
- Facilidad de lectura: Es un valor que se asigna según el criterio del experimentador.

Tabla 2. Características de los termómetros utilizados.

Termómetro	Rango	Resolución	Facilidad de lectura	Rapidez de respuesta
De inmersión				
Bimetálico				
Termopar				

7. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición, 2001 España. Editorial Mc Graw Hill.

- Cengel, Yunus A. y Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición 2015. México.

- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología. Sexta edición 2010. España. Editorial Reverté.

- Si se utilizan páginas web, éstas deben ser confiables, como aquellas elaboradas por profesores universitarios o universidades reconocidas.

8. Anexos

Cuestionario previo.

Temperatura

1. Defina: equilibrio, equilibrio térmico y equilibrio termodinámico.
2. ¿Qué establece la ley cero de la Termodinámica?
3. ¿Cuáles son las escalas de temperatura absoluta y relativa en el sistema internacional y en el sistema inglés?
4. ¿Qué es la temperatura desde el punto de vista de la termodinámica clásica?
5. Dibuje un esquema de la curva de calentamiento del agua y explíquela.
6. ¿Cuáles son los puntos de referencia para determinar las escalas empíricas de temperatura?
7. Mencione cinco propiedades de las sustancias que se utilizan para medir la temperatura.
8. Explique el principio de funcionamiento de los termómetros siguientes: de bulbo con alcohol o de inmersión, termopar, bimetálico, pirómetro de radiación, de gas a volumen constante y de gas a presión constante.
9. Investigue el punto de ebullición y de fusión del agua a nivel del mar y en la Ciudad de México.
10. ¿Qué es el cero absoluto de temperatura?

9. Índice de temas de estudio.

PRÁCTICA: "TEMPERATURA"

- Concepto de temperatura.
- Ley cero de la Termodinámica.
- Escalas empíricas de temperatura.
- Escalas absolutas de temperatura.
- Propiedades termométricas.
- Principio de operación de los termómetros.
- Tipos de termómetros (rango, resolución, facilidad de lectura, rapidez de respuesta).
- Cambio de fase de una sustancia pura.
- Curva de calentamiento del agua.

Práctica 3

Calor y variación de energía interna

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Resistencia de inmersión	La resistencia debe estar sumergida en agua cuando se ponga en operación, puede ocasionar quemadura
2	Termómetro de inmersión	Se puede romper el bulbo que contiene el alcohol.
3	Parrilla eléctrica	Tener cuidado en su manejo debido al calentamiento de la misma.

2. Objetivos

- A partir de la primera ley de la termodinámica ($Q+W= \Delta U$), determinar la relación existente entre la variación de la temperatura ΔT y el calor Q así como la relación entre el calor Q y la masa *m* para el agua líquida.
- Construir el modelo gráfico que relaciona las variables ΔT y ΔU durante el calentamiento del agua líquida.
- Obtener el modelo matemático que relacione las variables ΔT y ΔU.

3. Bases teóricas

La energía que puede fluir a través de las fronteras de un sistema debido a una diferencia de temperaturas cae dentro de un análisis más profundo. Por ejemplo, cuando una lata de una bebida refrescante helada se coloca en un cuarto caliente, la experiencia ha mostrado que la bebida (el sistema) aumenta su temperatura hasta aproximarse a la del cuarto. El estado termodinámico del sistema ha cambiado ya que por sus fronteras cruza energía desde el ambiente a causa de la diferencia de temperaturas entre el cuarto y la bebida. Esta transferencia de energía no es trabajo, ya que no es posible imaginar un procedimiento en que el único efecto sea la elevación de un peso. Por lo tanto, esta forma desorganizada de energía que cruza las fronteras del sistema, debido a una diferencia de temperaturas entre el sistema y sus alrededores, se define como ***transferencia de calor***

De manera que, si en un sistema, térmicamente aislado, se efectúa un proceso en el cual el sistema absorbe una cantidad de trabajo W (+) de sus alrededores, se satisface la ecuación.

$$\Delta \boldsymbol{U} - \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{adiabático}} = \boldsymbol{0}$$

Sin embargo, el mismo proceso ocurre cuando el proceso no es adiabático, en general el miembro derecho es diferente de cero, porque puede intercambiarse energía en forma de calor. Entonces:

$$\Delta \boldsymbol{U} - \boldsymbol{W} = \boldsymbol{Q} \text{ o bien } \Delta \boldsymbol{U} = \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{W}$$

Si en el sistema no se presenta interacción energética como trabajo la ecuación resultante es:

$$\Delta \boldsymbol{U} = \boldsymbol{Q}[\boldsymbol{J}]$$

$$\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{mc}(\boldsymbol{T_f} - \boldsymbol{T_i})[\boldsymbol{J}] = \Delta \boldsymbol{U}[\boldsymbol{J}]$$

Donde:

ΔU = Cambio en la energía interna
Q = Calor
c = Capacidad térmica específica
T_i = Temperatura inicial
T_f = Temperatura final

4. Equipo y material

Cantidad	Material
1	Parrilla eléctrica
3	Vasos de precipitados de 250 [ml]
1	Watthorímetro
1	Termo
1	Resistencia de inmersión
2	Termómetros de bulbo con alcohol o de inmersión
1	Cronómetro
1	Balanza de triple brazo
600 [g]	Agua

5. Desarrollo

Para el cumplimiento del primer objetivo

1. Agregar a cada vaso de precipitados la misma cantidad de agua (ver la tabla 1).
2. Encender la parrilla, colocar la perilla de calentamiento a una potencia calorífica equivalente al número dos.
3. Introducir el termómetro en uno de los vasos y registrar el valor de la temperatura inicial ($T_{inicial}$) de la sustancia.
4. Colocar el vaso sobre la superficie de la parrilla.
5. Tomar un tiempo (t) de dos minutos y registrar otra vez la lectura de temperatura (T_{final}) del sistema. Después de esto retirar el vaso de la superficie de la parrilla.
6. A continuación, repetir los pasos anteriores con otro de los vasos, colocar la perilla de calentamiento con una potencia calorífica equivalente al número cuatro.
7. Repetir el procedimiento anterior para el tercer vaso, variando la perilla de calentamiento a una potencia calorífica equivalente al número seis.
8. Analizar la información obtenida mediante el cálculo del calor, Q.

Tabla 1

Vaso No.	Masa [g]	T_i [°C]	t [s]	T_f [°C]	Q [J]
1	75		120		
2	75		120		
3	75		120		

Utilizar los mismos vasos de precipitados, pero ahora cada uno con distinta masa de agua 50 [g], 75 [g] y 100 [g]) como se muestra en la tabla 2.

Para el desarrollo de esta segunda parte, se contempla mantener una potencia calorífica ($\dot{Q} = \frac{Q}{t}\left[\frac{J}{s}\right]$) constante.

1. Con el agua de cada vaso a una misma temperatura inicial, la temperatura final también deberá ser la misma al término de los experimentos. Para esto, es importante determinar el valor del tiempo que se necesita mantener la parrilla encendida.
2. Puesto que las masas propuestas son m_1= 50 [g], m_2= 75 [g] y m_3= 100 [g], lo que equivale a m_2= 1.5 m_1 y m_3= 2 m_1, es necesario considerar la misma relación en el calor trasferido para llegar a la misma temperatura final, de tal manera, que Q_2= 1.5Q_1 y Q_3= 2Q_1, por lo tanto, el cálculo del calor se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_1 = m_1 c\Delta T = \dot{Q}_1 t_1$$

$$Q_2 = 1.5\ Q_1 = 1.5\ m_1 c\Delta T = 1.5\ \dot{Q}_1 t_1$$

$$Q_3 = 2\ Q_1 = 2\ m_1 c\Delta T = 2\ \dot{Q}_1 t_1$$

Considerando que la potencia calorífica se mantiene contante (perilla de calentamiento en el número 4), se puede decir que la relación del tiempo es el siguiente: t_2= 1.5 t_1 y t_3= 2 t_1. Por tal motivo, si se propone un tiempo de 60 segundos para el primer vaso (t_1), es suficiente para completar la tabla 2 y comprobar que se tendrá la misma temperatura final.
3. En función de lo realizado, analizar la información mediante el cálculo del calor (Q).

Tabla 2

Vaso No.	**Masa [g]**	**T_i [°C]**	**t [s]**	**T_f [°C]**	**Q [J]**
1	**50**		**60**		
2	**75**		**90**		
3	**100**		**120**		

4. Con los dos eventos anteriores, representados por las tablas 1 y 2, llegar a una conclusión general de la relación existente entre el calor (Q) con respecto a la masa (m) y a la variación de temperatura (ΔT).

Para el cumplimiento del segundo objetivo

1. En el termo depositar aproximadamente 600 gramos de agua para cubrir la resistencia de inmersión que está acoplada al recipiente, registrar la cantidadde agua utilizada como:
   Masa de agua _____[g]
2. Cerrar el sistema y colocar en el interior de él, un termómetro de bulbo con alcohol.
3. Registrar la temperatura inicial ($T_{inicial}$) en la tabla 3.
4. Verificar que el watthorímetro se encuentre apagado y conectarlo a la corriente eléctrica, y a su vez, conectar el cable de la resistencia al watthorímetro.
5. Encender el watthorímetro y tomar las lecturas de la temperatura en cada vuelta del equipo hasta una temperatura final de 80 [°C]. Registrar en la tabla 3.
6. Realizar la gráfica Q vs ΔT, $\Delta T = T_f - T_i$, (T_i será siempre la temperatura al inicio del proceso). Véase la figura 1.

   Siendo $Q = kN = \Delta U$

   De acuerdo con la 1ª Ley de la Termodinámica aplicada a un sistema cerrado $Q + W = \Delta U$, como no hay trabajo, se tiene $Q = \Delta U$.

   Donde:
   Q = Calor
   ΔU = Cambio en la energía interna del sistema
   k = Constante del watthorímetro
   N = Número de vueltas

7. Obtener el modelo matemático que relacione ΔU y ΔT utilizando el métodode regresión lineal y describir el significado de la pendiente y la ordenada alorigen.

Tabla 3

Evento	No. de vueltas N	T [°C]	Q = ΔU = K N [J]	ΔT [°C]
1		$T_{inicial}$		
2		.		
3		.		
4		.		
.		.		
n		T_{final}		

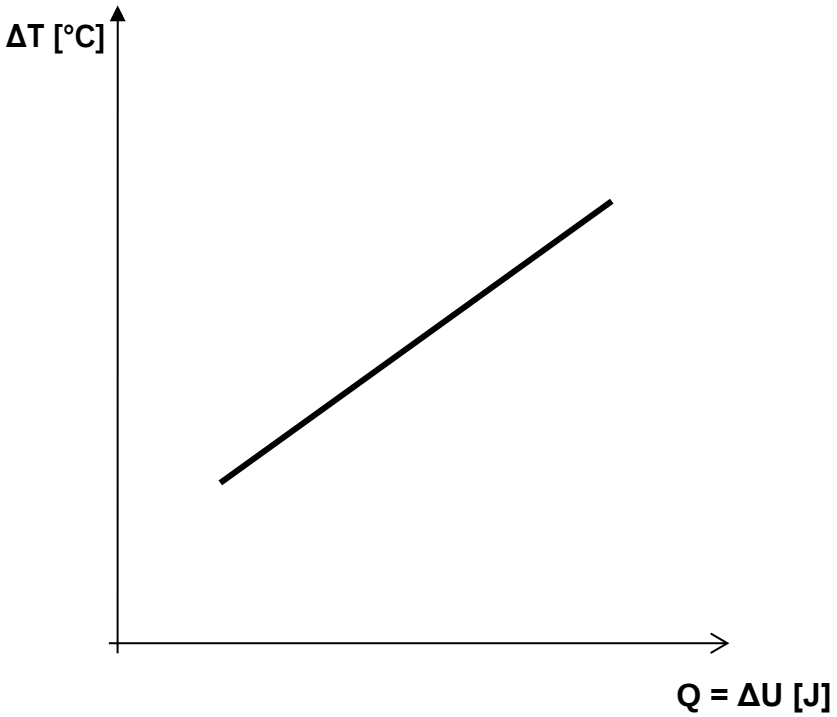

Figura 1. Gráfica de calentamiento del agua

5. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica. Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A, Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015, Mc Graw Hill.
- Tippler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología. Octava edición, España 2010. Editorial Reverté.
- Jiménez González, J. Manual de Experiencias del Calor. Sexta edición. Madrid 1973. Imprenta y Papelería Artes Gráficas.
- Páginas web, confiables, como aquellas elaboradas por profesores universitarios o universidades reconocidas.

