



INSTITUTO DE
FORMACIÓN
SUPERIOR

APUNTES DE CATEDRA

MECÁNICA DE LOS FLUIDOS

ÍNDICE

UNIDAD I	4
<i>Revisión de Física Aplicada</i>	4
1. ESTÁTICA.....	4
<i>Equilibrio de una partícula</i>	4
<i>Equilibrio de un cuerpo rígido</i>	5
2. CINEMÁTICA.....	6
3. DINÁMICA	8
3.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	8
3.2. LEYES DE NEWTON	9
4. TEOREMA TRABAJO Y ENERGÍA	9
5. MAGNITUDES Y UNIDADES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	11
6. EJERCICIOS PROPUESTOS.....	12
UNIDAD II	14
<i>HIDROSTÁTICA</i>	14
1. DENSIDAD	14
2. PESO ESPECÍFICO	14
3. PRESIÓN	15
4. PRINCIPIO DE PASCAL	15
5. PRESIÓN ABSOLUTA, PRESIÓN MANOMÉTRICA Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	17
6. MEDIDORES DE PRESIÓN	18
7. PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES	20
8. TENSIÓN SUPERFICIAL	22
9. LA SUPERFICIE DE LOS LÍQUIDOS.....	23
10. COHESIÓN Y ADHESIÓN	23
11. CAPILARIDAD	23
12. EJERCICIOS PROPUESTOS.....	24
UNIDAD III	27
<i>HIDRODINÁMICA</i>	27
1. FLUJO DE FLUIDOS	27
2. LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD – LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA.....	27

3. FLUJO DE VOLUMEN: CAUDAL.....	28
4. ECUACIÓN DE BERNOULLI	29
4.1 TUBO VENTURI	31
5. MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO	32
5.1. NUMERO DE REYNOLDS (<i>Re</i>).....	33
6. VISCOSIDAD	33
7. FLUJOS VISCOSOS	34
8. FLUJOS COMPRESIBLES.....	35
9. EJERCICIOS PROPUESTOS.....	36
UNIDAD IV	39
<i>ENERGÍA INTERNA, TEMPERATURA Y CALOR</i>	39
1. TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO.....	39
1.1. Ley cero de la termodinámica	40
2. TERMÓMETROS Y ESCALAS DE TEMPERATURA.....	41
3. TERMÓMETROS DE GAS Y LA ESCALA KELVIN	42
3.1. La escala Kelvin y temperatura absoluta	43
4. EXPANSIÓN O DILATACIÓN TÉRMICA	44
4.1. Expansión lineal.....	44
4.2. Expansión de volumen.....	46
4.3. Expansión térmica del agua	48
4.4. Esfuerzo térmico.....	49
5. CANTIDAD DE CALOR	50
5.1. Calor específico	50
5.2. Capacidad calorífica molar.....	51
6. CALORIMETRÍA Y CAMBIOS DE FASE	52
6.1. Cambios de fase	52
7. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	54
Conducción	54
Convección	55