6. Anexos

Cuestionario previo.

Calor y variación de energía interna

1. Defina el concepto de calor.
2. Defina el concepto de energía interna considerando un enfoque macroscópico
3. Explique el concepto de capacidad térmica específica.
4. Describa los mecanismos de propagación de calor por conducción, convección y radiación.
5. Explique por qué un abrigo no permite que la persona que lo usa sienta frío.
6. ¿Por qué no es conveniente hablar de la cantidad de calor contenido en un cuerpo?

7. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: "Calor y variación de energía interna"

Concepto de:

- Calor
- Calorimetría
- Calorímetro
- Convención de signos para indicar la interacción energética como calor
- Cambio de fase de una sustancia pura.
- Curva de calentamiento del agua.
- Fase de una sustancia pura.
- Temperatura.
- Termómetros.

Práctica 4
Calorimetría

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Agua	El agua a temperaturas altas puede ocasionar quemaduras.
2	Parrilla eléctrica	Tener cuidado de su manejo debido a la elevación de temperatura de la misma.
3	Vaso de precipitado	En caso de ruptura puede causar heridas.

2. Objetivos

- Identificar los metales proporcionados mediante sus valores de densidad.
- Determinar el valor experimental de la capacidad térmica específica de los metales proporcionados.

3. Bases teóricas

El calor es la energía que se transfiere de un sistema a otro debido a una diferencia de temperatura entre ellos.

La teoría moderna del calor la da a conocer James Prescott Joule demostrando que, el incremento o disminución de la energía interna va acompañada de una energía en tránsito. El calor es una forma de energía que no se conserva. Sin embargo, la energía es una cantidad física que se conserva.

La temperatura de un sistema generalmente aumenta cuando se le suministra energía en forma de calor. Es un hecho conocido que la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un sistema es proporcional tanto a la variación de temperatura, como a la masa del sistema, cuando en el proceso no existe un cambio de fase.

Calorimetría

La calorimetría es la rama de la termodinámica que se encarga de “cuantificar la transferencia de calor entre dos o varios sistemas”. Por lo general, este tipo de estudios se realiza en un dispositivo llamado calorímetro, generalmente de paredes rígidas y adiabáticas.

4. Equipo y material

Cantidad	Material
2	cilindros metálicos
1	balanza de triple brazo
1	recipiente metálico
1	pinza para tubo de ensayo
1	soporte para metales
1	parrilla eléctrica
1	calorímetro de aluminio
1	termopar con multímetro
1	Calibrador con vernier
1	Vaso de precipitados de 250 ml
1	Jeringa de 5 ml

5. Desarrollo

1. Medir la masa y las dimensiones que permitan calcular el volumen de cada cilindro. Anotar las medidas obtenidas en la tabla 1

2. Calcular la densidad del metal de los cilindros y con apoyo de la tabla 2, identificar el metal que se está utilizando. Anotarlo en la tabla 1.

3. Poner agua hasta aproximadamente a 1 [cm] del borde en el recipiente metálico y elevar su temperatura con ayuda de la parrilla empleando el máximo nivel de potencia.

4. Colocar los cilindros en el soporte para metales y sumergirlos completamente en el agua sin que toquen el recipiente, hasta que el agua alcance la temperatura de ebullición.

5. Colocar 100 [g] de agua dentro de del calorímetro y después de dos minutos (una vez que se alcanza el equilibrio entre el agua y el aluminio) medir la temperatura ($T_{i\ Agua} = T_{i\ Cal}$). Anotar los datos medidos en la tabla 3.

6. Registrar la temperatura de ebullición del agua (T_{im}).

7. Con ayuda de las pinzas sujetar cuidadosamente uno de los cilindros metálicos (evitar que el cilindro toque el fondo del recipiente) y colocarlo

8. en el interior del calorímetro, en seguida tapar el calorímetro y esperar aproximadamente 1 minuto a que el sistema alcance el equilibrio.

9. Tomar la temperatura de equilibrio del sistema y anotarlo en la tabla 3.

10. Sacar el cilindro metálico del calorímetro y vaciar el agua en la tarja.

11. Colocar nuevamente 100 [g] de agua en el calorímetro de aluminio y después de dos minutos (una vez que se alcanza el equilibrio entre el agua y el aluminio) tomar la temperatura inicial. Repetir los pasos 6 y 7 con el segundo cilindro metálico.

12. Tomar la temperatura de equilibrio para el segundo cilindro. Posteriormente, sacar el cilindro metálico y vaciar el agua del calorímetro en la tarja.

13. Apagar la parrilla y vaciar el agua del recipiente metálico en un recipiente especial para el agua caliente (NO VACIAR EN LA TARJA).

14. Finalmente, mediante calorimetría obtener la capacidad térmica específica experimental de los cilindros metálicos y anotarla en la tabla 3.

Figura 1. Equipo y material a utilizar

6. Resultados

Para cada cilindro, llenar las tablas 1 y 3, con apoyo de la tabla 2.

Tabla 1. Características y dimensiones de los cilindros.

Muestra metálica	**Masa [kg]**	**D_T [m]**	**d_p [m]**	**H [m]**	**V [m^3]**	**$\rho_{experimental}$ [kg/m^3]**	**Metal identificado**	**%EE**
1								
2								

Donde:

D_T = Diámetro transversal del cilindro
d_p = Diámetro de la perforación
H = Altura del cilindro
V = Volumen del cilindro
$\rho_{exp.}$ = Densidad experimental
%EE = Porcentaje de error de exactitud de densidades

Tabla 2. Tabla de propiedades de metales.

Metal	**Densidad [kg/m^3]**	**Capacidad térmica específica [J/(kg ºC)]**
Níquel	8890	440
Aluminio	2700	896
Hierro	7840	450
Magnesio	1730	1000
Acero	7750	460

Tabla 3. Temperaturas y capacidades térmicas específicas

Muestra metálica	$T_{i\ Agua}$= $T_{i\ Cal}$ [°C]	T_{im} [°C]	T_{eq} [°C]	c [J/(kg ºC)] calculada	%EE
1					
2					

Donde:

$T_{i\ Agua}$ = temperatura inicial del agua
$T_{i\ Cal}$ = temperatura inicial del calorímetro
T_{im} = temperatura inicial de la muestra
T_{eq} = temperatura de equilibrio
c = capacidad térmica específica de la muestra

Considere:

m_{cal}= 48.7 [g] y c_{cal}=0.896 [kJ/(kg °C)]

7. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Rolle, Kurt C. Termodinámica. Sexta Edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice hall.

8. Anexos

Cuestionario previo.

Calorimetría

1. Explique en qué consiste la técnica llamada calorimetría.
2. Explique qué es un calorímetro.
3. Escriba la relación matemática que se utiliza para cuantificar la capacidad térmica específica de un metal.
4. Investigue en la literatura la capacidad térmica específica y la densidad de cada una de las siguientes sustancias: hierro, estaño, aluminio, cobre y acero en [cal/(g°C)] y [kJ/(kg°C)].
5. Un trozo de plomo de 250 [g] se calienta hasta 101 [°C] y se coloca en un calorímetro de cobre de 350 [g], el cual contiene 2 [l] de agua a 19 [°C]. Determine la temperatura final del plomo.
6. Para determinar la capacidad térmica específica de un bloque de 110 [g] de cierto material, se introduce éste en un calorímetro de cobre de 30 [g] que contiene 65 [g] de agua. El sistema inicialmente se encuentra a 27 [°C]. Posteriormente se añaden 115 [ml] de agua a 78 [°C] al calorímetro. Cuandose alcanza el equilibrio térmico, la temperatura del agua es 51 [°C]. Determine la capacidad térmica específica del bloque, en [kJ/(kg°C)].
7. Explique cómo funciona el calibrador con vernier.
8. Explique cómo funciona la balanza de triple brazo.

9. Índice de Temas de Estudio

PRÁCTICA: "Calorimetría"

Concepto de:

- Calor
- Capacidad térmica específica
- Calorimetría
- Calorímetro
- Energía en forma de calor

Práctica 5

Equivalente mecánico del Calor.

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Equipo del equivalente mecánico del calor	Fijarlo adecuadamente en la mesa de trabajo, teniendo cuidado que no se desensamble para evitar dañarlo

2. Objetivos

- Determinar el trabajo y el calor asociados a un sistema mecánico.
- Obtener el valor experimental del equivalente mecánico del calor.

3. Bases teóricas

El trabajo y la energía se encuentran entre los conceptos más importantes de la física. Desde el punto de vista de la mecánica clásica, el trabajo se define como:

> La fuerza que actúa sobre un objeto que se mueve a través de una distancia y existe un componente de la fuerza a lo largo de la línea de movimiento. Si la fuerza es constante en una sola dimensión, el trabajo realizado es igual a la fuerza multiplicada por la distancia.

Esto es:

$$\boldsymbol{\delta W = F \cdot ds}$$

Integrando

$$\boldsymbol{W = F\,(s_2 - s_1)}$$

Donde:

W = Trabajo aplicado [J]
F = Fuerza aplicada [N]
s = Distancia [m]

Desde el punto de vista de la termodinámica, el trabajo es un concepto más extenso que el tradicionalmente utilizado en la mecánica clásica.

Algunas definiciones de trabajo son:

- **La energía transferida a través de las fronteras de un sistema en forma organizada y cuyo único efecto es la elevación de un peso.**

- **Una energía en tránsito entre un sistema y su entorno, a través de aquellos límites del sistema en que no existe transferencia de masa y como consecuencia de la diferencia de una propiedad intensiva, que no sea la temperatura, entre el sistema y su entorno.**

El trabajo realizado para pasar de un estado inicial de equilibrio a un estado final de equilibrio puede tomar cualquier valor, dependiendo de la trayectoria que se elija. El trabajo no es una propiedad ya que no es posible especificarlo por el sólo conocimiento del estado termodinámico del sistema.

Convención de signos:

Si el trabajo se realiza sobre el sistema por el entorno, es positiva **(+)**
Si el trabajo se realiza por el sistema sobre el entorno, es negativo **(-)**

Trabajo de eje o de flecha.

La transmisión de energía mediante un eje rotatorio es muy común en los sistemas termodinámicos. Si el momento de torsión o par aplicado al eje se considera constante, significa que la fuerza F aplicada también es constante. Para un determinado momento de torsión o torque constante, el trabajo realizado durante *n* revoluciones se determina como:

Una fuerza (F) que actúa por medio de un brazo de radio (r) genera un momento de torsión (M).

$$\delta W = M \cdot d\theta$$

Donde:

$$M = F\,r \quad ; \quad F = mg$$

$$W = M\,(\theta_2 - \theta_1)$$

Siendo W, el trabajo necesario para que el sistema gire 360º N veces, por lo tanto, la ecuación queda expresada de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{W = M\,(\theta_2 - \theta_1) = mgr2\pi N}$$

Experimento de Joule.

En el experimento de Joule se determina el equivalente mecánico del calor, es decir, la relación entre energía mecánica y la energía térmica (energía en forma de calor).

Descripción del equipo utilizado por Joule.

Un sistema aislado térmicamente contiene una masa de agua, con un termómetro para medir su temperatura, un eje con paletas que se ponen en movimiento por el desplazamiento de la masa, tal como se muestra en la Figura 1.

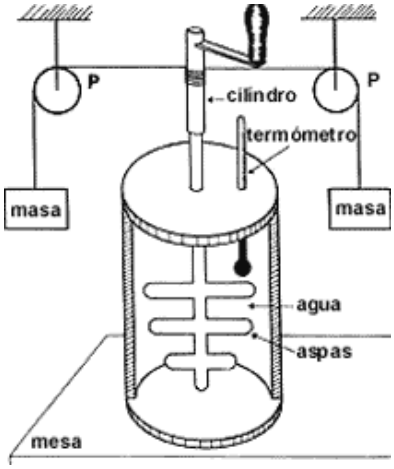

Figura 1. Equipo utilizado por Joule

La masa, que se mueve con velocidad prácticamente constante, disminuye energía potencial y como consecuencia, el agua agitada por las paletas se calienta, debido a la fricción. Si el bloque de masa *m* desciende una altura *h* la energía potencial disminuye y este cambio de energía es la que se le suministra al agua para aumentar su temperatura (se desprecian otras pérdidas).

Joule encontró que la disminución de energía potencial es proporcional al incremento de temperatura del agua. La constante de proporcionalidad corresponde a la capacidad térmica especifica del agua, la cual es igual a 4.186 [J/g ºC]. Por lo tanto, 4.186 [J] de energía mecánica aumentan la temperatura de 1 [g] de agua en 1 [º C].

Así, se define la caloría como 4.186 [J] sin referencia a la sustancia que se está calentando.

1 [cal] = 4.186 [J]

En el experimento de Joule, se desprecia la capacidad térmica específica del calorímetro, así como de los otros componentes que intervienen en el experimento.

Por lo tanto, la energía mecánica suministrada al sistema se convierte en una variación de su energía interna.

$$\boldsymbol{W[J] = \Delta U\ [cal]}$$

En consecuencia:

$$\boldsymbol{mgr2\pi N = mc(T_2 - T_1)}$$

Descripción del equipo de EMQ

El aparato del equivalente mecánico del calor, como se muestra en la Figura 2, cuenta con un sistema muy similar al equipo utilizado por Joule, es decir, una cinta con un sistema de pesas colocadas en un extremo y enrollada al cilindro de aluminio por el otro extremo.

El trabajo de eje necesario para levantar las masas se convierte en una variación de energía interna del aluminio, debido a la fricción con la cinta.

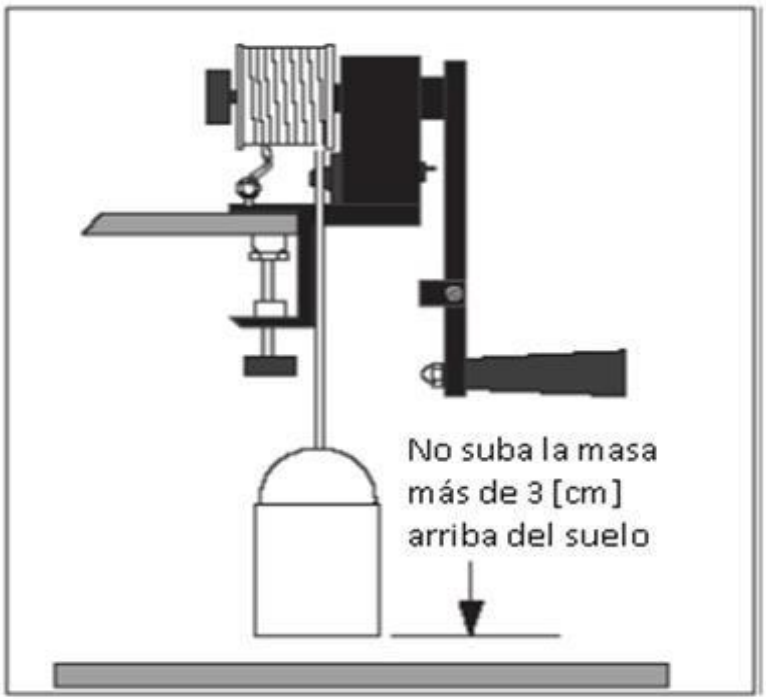

Figura 2. Esquema del sistema

4. Equipo y material

Cantidad	Material
1	Aparato del equivalente mecánico del calor
3	Masas de 100, 200 y 500 [g]
1	Termopar de cromel-alumel

5. Desarrollo

1. Realizar el montaje del equipo como se indica en la Figura 2.

2. Dar de dos a cinco vueltas con la cinta nylon alrededor del cilindro de aluminio, cuidando que el cilindro gire libremente.

3. Colocar todas las masas en el extremo de la cinta, cuidando que queden suspendidas.

4. Tomar la temperatura del cilindro de aluminio con el termopar.

5. Hacer girar el cilindro de aluminio con la manivela. Dar 300 vueltas con una rapidez constante tal que el cilindro de aluminio pueda aproximarse a un sistema adiabático; es decir, que no intercambie calor con el ambiente. Esto se logra girando la manivela con una rapidez de 2 vueltas/segundo, aproximadamente.

6. Volver a tomar la temperatura del cilindro de aluminio en el mismo lugar de la medición anterior.

7. Repetir el experimento 3 veces y llenar la tabla 1.

8. Desmontar el equipo.

Tabla 1

Evento	T_1 [°C]	T_2 [°C]	Número de vueltas N	D_{Al} [m]	c_{Al} [cal/gºC]	m_{Al} [kg]	m_s [kg]
1							
2							
3							

Donde:

T_1 = Temperatura inicial
T_2 = Temperatura final
N = Número de vueltas
D_{Al} = Diámetro del cilindro de aluminio = 4.763 [cm]
c_{Al} = Capacidad térmica específica del aluminio = 0.22 [cal/g°C]
m_{Al} = Masa del cilindro de aluminio = 200 [g]
m_s = Masa suspendida
g = 9.78 [m/s^2]

De acuerdo con la tabla 1, calcular ΔU y W con base en las ecuaciones siguientes y reportarlo en la tabla 2.

$$\Delta U = m_{al} c_{al} (T_f - T_i)$$

$$\boldsymbol{W = mgr2\pi N}$$

Tabla 2. Valores del equivalente mecánico del calor

ΔU **[cal]**	**W [J]**	EMQ= W[J]/$\Delta U[cal]$	**%EE**

6. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Rolle, Kurt C. Termodinámica. Sexta Edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología. Octava edición, España 2010. Editorial Reverté.

8. Anexos

Cuestionario previo

Equivalente mecánico del calor

1. ¿Qué es la energía?

2. Describa las formas mediante las cuales un sistema puede intercambiar energía con su entorno.

3. Mencione cinco ejemplos de transformaciones de energía.

4. ¿Cuál es la relación existente entre el calor y el trabajo?

5. Explique la diferencia entre temperatura, transferencia de calor y energía interna.

6. ¿Qué es un proceso adiabático?

7. Cuando un sistema sufre un proceso muy rápido, aunque sus paredes no sean aislantes térmicas, dicho proceso puede considerarse adiabático, ¿por qué?

8. ¿Qué es el trabajo? Mencione sus unidades en el Sistema Internacional y diga cómo calcular el trabajo asociado a/al:

- la compresión y expansión de un gas
- suministro de energía eléctrica a un sistema
- giro de un eje o flecha

9. Explique en qué consiste el experimento de Joule.

10. ¿Por qué no es conveniente hablar del contenido de calor y del contenido de trabajo mecánico en un sistema?

9. Índice de temas de estudio.

Práctica: “Equivalente mecánico del calor”

Definir los conceptos de:

- Calor
- Energía
- Energía interna
- Trabajo
- Trabajo de eje o de flecha
- Conservación de la energía
- Transformaciones de energía
- Experimento de Joule
- Sistema cerrado
- Proceso adiabático

Práctica 6

Entalpia de Transformación

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Resistencia de inmersión	La resistencia debe estar sumergida en agua cuando se ponga en operación, puede ocasionar quemaduras
2	Termómetro de bulbo o inmersión	Se puede romper el bulbo que contiene el alcohol
3	Parrilla eléctrica	Tener cuidado en su manejo debido al calentamiento de la misma.

2. Objetivos

Determinar el valor de la capacidad térmica específica promedio del agua en el intervalo de temperaturas $\Delta T = 80[°C] - T_{amb}[°C]$.
Obtener el valor de la entalpia de vaporización (h_{fg}) del agua a presión constante.

3. Bases teóricas

3. Energía

La energía que posee un sistema se puede definir como **"La capacidad para producir un cambio"** y se puede determinar como la suma de las diferentes formas de energía que se presentan en él.

Una energía macroscópica: es la energía mecánica total (E) del sistema, esta energía se relaciona con la posición y el movimiento macroscópico del sistema en conjunto. La energía mecánica total (E) es la suma de la energía cinética de traslación del centro de masa más la energía cinética rotacional respecto del centro de masa, y de las energías potenciales relacionadas con la posición del centro de masa del sistema en el espacio, ya sea la energía gravitatoria u otras formas potencialesde energía (como la potencial eléctrica).

Convencionalmente, cuando se produce una variación de la energía interna, manifestada en **la variación del calor** que es cedido o absorbido, se puede medir este cambio en la energía indirectamente por la variación de la temperatura de la sustancia.

La transferencia de energía a un sistema se lleva a cabo por medio de dos mecanismos o procesos: a) por transferencia de calor, provocada por una diferencia de temperaturas, y b) por vía del trabajo, provocada por fuerzas macroscópicas.

Al aumentar la **temperatura** de un sistema, sin que varíe nada más, aumenta su energía interna.

Calor de cambio de fase. Es la energía necesaria para que una sustancia cambie de fase. Durante este proceso la temperatura del sistema se mantiene constante.

$$Q = \lambda m$$

Donde:
Q = Energía en forma de calor
λ = Constante de proporcionalidad que se conoce como calor latente de cambio de fase. También se le conoce como **entalpia de transformación** $(\boldsymbol{h_{tranf}})$
m = masa de la sustancia

Concepto de Trabajo

Desde el punto de vista de la termodinámica, el trabajo es un concepto más extenso que el tradicionalmente utilizado en la mecánica clásica.

Se define como:

- **La energía transferida a través de las fronteras de un sistema en forma organizada y cuyo uso exclusivo sea la elevación de un sistema (cuerpo).**

- **El trabajo es una energía en tránsito entre un sistema y su entorno, a través de aquellos límites del sistema en que no existe transferencia de masa y como consecuencia de la diferencia de una propiedad intensiva, que no sea la temperatura, entre el sistema y su entorno.**

El trabajo realizado para pasar de un estado inicial de equilibrio a un estado final de equilibrio puede tomar cualquier valor, dependiendo de la trayectoria que

se elija. El trabajo no es una propiedad ya que no es posible especificarlo por el sólo conocimiento del estado termodinámico del sistema.

Potencia mecánica

Se define como:

- La cantidad de trabajo que entrega o recibe un sistema por unidad de tiempo y sus unidades son $\left[\frac{J}{s}\right] = [\mathbf{Watt}]$ o su equivalencia en caballos de fuerza [**HP**].

Potencia eléctrica

Se define como:

- Si por un aparato eléctrico, al ser sometido a una diferencia de potencial V_{ab} circula una intensidad de corriente I, la potencia desarrollada en el aparato estará dada por:

$$\boldsymbol{W = V_{ab} I}$$

Donde:
$\boldsymbol{W}$ = Potencia eléctrica [W]
V_{ab} = Diferencia de potencial [V]
I = Intensidad de corriente eléctrica [A]

Efecto Joule

El efecto Joule consiste en la transformación de energía eléctrica en energía térmica (calor) en una resistencia por la que pasa una corriente eléctrica. La potencia desarrollada por el efecto Joule se calcula mediante la siguiente expresión:

$$W = VI = RI^2$$

Donde:
R = resistencia eléctrica [Ω]

4. Equipo y material

Cantidad	Material
1	Termo
1	Resistencia de inmersión
1	Balanza de triple brazo
1	Termómetro de inmersión
1	Watthorímetro

5. Desarrollo

5.1 Determinación de la capacidad térmica específica del agua.

1. Pesar el termo y agregar aproximadamente 600 gramos de agua, verificando que la resistencia de inmersión quede completamente sumergida.

2. Colocar la tapa sin apretar.

3. Conectar la resistencia de inmersión al watthorímetro y éste a la corriente, como se muestra en la Figura 1.

4. Medir la temperatura inicial del agua con el termómetro de inmersión.

5. Encender el watthorímetro y al mismo tiempo contar las vueltas del disco, en posición frontal, tomando como referencia la mancha negra.

6. Cuando la temperatura del agua llegue a los 80 [°C] apagar el watthorímetro, concluyendo el conteo de las vueltas del disco.

7. Anotar los datos obtenidos en la Tabla 1.

8. Repetir este experimento una vez más.

Figura 1. Disposición del equipo

Tabla 1: Determinación de la capacidad térmica específica del agua.

Evento	m_{agua} [kg]	$T_{inicial}$ [°C]	T_{final} [°C]	ΔT [°C]	No. Vueltas, N	Q=N*K [J]	c [J/kg°C]
1							
2							

$$Q = m_{agua} c (T_{final} - T_{inicial})$$

$$Q = NK$$

Donde:

m_{agua} = Masa del agua contenida en el termo.
$T_{inicial}$ = Temperatura inicial del agua.
T_{final} = Temperatura final del agua.
Q = Calor suministrado con la resistencia de inmersión.
N = Número de vueltas que gira el disco del watthorímetro.
K = Constante del watthorímetro

Determine:

- La capacidad térmica específica promedio.
- Los errores absoluto y porcentual.

5.2 Determinación de la entalpia de vaporización del agua

1. Sin tirar el agua caliente del último evento de la actividad anterior, coloque el termo sobre la balanza.

2. Deslizar la tapa del termo hasta que quede sobre la mesa.

3. Registrar la masa del conjunto: termo, agua y resistor.

4. Disminuir 10 [g] en la balanza.

5. Encender el watthorímetro.

6. Esperar hasta que el agua hierva y comience la ebullición.

7. Durante la ebullición el brazo de la balanza oscilará, en este momento inicie la lectura del número de vueltas del disco del watthorímetro.

8. Cuando la aguja de la balanza apunte nuevamente hacia la marca de equilibrio, termine de contar las vueltas del disco, ya que se habrán perdido exactamente 10 [g] de agua en forma de vapor.

9. Apagar el watthorímetro.

10. Registrar los datos obtenidos en la Tabla 2.

11. Repetir cinco veces esta actividad.

Tabla 2: Determinación de la entalpia de evaporación del agua.

Evento	m_{agua} [kg]	No. Vueltas, N	Q[J]	h_{fg}[J/kg]
1	**0.010**			
2	**0.010**			
3	**0.010**			
4	**0.010**			
5	**0.010**			

Determinar:

- La entalpia de evaporación promedio del agua
- Los errores absoluto y porcentual.

6. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015
- Rolle, Kurt C. Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice hall

7. Anexos

Cuestionario previo

Entalpia de transformación del agua

1. Escriba las ecuaciones que se emplean para determinar la energía en forma de calor transmitida al agua cuando no hay cambio de fase y cuando si lo hay.
2. Defina la entalpia de cambio de fase.
3. Indique de que fase a que fase se llevan a cabo los siguientes procesos: ebullición, fusión, sublimación, solidificación y condensación.
4. A partir de la primera ley de la termodinámica para un proceso isobárico compruebe que el calor involucrado en el proceso es igual al cambio de entalpia.
5. Explique en qué consiste el efecto Joule.

6. Investigue en tablas de propiedades termodinámicas la entalpia de vaporización del agua a 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 atmósferas y repórtela en las siguientes unidades: [Btu/lb_m], [J/g] y [kJ/kg].
7. ¿Qué diferencia hay entre un termo, un vaso de Dewar y un calorímetro? Haga un esquema de cada uno.
8. ¿Qué instrumento se utiliza para medir el consumo de energía eléctrica?
9. ¿Qué es una fase y qué es un estado termodinámico?
10. ¿De qué propiedades termodinámicas dependen los cambios de fase para una sustancia pura?

8. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: "ENTALPIA DE TRANSFORMACIÓN"

Conceptos de:

- Capacidad térmica específica
- Vaporización
- Entalpia
- Entalpia de transformación
- Energía interna
- Watthorímetro
- Efecto Joule
- Proceso isobárico

Práctica 7
Gasto másico, potencia y eficiencia de una bomba.

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Manómetro con mercurio	Derrame de mercurio si se abre repentinamente la válvula.
2	Bomba	Se descarga la bomba si se desconecta ésta con la válvula abierta.

2. Objetivos

- Aplicar las ecuaciones de la primera ley de la termodinámica y de continuidad para calcular el gasto másico en el sistema hidráulico propuesto.
- Calcular la potencia del motor accionador de la bomba instalada en elsistema.
- Calcular la eficiencia mecánica de la bomba.

3. Bases teóricas

Un fluido es una sustancia que se deforma continua y permanentemente con la aplicación de un esfuerzo cortante, no importa qué tan pequeño sea. La incapacidad de los fluidos para resistir los esfuerzos cortantes les da su capacidad ya conocida de cambiar de forma o fluir. Los fluidos pueden sufrir dos tipos de flujo: flujo laminar, que se caracteriza por un movimiento ordenado del fluido, existiendo líneas de corriente y trayectorias bien definidas; y el flujo turbulento, donde el fluido presenta un movimiento caótico sin que existan líneas de corriente ni trayectorias definidas.

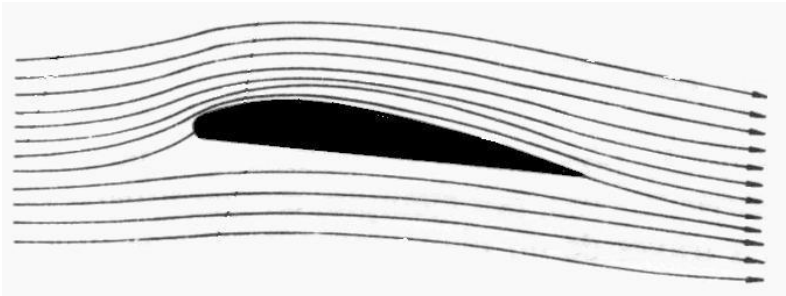

Figura 1. Flujo laminar de un fluido perfecto en torno al perfil de un objeto.

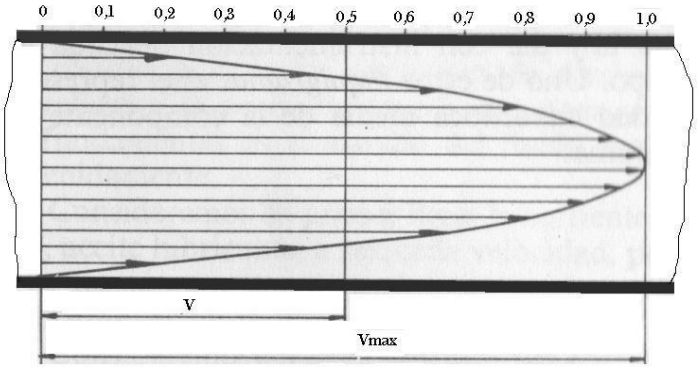

Figura 2. Distribución de velocidades en un tubo con flujo laminar.

Volumen de control

Un sistema abierto o volumen de control, es una región elegida apropiadamente en el espacio. Generalmente encierra un dispositivo que tiene que ver con el flujo másico, como un compresor, bomba, turbina, flujo en tuberías, tobera y difusores, cambiadores de calor, etc.

Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control. En general, cualquier región arbitraria en el espacio se puede seleccionar como volumen de control; no hay reglas concretas para esta selección, pero una que sea apropiada hace más fácil el análisis.

Las fronteras de un volumen de control se conocen como superficies de control y pueden ser reales o imaginarias. En el caso del flujo en tuberías, la superficie interna de ésta constituye la parte real de la frontera, mientras que las áreas de entrada y salida forman la parte imaginaria, puesto que en esta sección del volumen de control no hay superficies físicas.

Estado Estacionario

Es un proceso en el cual las propiedades en cada punto del volumen de control se mantienen constantes con el tiempo.

Flujo Másico

La cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo se conoce como flujo másico.

$$\dot{m} = \rho A \vec{v}$$

Donde:

$\dot{m}$ = Flujo másico

ρ = Densidad del fluido de trabajo

A = Sección transversal por donde se desplaza el fluido

$\vec{v}$ = Velocidad a la cual se desplaza el fluido

Ecuación de la 1ª ley de la termodinámica aplicada a sistemas abiertos.

$$\boldsymbol{m_{entra}\left(\frac{1}{2}\vec{v}_e^{\,2} + gZ_e + u_e + P_e v_e\right) - m_{sale}\left(\frac{1}{2}\vec{v}_s^{\,2} + gZ_s + u_s + P_s v_s\right) + W + Q = 0}$$

Es decir:

$$\boldsymbol{W + Q = m_{sale}\left(\frac{1}{2}\vec{v}_s^{\,2} + gZ_s + u_s + P_s v_s\right) - m_{entra}\left(\frac{1}{2}\vec{v}_e^{\,2} + gZ_e + u_e + P_e v_e\right)}$$

Para un sistema con una entrada y una salida, la expresión se puede escribir de la manera siguiente:

$$\boldsymbol{W + Q = m\left(\frac{1}{2}\left(\vec{v}_s^{\,2} - \vec{v}_e^{\,2}\right) + g(Z_s - Z_e) + (u_s - u_e) + P_s v_s - P_e v_e\right)}$$

Donde:

Q = Energía en forma de calor que recibe o entrega el sistema.

W = Energía en forma de trabajo que recibe o entrega el sistema.

$\boldsymbol{\frac{1}{2}\left(\vec{v}_s^{\,2} - \vec{v}_e^{\,2}\right)}$= Cambio en la energía cinética.

$\boldsymbol{g}(Z_s - Z_e)$= Cambio en la energía potencial.

$(u_s - u_e)$= Cambio en la energía interna.

$(P_s v_s - P_e v_e)$= Trabajo de flujo o bombeo.

Eficiencia mecánica de la bomba.

$$\boldsymbol{\eta_{mec.bomba} = \frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{W}_{eléctrico}}}$$

4. Equipo y material

Cantidad	Material
1	Sistema hidráulico instrumentado
1	Flexómetro
1	Calibrador con vernier

5. Desarrollo

1. Conectar la bomba.
2. Abrir totalmente la válvula, cuidando que el mercurio del manómetro no se derrame en la tubería.
3. Esperar al menos 2 minutos para que la bomba alcance el estado estacionario.
4. Tomar las siguientes lecturas:
   a) Diferencia de alturas entre los niveles del manómetro de mercurio, $\Delta z =$_____[ ].
   b) La presión que indica el manómetro, $P_{man} =$_____[ ]
   c) La presión que indica el vacuómetro, $P_{vac} =$_____[ ]
   d) La diferencia de altura entre ambos manómetros, $\Delta h =$_____[ ].
   e) Diámetros externos de las tuberías:
      Diámetro externo en la tubería de succión, $D_{suc} =$_____$[m]$
      Diámetro externo en la tubería de descarga, $D_{des} =$_____$[m]$
      Diámetro externo en la tubería de reducción, $D_{red} =$_____$[m]$
5. Cerrar la válvula.
6. Desconectar la bomba.

Figura 3. Sistema hidráulico instrumentado.

Calcular:

- El gasto másico de agua que fluye por el equipo.
- La potencia del motor accionador de la bomba.
- Los errores absoluto y porcentual.
- La eficiencia mecánica de la bomba.

Considere para sus cálculos que la potencia nominal del motor accionador de la bomba es 0.25 caballos de potencia [HP].

a. [HP] ≈ 746 [watts]

6. Bibliografía

- Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001 España. Reverté.

7. Anexo

Cuestionario previo.

Gasto másico, potencia y eficiencia de una bomba.

1. Escriba la ecuación de la primera ley de la Termodinámica para sistemas abiertos y explique cada uno de sus términos.
2. Escriba la ecuación de continuidad y mencione las unidades del gasto másico en el SI.
3. ¿Cuál es la diferencia entre una bomba centrífuga y una de desplazamiento positivo?
4. A partir de la ecuación de la primera ley de la Termodinámica deduzca la ecuación de Bernoulli.
5. ¿A qué se le llama “efecto Bernoulli”?
6. Para un sistema abierto, ¿qué es el régimen permanente, el estado estacionario y el flujo unidimensional?
7. ¿Qué es el trabajo de eje o trabajo de flecha? Escriba la ecuación para cuantificarlo y explique cada uno de sus términos.

8. ¿Qué es la potencia de una bomba, cómo se obtiene y cuáles son sus unidades?
9. ¿Qué es una pichancha y cómo funciona?
10. ¿Qué significa “purgar” y “cebar” una bomba?

7. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: “GASTO MÁSICO, POTENCIA Y EFICIENCIA DE UNA BOMBA”

Definir los siguientes conceptos:

- Fluido
- Flujo en tuberías
- Sistemas abiertos
- Balance de energía en sistemas abiertos
- Ecuación de la 1ª Ley de la Termodinámica aplicada a sistemas abiertos
- Bomba centrifuga
- Gasto másico
- Conservación de la masa
- Ecuación de Bernoulli
- Estado estacionario
- Flujo unidimensional
- Régimen permanente
- Volumen de control
- Potencia de una bomba

Práctica 8

Ley de Charles

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Termómetro de gas	Se puede romper fácilmente
2	Termómetro de inmersión	Fijarlo bien en la pinza, se rompe fácilmente

2. Objetivos

- Comprobar experimentalmente la ley de Charles.
- Obtener los modelos matemático y gráfico que relacionen el volumen y la temperatura, V=f (T).
- Inferir experimentalmente la temperatura correspondiente al cero absoluto.

3. Bases teóricas

En 1787, el científico francés Jack Charles, estudió la relación existente entre el volumen y la temperatura de una muestra de un gas cuando la presión no cambia.

Durante sus investigaciones pudo observar que, cuando se aumentaba la temperatura en la muestra, también aumentaba su volumen, y cuando su temperatura disminuía, al volumen le ocurría lo mismo.

Posteriormente, Gay-Lussac, realizó experimentos para determinar el cambio en el volumen de una muestra de gas cuando la presión se mantenía constante y observó que el volumen era directamente proporcional a la temperatura.

Diagrama (V – T)

En sus experimentos, Gay-Lussac, realizo mediciones del volumen y de la temperatura de un gas cuando éste era calentado isobáricamente. Con estas mediciones construyó un gráfico de volumen V [m^3] en función de la temperatura T [°C]. La gráfica obtenida permitió concluir que, a presión constante, el volumen varía linealmente con la temperatura.

Como se observa en la gráfica, el gas ocupa un volumen V_o a 0 [°C]. El volumen del gas se reduce en forma gradual a medida que la temperatura disminuye aún más. De esta manera Gay-Lussac, determinó, por extrapolación, que la temperatura a la cual el volumen idealmente se hace cero corresponde a la

temperatura T = -273.15 [°C]. Esta temperatura se denomina ***cero absoluto*** y se considera como el origen de la escala Kelvin.

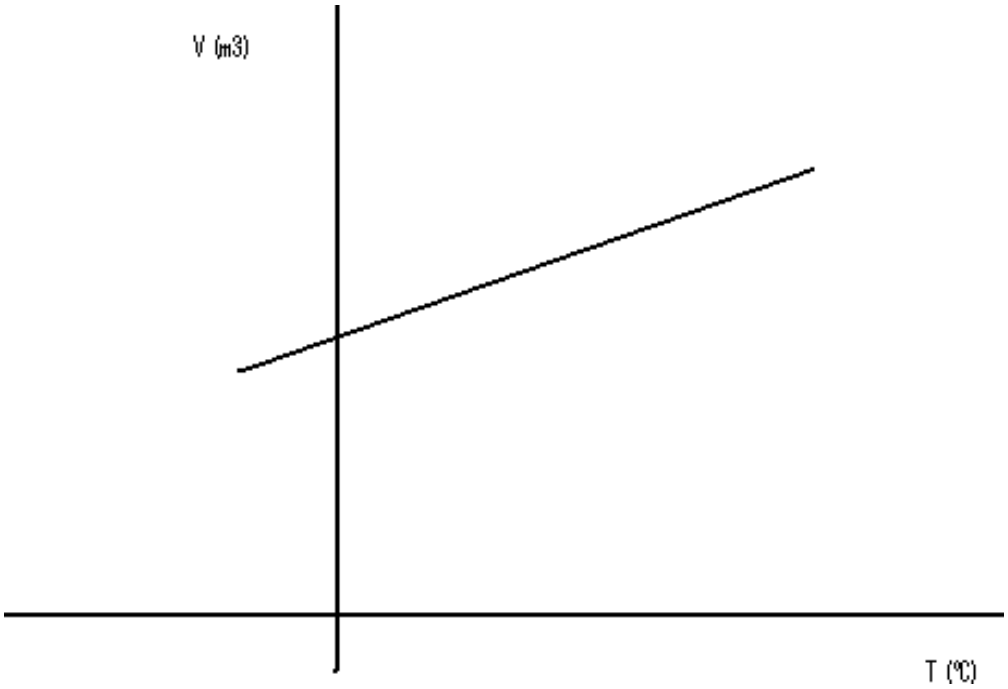

Figura 1. Modelo gráfico V-T

Modelo matemático

$$\boldsymbol{V}[\boldsymbol{m^3}] = \boldsymbol{m}\left[\frac{\boldsymbol{m^3}}{°\mathrm{C}}\right]\boldsymbol{T}[°\mathrm{C}] + \boldsymbol{V_0}[\boldsymbol{m^3}]$$

Haciendo la consideración que V = 0, se tiene:

$$\boldsymbol{0} = \boldsymbol{m}\left[\frac{\boldsymbol{m^3}}{°\mathrm{C}}\right]\boldsymbol{T}[°\mathrm{C}] + \boldsymbol{V_0}[\boldsymbol{m^3}]$$

$$\boldsymbol{T}[°\mathrm{C}] = -\frac{\boldsymbol{V_0}[\boldsymbol{m^3}]}{\boldsymbol{m}\left[\frac{\boldsymbol{m^3}}{°\mathrm{C}}\right]} = -\frac{\boldsymbol{V_0}}{\boldsymbol{m}}[°\mathrm{C}]$$

Donde:
m = Pendiente de la recta obtenida
T = Temperatura en [°C]
V_0 = Ordenada al origen

Obteniendo de esta manera la temperatura correspondiente al cero absoluto.

En resumen, para un proceso isobárico se puede afirmar que:

El volumen (V) de determinada masa de gas, mantenida a presión constante, es directamente proporcional a su temperatura absoluta (T); es decir,

$$V \alpha \ \mathrm{T}$$

$$V = \mathrm{K}\ \mathrm{T}$$

$$\frac{V}{T} = K$$

Donde:

K = constante de proporcionalidad

4. Equipo y material

Cantidad	Descripción
1	Ampolleta sin graduar
1	Cronómetro
1	Mechero de Bunsen
2	Pinza para tubo de ensayo
1	Soporte universal
1	Termómetro de gas a presión constante
2	Termómetros de inmersión

5. Desarrollo

Armar el dispositivo como se muestra en la Figura 2, con el apoyo del profesor:

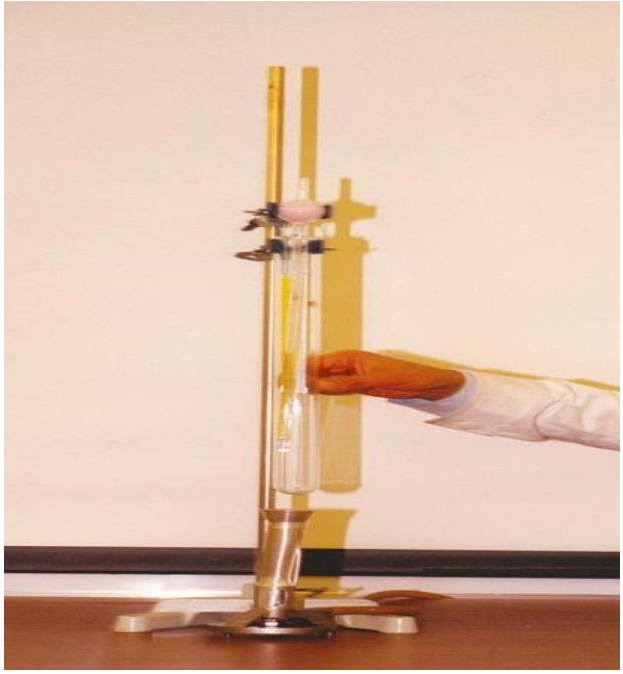

Figura 2. Esquema del termómetro de gas a presión constante

a. Llenar con agua la ampolleta sin graduar.

b. Sujetar la ampolleta en el soporte universal con ayuda de la pinza.

c. Sujetar e introducir el termómetro de gas y los termómetros de inmersión en la ampolleta.

d. Antes de encender el mechero, medir las temperaturas iniciales que indican los termómetros de inmersión y el volumen de aire encerrado en el termómetro de gas. Anótelos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Registro de valores experimentales.

Sección transversal del termómetro de gas: 5.7 X 10 $^{-7}$ [m^2]

Evento	Altura h [cm]	T_1 [ºC]	T_2 [ºC]	T_{prom} [ºC]	V [cm^3]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

1. Encender el mechero, y ajuste la combustión con la válvula de paso de aire, para que la flama sea de color azul. Aflojar la pinza que sujeta la ampolleta sin graduar y baje la ampolleta hasta que el extremo inferior quede en contacto con la flama superior del mechero.

2. Registrar el incremento de volumen cada 3 [ºC] de uno de los termómetros de inmersión, así como la temperatura del segundo termómetro (para obtener el promedio de temperatura en cada evento), agrupando ambos valores en la tabla 1.

3. Con los datos de temperatura y volumen de aire registrados en la tabla 1, obtenga los modelos gráfico y matemático V = f (T).

4. Obtener el valor de la temperatura correspondiente al cero absoluto.

5. Indicar, para el valor anterior, el porcentaje de error.

6. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Rolle, Kurt C. Termodinámica. Sexta Edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice hall.

7. Anexos

Cuestionario previo

Ley de Charles

1. ¿Qué es un proceso termodinámico casi-estático: isotérmico, isobárico, isométrico?
2. Enuncie la ley de Charles.
3. Enuncie tres aplicaciones de la ley de Charles
4. Mencione 10 gases a los que puede aplicarse la ley de Charles.
5. ¿Es lo mismo proceso que trayectoria? Justifique su respuesta.
6. ¿Por qué es necesario el uso de la presión absoluta en los análisis termodinámicos?
7. ¿Bajo qué condiciones un gas real tiende a comportarse como gas ideal?
8. ¿Cómo se obtiene el gas licuado?
9. Dibuje una isoterma para un gas en un diagrama (V-P).

10. Se miden experimentalmente los valores de las variables r y s. Se cree que entre ellas existe una relación lineal. Establezca los mejores valores de la pendiente y de la ordenada al origen, así como el coeficiente de correlación

r	4.8	9.6	14.4	19.2	24.0	28.8	33.6
s	15.43	19.35	23.23	27.15	31.03	34.95	38.83

8. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: "LEY DE CHARLES"

Definir los siguientes conceptos:

- Cero absoluto
- Gas
- Gas Ideal
- Ley de Charles
- Proceso isobárico
- Termómetro de gas a presión constante
- Gas licuado

Práctica 9

Ley de Boyle-Mariotte

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	No mover la pinza que está fija en el aparato de Mariotte-Leblanc.	Se puede deslizar la manguera que contiene mercurio y derramarse al piso.
2	No apretar demasiado el tornillo que sirve como estrangulador.	Se puede barrer la cuerda y no se incrementará la presión durante el experimento.

2. Objetivos

- Obtener la curva que relaciona las variables de volumen y presión (V, P).
- Calcular el trabajo aplicado sobre el sistema y el trabajo realizado por el sistema (compresión o expansión).
- Calcular el valor del índice politrópico (n) para el proceso realizado.

3. Bases teóricas.

Robert Boyle llevó a cabo experimentos con el aire para encontrar la relación que existe entre el volumen y la presión. Empleó un tubo en forma de “U” y vertió mercurio hasta que los niveles en ambas ramas fuesen iguales. Bajo estas condiciones el aire ocupa un volumen V a la presión ambiente P ya que las ramas del mercurio tienen el mismo nivel. En seguida vertió más mercurio en una rama hasta lograr un desnivel y midió la columna de aire encerrado obteniendo el nuevo volumen V_1 y la nueva presión P_1. Debido a que el proceso se realiza casiestáticamente, se asume que el proceso transcurre en forma isotérmica. Después de llevar a cabo varias mediciones, como las descritas anteriormente, Robert Boyle, encontró que **el volumen de un gas varía inversamente con la presión ejercida sobre él, si la temperatura permanece constante.**

Es decir,

$$V \propto \frac{1}{P}$$

$$V \propto \frac{c}{P}$$

Donde: P = Presión absoluta que se aplica sobre el sistema.
V = Volumen.
C = Constante de proporcionalidad.

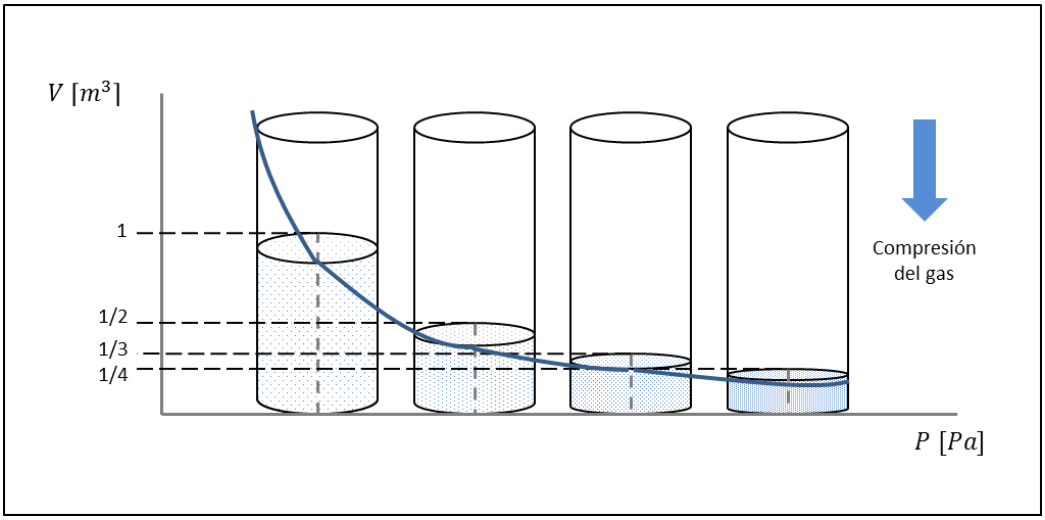

Figura 1. Compresión de un gas a temperatura constante

4. Equipo y material

Cantidad	Descripción
1	Aparato de Mariotte-Leblanc

5. Desarrollo.

1. Liberar el tornillo de la pinza de presión que se ubica en la manguera de látex, hasta que ambas ampolletas del aparato de Mariotte-Leblanc marquen el mismo nivel de mercurio.

2. Apretar el tornillo de la pinza de sujeción, para dejar confinado el volumen de aire a la presión del ambiente y registrar el valor de las condiciones ambientales en la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones a las que se realiza el experimento.

Presión atmosférica [Pa]	Temperatura ambiente [°C]	Volumen inicial [ml]	Volumen inicial [m^3]

3. Variar la presión de la columna de mercurio para comprimir o expandir el aire (la variación del incremento de presión será a criterio del profesor), se recomienda que el incremento sea de un centímetro de mercurio y registrar los valores en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de presión y volumen.

Evento	V [ml]	V [m^3]	P_{rel} [cmHg]	P_{rel} [Pa]	P_{abs} [Pa]	$P_{abs}V$ [J]	W [J]	n
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								

4. Realizar una gráfica que relacione las variables: volumen y presión (V, P). (véase la Fig. 2).

5. Calcular el trabajo involucrado en el proceso.

6. Obtener el valor promedio del índice politrópico (n) y con base en este valor, caracterizar el tipo de proceso que se llevó a cabo.

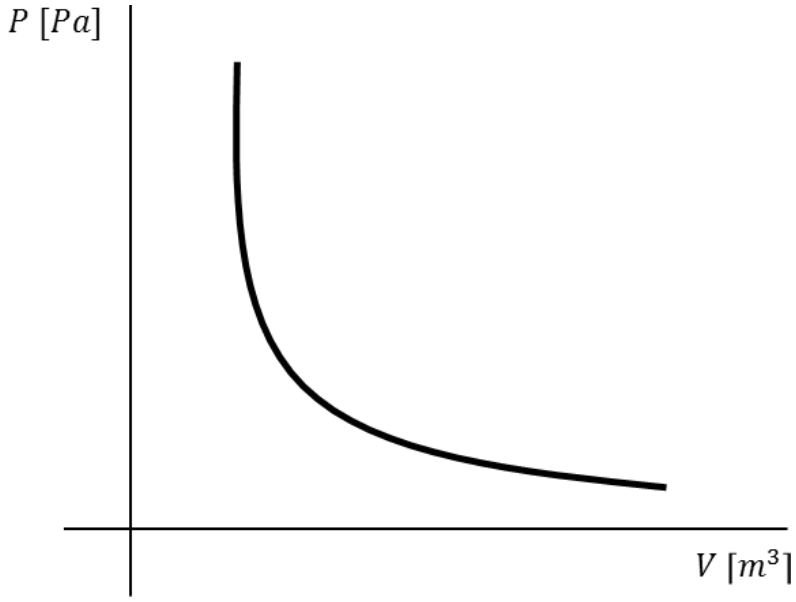

Figura 2. Gráfica que describe el proceso de compresión o expansión de un gas a temperatura constante.

6. Cálculos

El trabajo se determina de la forma siguiente:

$$PV = C$$

$$P = \frac{C}{V}$$

$$W = -\int_1^2 P\ dV$$

$$W = -P_1V_1[\ln V_2 - \ln V_1] = -P_1V_1 \ln\left[\frac{V_2}{V_1}\right]$$

Donde:

C = P_1V_1, es un valor que no cambia durante todo el proceso de compresión o expansión del gas. Para un proceso politrópico se sabe que la ecuación que describe el proceso es:

$$PV^n = cte$$

Donde:

P = Presión absoluta
V = Volumen
n = Índice politrópico

Para calcular el valor de "n" de la manera siguiente:

$$PV^n = cte$$

$$P_iV_i{}^n = P_fV_f{}^n$$

$$n = \frac{\ln\frac{P_f}{P_i}}{\ln\frac{V_i}{V_f}}$$

Figura 3. Esquema del aparato de Mariotte-Leblanc.

6. Bibliografía

- Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001 España. Reverté.

7. Anexos

Cuestionario previo.

Ley de Boyle-Mariotte.

1. Explique en qué consiste el experimento de Boyle-Mariotte.
2. ¿Qué representa el área bajo la curva en un diagrama (V-P) para una sustancia simple compresible?
3. ¿Cómo se calcula el trabajo de expansión-comprensión de un gas?
4. ¿Qué es un proceso politrópico y qué es el índice politrópico?
5. Mencione tres aplicaciones de la ley de Boyle.
6. ¿Por qué es vital para un buzo conocer la ley de Boyle?

8. Índice de temas de estudio.

PRÁCTICA: "LEY DE BOYLE MARIOTTE"

Definir los siguientes conceptos:

- Gas
- Gas Ideal
- Ley de Boyle-Mariotte
- Proceso casiestático
- Proceso isotérmico
- Proceso politrópico
- Índice politrópico
- Trabajo de compresión y expansión

Práctica 10

Constante particular del aire

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
	Ninguno.	Ninguno.

2. Objetivos

- Obtener las propiedades de un gas en dos estados termodinámicos distintos.
- Determinar el valor de la constante particular del aire.

3. Bases teóricas

En las prácticas anteriores se comprobaron las leyes para los gases ideales (ley de Charles y ley de Boyle-Mariotte), obteniendo las conclusiones siguientes:

Ley de Charles.

Cuando se realiza un proceso en el cual la presión se mantiene constante (proceso isobárico), el volumen (V) de determinada masa de gas, es directamente proporcional a su temperatura absoluta (T) o sea:

$$V \alpha \ \mathrm{T}$$

$$V = \mathrm{K}\ \mathrm{T}$$

$$\frac{V}{T} = K$$

Como el volumen de cierta masa gaseosa a presión constante varía con la temperatura, la densidad (ρ) tendrá distintos valores para diferentes valores de temperatura. Se ha observado experimentalmente que la densidad es directamente proporcional al inverso de la temperatura.

$$\rho \ \alpha \ \frac{1}{T}$$

Ley de Boyle Mariotte

Cuando se realiza un proceso en el cual la temperatura se mantiene constante (proceso isotérmico), el volumen de un gas varía inversamente con la presión ejercida sobre él.

$$V \propto \frac{1}{P}$$

$$V = \frac{C}{P}$$

Por otra parte, la densidad de un gas ideal es directamente proporcional a la presión.

$$\rho \propto P$$

Como complemento y para obtener la ecuación de estado para un gas ideal, la ley de Avogadro establece que:

> Volúmenes iguales de diferentes gases a la misma temperatura y presión, contienen el mismo número de moles. Esto significa que la densidad es directamente proporcional a la masa molar.

$$\rho \propto M$$

Al conjuntar los resultados obtenidos de las leyes anteriores se llega a establecer que:

$$\rho \; \alpha \; \frac{1}{T}$$

$$\rho \propto P$$

$$\rho \propto M$$

$$\rho \; \alpha \; \frac{PM}{T}$$

De la definición de densidad,

$$\rho = \frac{\mathrm{m}}{V}$$

Y al sustituir en la expresión anterior, se obtiene,

$$\frac{m}{V}\ \alpha\ \frac{PM}{T}$$

Es decir,

$$PV\ \alpha\ \frac{mT}{M}$$

Sabiendo que el número de moles es igual a la masa de la sustancia entre su masa molar,

$$n = \frac{\mathrm{m}}{M}$$

Se obtiene:

$$PV\ \alpha\ nT$$

Al cambiar la relación de proporcionalidad por una constante, se obtiene laecuación de estado del gas ideal:

$$PV = nR_uT$$

Donde:

P = Presión absoluta
T = Temperatura absoluta
R_u = Constante universal de los gases
n = Número de moles
V = Volumen del gas

La constante particular de un gas ideal se puede obtener como la relación de la contante universal entre la masa molar, es decir:

$$R = \frac{R_u}{M}$$

De esta manera, la ecuación de estado del gas ideal, en función de la constante particular, queda expresada como:

$$\boldsymbol{PV = mRT}$$

4. Equipo y material

1	Flotador con manómetro, válvula y boquilla
1	Balanza de triple brazo

5. Desarrollo

1. Abrir la válvula del flotador para que salga el aire comprimido residual.
2. Cerrar la válvula.
3. Determinar la masa del sistema (**m_1**) Fig. 1.
4. Abrir la válvula del flotador.
5. Colocar la boquilla del flotador en contacto con la boquilla del aire comprimido.
6. Abrir la válvula del aire comprimido.
7. Esperar hasta que se alcance una presión de 1.5 [kg_f/cm^2] en el manómetro.
8. Cerrar la válvula del flotador y luego la del aire comprimido.
9. Determinar nuevamente la masa del sistema (**m_2**).
10. Abrir la válvula para que salga el aire comprimido.
11. Cerrar la válvula del flotador.
12. Registrar la temperatura ambiente del laboratorio.
13. Repetir mínimo 5 veces el experimento.
14. Registrar los datos obtenido en la tabla 1.

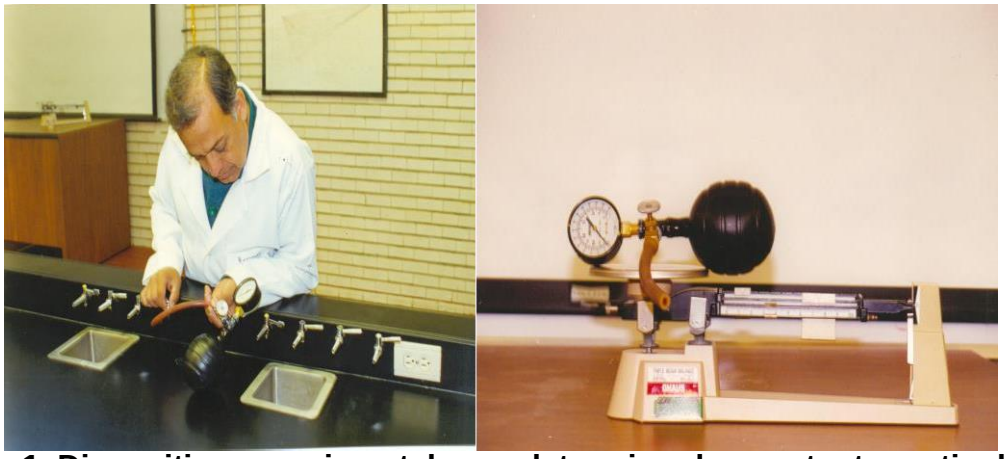

Figura 1. Dispositivo experimental para determinar la constante particular del aire (R)

Tabla 1: Propiedades del sistema.

Evento	V[m^3]	T[°C]	P_1[Pa]	P_2 [Pa]	m_1[kg]	m_2[kg]	R_{aire} [J/kgK]
1							
2							
3							
4							
5							

6. Cálculos

Para calcular la constante particular se consideran los estados termodinámicos siguientes:

Estado inicial de equilibrio:

$P_1 = P_{atm}$
$T_1 = T_{amb}$
$V_1 = 500\ [ml]$

Estado final de equilibrio:

$P_2 = P_{atm} + P_{man}$
$T_2 = T_{amb}$
$V_2 = 500$ [ml]

La masa de aire que se suministra al flotador se calcula como:

$$\Delta m = (m_2 - m_1)\ [kg]$$

De la ecuación de estado de gas ideal:

$$m = \frac{PV}{RT}$$

Se obtiene:

$$\Delta m = (m_2 - m_1) = \frac{P_2 V_2}{RT_2} - \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{V}{RT}(P_2 - P_1)$$

Al despejar R, se obtiene:

$$R = \frac{V}{(m_2 - m_1)T}(P_2 - P_1)$$

Calcular los errores absoluto y porcentual.

Valor de referencia:

$$R = 0.287\left[\frac{kJ}{kg\ K}\right]$$

7. Bibliografía

- Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001. España. Reverté.

8. Anexos

Cuestionario previo.

Constante particular del aire

1. ¿Cuáles son las características de un gas ideal?
2. ¿Cuál es la composición de aire seco?
3. ¿Qué es una ecuación de estado?
4. Anota la ecuación general del estado gaseoso en función de la constante universal de los gases.
5. ¿Cuál es el valor de la constante universal de los gases en el SI?
6. Investiga el valor de la constante "R" de los siguientes gases: O_2, N_2, Ar y del aire.
7. Describa la ley de Avogadro.
8. ¿Cómo se relacionan la constante universal de los gases y la constante particular de un gas cualquiera?

9. Índice de temas de estudio.

PRÁCTICA: "CONSTANTE PARTICULAR DEL AIRE"

Definir los siguientes conceptos:

- Concepto de gas.
- Ecuación de estado.
- Gas ideal.
- Constante universal de los gases.
- Masa molar.
- Número de moles, n.
- Constante particular.
- Composición del aire.

Práctica 11

Coeficiente de Joule-Thomson

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Generador de vapor	Se debe controlar la presión de operación para evitar que la válvula de seguridad se active.
2	Los alumnos deben distribuirse detrás de la mampara de seguridad para evitar el contacto con el vapor de agua.	Puede ocasionar quemaduras si entra en contacto con el vapor en el instante de salida.
3	Indispensable portar bata y lentes de seguridad.	Quemaduras debido a los vapores a alta temperatura.

2. Objetivos

- Determinar el valor del coeficiente de Joule-Thomson para el agua en un proceso isentálpico (proceso de estrangulamiento).
- Determinar la calidad del vapor de agua procedente del generador de vapor.

3. Bases teóricas.

Dispositivos de Estrangulamiento.

Los dispositivos de estrangulamiento son elementos que restringen el flujo, lo cual causa una caída de presión importante en el fluido. Algunos dispositivos comunes son válvulas, tubos capilares, reducciones bruscas y tapones porosos (corcho). Estos dispositivos producen una caída de presión sin implicar trabajo. La caída de presión en el fluido suele ir acompañada de una reducción en la temperatura, por esa razón los dispositivos de estrangulamiento son de uso común en aplicaciones de refrigeración y acondicionamiento de aire. La magnitud en la variación de la temperatura durante un proceso de estrangulamiento se rige o está determinada por el coeficiente de Joule-Thomson.

Aplicando la primera ley de la Termodinámica para sistemas abiertos:

$$\boldsymbol{W + Q = m\left(\frac{1}{2}\left(\vec{v}_2{}^2 - \vec{v}_1{}^2\right) + g(Z_2 - Z_1) + (u_2 - u_1) + P_2 v_2 - P_1 v_1\right)}$$

Haciendo las idealizaciones siguientes para los dispositivos de estrangulamiento Q ≈ 0; W ≈ 0; ΔEp = 0; ΔEc = 0 y considerando un flujo estacionario con una sola corriente tenemos la expresión:

$$(\boldsymbol{u_2} - \boldsymbol{u_1}) + \boldsymbol{P_2 v_2} - \boldsymbol{P_1 v_1} = \mathbf{0}$$

El resultado final de un proceso de estrangulamiento depende de cuál de las dos cantidades se incremente durante el proceso. Si el trabajo de flujo se incrementa durante el proceso ($\boldsymbol{P_2 v_2} > \boldsymbol{P_1 v_1}$), esto se puede lograr solo si la energía interna disminuye, lo cual ocasiona una disminución en la temperatura del fluido. Si se incrementa el producto Pv, la energía interna y la temperatura de un fluido se incrementarán durante un proceso de estrangulamiento.
Como:

$$h = u + Pv$$

$$(u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) = 0$$

o bien,

$$h_2 - h_1 = 0$$

Se concluye que un proceso de estrangulamiento ocurre a entalpia constante.

$$h_2 = h_1$$

Es decir, los valores de entalpia en la entrada y en la salida en una válvula de estrangulamiento se consideran los mismos. Por esta razón, una válvula de estrangulamiento se denomina dispositivo isentálpico (proceso a h = cte).

Coeficiente de Joule-Thomson.

El coeficiente de Joule-Thomson se define como:

$$\mu_{JT} = \left.\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h$$

y representa el cambio en la temperatura del fluido con respecto a la variación en la presión. Se pueden presentar los siguientes casos:

μ_{JT} < 0 La temperatura aumenta.

μ_{JT} = 0 La temperatura permanece constante.

μ_{JT} > 0 La temperatura disminuye.

Observando cuidadosamente la ecuación con la que se define, revela que el coeficiente de Joule-Thomson representa la pendiente de las líneas de entalpia constante (h=constante), esto se puede observar si se representa en un diagrama (P, T). Un fluido a temperatura y presión fija T_1 y P_1 que fluye por una válvula, donde se miden las reducciones de su temperatura y presión (P_2, T_2). Al graficar las temperatura contra la presión, se obtienen líneas de h=constante sobre un diagrama. Con la repetición del experimento para diferentes conjuntos de presión y temperatura de entrada y graficando los resultados, se puede construir un diagrama (T-P) para una sustancia con varias líneas donde h=constante.

Algunas líneas de entalpia constante en el diagrama (T-P) pasan por un punto de pendiente cero o coeficiente de Joule-Thomson cero. Las líneas que pasan por estos puntos reciben el nombre de **líneas de inversión**; y la temperatura en la cual se intersecta la línea de entalpía constante con la línea de inversión se le conoce como **temperatura de inversión**, y éstas son negativas en estados a la derecha de la línea de inversión,

$$\mu_{JT} = \left.\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h < 0$$

y positiva a la izquierda de ésta.

$$\mu_{JT} = \left.\frac{\partial T}{\partial P}\right)_h > 0$$

4. Equipo y material

1	Generador de vapor
1	Termopar de cromel-alumel

5. Desarrollo

1. Prender el generador de vapor.
2. Calentar hasta una presión de 6 [kg_f/cm^2].
3. Abrir toda la válvula.
4. Esperar unos segundos a que se alcance el estado estacionario.
5. Registrar la temperatura (T_1) del termopar antes del estrangulamiento.
6. Registrar la temperatura (T_2) con el termopar después del estrangulamiento.
7. Registrar la presión del manómetro y convertir a unidades del Sistema Internacional.
8. Cerrar la válvula.
9. Repetir a las mismas condiciones para cada equipo de trabajo.
10. Con el uso de tablas de propiedades termodinámica computarizadas (CATT3) obtener el valor de las entalpias antes y después del estrangulamiento. Las tablas termodinámicas computarizadas se encuentran disponibles en las computadoras ubicadas en las salas G001 y G002.
11. Con los valores obtenidos con las tablas computarizadas, llenar la tabla 1.
12. Para calcular la calidad del vapor se utilizará la siguiente expresión.

$$X_v = \frac{h_{mezcla-h_f}}{h_g - h_f}$$

Donde:

h_{mezcla} = Entalpia de mezcla y se obtiene con la presión y temperatura registrada después del estrangulamiento.

h_f = Entalpia de líquido saturado que se obtiene con la presión absoluta y la temperatura registrada antes de estrangular el vapor.

h_g = Vapor saturado que se obtiene con la presión absoluta y la temperatura registrada antes de estrangular el vapor.

Figura 1. Esquema del sistema propuesto y variables que se utilizan para determinar la calidad del vapor.

6. Resultados

Tabla 1

Equipo	P_{1man} [Pa]	P_{1abs} [Pa]	T_1 [°C]	P_{2man} [Pa]	P_{2abs} [Pa]	T_2 [°C]	h_2 [kJ/kg]	Xv (calidad)	μ_{J-T} [°C/Pa]
1									
2									
3									
4									
5									

7. Bibliografía

- Kenneth, Wark, Termodinámica, Sexta edición. España 2001. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México, 2015.
- Rolle, Kurt C. Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice hall.

8. Anexos

Cuestionario previo.

Coeficiente de Joule-Thomson

1. ¿Qué es un proceso de estrangulamiento?
2. ¿Qué es la calidad de un vapor y qué valores puede tener?
3. ¿Qué es una caldera?
4. ¿Cómo se expresa la entalpia de una mezcla líquido-vapor en equilibrio, en términos de las entalpias del líquido y del vapor saturados, para el caso de un fluido?
5. ¿En qué dispositivos se llevan a cabo procesos de estrangulamiento?
6. Dibuje un esquema aproximado de la curva de inversión y diga por qué se le llama así
7. Mencione algunos tipos de válvulas
8. Investigue los valores de la entalpia de evaporización a las siguientes presiones: 760, 540 y 400 [mm] Hg
9. Utilizando tablas de vapor de agua, calcule la entalpia de mezcla, si la fracción másica del vapor es igual a 0.8 y el sistema se encuentra a una presión de 30 [psig]. Exprese el resultado en el S. I. y en el sistema inglés.

10. ¿Cómo se interpretan los siguientes valores del coeficiente de Joule-Thomson (μ_{JT}) con respecto a la temperatura?

    a) positivo

    b) negativo

    c) igual a cero

9. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: "COEFICIENTE DE JOULE-THOMSON"

Defina los siguientes conceptos:

- Concepto de vapor saturado y sobrecalentado
- Concepto de estado
- Proceso de estrangulamiento
- Proceso de enfriamiento o calentamiento
- Proceso isentálpico
- Coeficiente de Joule-Thomson

Práctica 12

Análisis energético en un compresor.

1. Seguridad en la ejecución

	Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
1	Manejar con cuidado la bomba de calor PT, sólo puede trabajar máximo 15 minutos.	Si excede el tiempo de operación, se apagará automáticamente y puede dañarse.
2	Compresor (accionado con motor eléctrico).	Evite derramar agua sobre el equipo, ya que puede provocar un corto circuito y dañarlo.

2. Objetivos

- Identificar los componentes de una unidad de refrigeración (bomba de calor PT) propuesta para la práctica.
- Realizar un balance de energía y entropía para calcular el trabajo que requiere el compresor durante su funcionamiento.

3. Bases teóricas

El compresor es un componente indispensable en los sistemas de refrigeración y en las plantas de turbinas de gas.

Figura 1. Diferentes tipos de compresores

Existen dos tipos generales de compresores: de movimiento alternativo (rectilíneo) y de movimiento rotatorio. En el caso de altas presiones y flujo volumétricos bajos, se prefiere el compresor de movimiento alternativo; cuando se trata de presiones bajas y flujos de gran intensidad, se utiliza por lo común el compresor de tipo rotatorio. Pero no existe una presión distintiva que sirva para

separar estos dos tipos de máquinas, puesto que los compresores rotatorios pueden desarrollar también presiones elevadas.

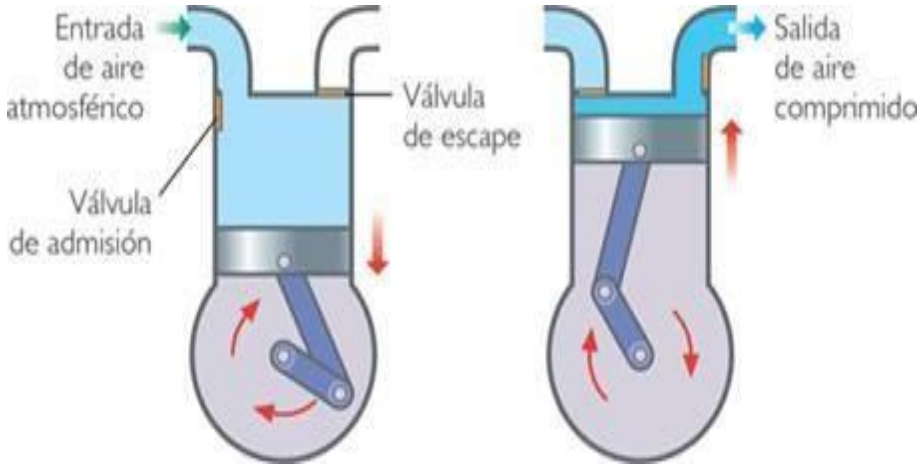

Figura 2. Compresor de pistón cilindro (este tipo de compresor es el que se utilizará en la práctica)

Una de las principales áreas de aplicación de la termodinámica es la refrigeración, que es la transferencia de calor de una región de temperatura inferior hacia una temperatura superior. Los dispositivos que producen la refrigeración se llaman refrigeradores. Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y los fluidos de trabajo empleados en los ciclos de refrigeración, se llaman refrigerantes. En la figura 3, se muestra de manea esquemática un refrigerador.

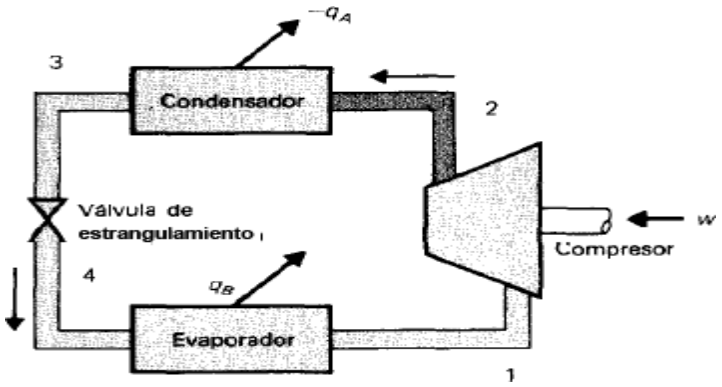

Figura 3. Sistema de refrigeración y sus componentes.

Procesos termodinámicos durante la refrigeración:

1-2 Compresión adiabática (Q= 0, s=cte)
2-3 Rechazo de calor a presión constante (P = cte)
3-4 Expansión del fluido (h=cte)
4-1 Suministro de calor a presión constante (P = cte)

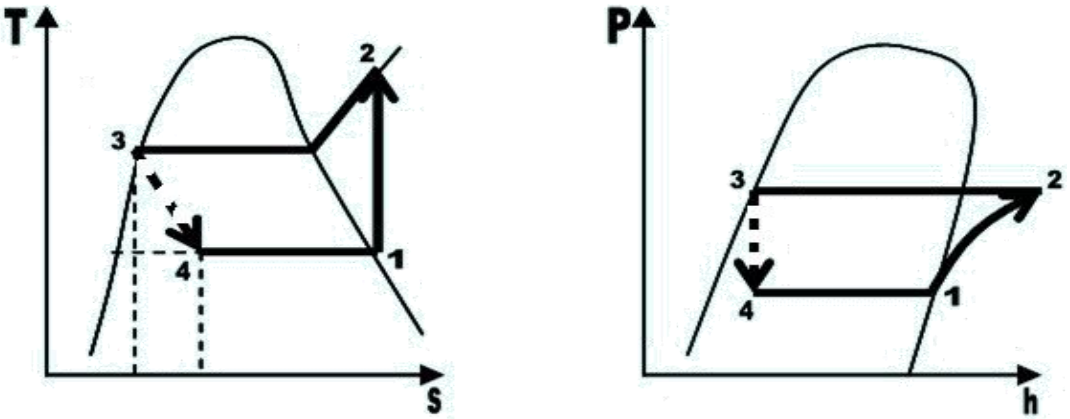

Figura 4. Diagramas termodinámicos que representan el proceso de refrigeración.

4. Equipo y material

1	Unidad de refrigeración denominada "***Bomba de calor PT"***
2	Termómetros de inmersión
1	Termopar
1	Agitador de plástico de 30 [cm] de longitud
1	Cronómetro
8	Litros de agua
	Tablas de propiedades termodinámicas computarizadas (CATT3) del refrigerante R-134a

5. Desarrollo

a. Identificar las partes que componen la unidad de refrigeración.
b. Identificar el fluido de trabajo y algunas de las características del mismo.
c. Llenar las cubetas con agua hasta cubrir la tubería de cobre en el condensador y evaporador (4 litros por cubeta).

Figura 5. Sistema de refrigeración denominado *"Bomba de Calor PT".*

d. Registrar las temperaturas del agua antes de poner en operación la unidad de refrigeración.
e. Poner en funcionamiento la unidad de refrigeración durante 15 minutos.
f. Registrar nuevamente las temperaturas del agua tanto del evaporador como del condensador (no olvide agitar el agua constantemente antes del registro de la temperatura).
g. Registrar las presiones del refrigerante en el evaporador y en el condensador, así como las temperaturas correspondientes, con ayuda de los instrumentos instalados en la unidad de refrigeración.
h. Calcular los flujos de calor en el evaporador y en el condensador.
i. Registrar los datos en las tablas 1 y 2.
j. Con base a la 1ª ley de la Termodinámica, aplicada a un ciclo, calcular el trabajo y la potencia del compresor.

Tabla 1. Registro de las temperaturas del agua en el evaporador y en el condensador.

Equipo	$T_{1\,(agua)}$ [°C]	$T_{2\,(agua)}$ [°C]	$Q = mc(T_2 - T_1)$ [J]
Evaporador			
Condensador			

Tabla 2. Registro de presiones y temperaturas del refrigerante en el evaporador y en el condensador.

Equipo	P[Pa]	T[°C]
Evaporador		
Condensador		

Balances de energía y entropía:

Trabajo del compresor.

$$W_{comp} = Q_{alta} - Q_{baja}$$

$$W_{comp} = \left[mc_{agua}(T_2 - T_1)\right]_{cond} - \left[mc_{agua}(T_2 - T_1)\right]_{evap}$$

Potencia del compresor.

$$\dot{W} = \frac{W}{\Delta t}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{h_2 - h_1}$$

Cambio de entropía en el compresor.

$$\Delta S_{comp} = (S_2 - S_1) = m(s_2 - s_1)$$

$$\Delta S_{amb} = \frac{Q_{cond}}{T_{amb}} - \frac{Q_{evap}}{T_{amb}}$$

$$\Delta S_{sist} = \Delta S_{comp} - \Delta S_{amb}$$

$$\Delta S_{comp} = m(s_2 - s_1) + \left[\frac{Q_{cond}}{T_{amb}} - \frac{Q_{evap}}{T_{amb}}\right]$$

6. Bibliografía

- Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
- Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
- Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
- Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001 España. Reverté.

7. Anexo

Cuestionario previo.
Análisis energético en un compresor.

1. ¿Qué es una máquina térmica y una bomba de calor?
2. Dibuje un esquema de una máquina térmica y de una bomba de calor, indicando los flujos energéticos involucrados.
3. ¿Qué es un compresor y qué tipos de compresores se utilizan industrialmente?
4. Investigue las características del refrigerante R-134a.
5. Escriba la ecuación de la primera ley de la termodinámica aplicada a un ciclo y explique cada uno de sus términos.
6. Con base en la primera ley de la Termodinámica escriba la ecuación que permita calcular el trabajo que requiere el compresor adiabático para su funcionamiento.
7. Escriba la ecuación del balance de entropía en un compresor y explique cada uno de sus términos.

8. Investigue y explique qué es la eficiencia, la eficiencia mecánica, la eficiencia térmica y la eficiencia adiabática.
9. Investigue y escriba la ecuación que se aplica para calcular la eficiencia adiabática en un compresor.
10. Dibuje los diagramas termodinámicos (s, T), (h, P) y (v, P) para una máquina de refrigeración.

8. Índice de temas de estudio

PRÁCTICA: "ANÁLISIS ENERGÉTICO EN UN COMPRESOR.

Definir los siguientes conceptos:

- Compresor
- Tipos de compresores industriales
- Máquina térmica
- Bomba de calor
- Balance de energía para sistemas abiertos
- Segunda ley de la Termodinámica
- Balance de entropía
- Eficiencia de una máquina
- Diagramas termodinámicos (s,T), (h,P) y (v,P)
- Proceso isobárico
- Proceso adiabático
- Proceso isentrópico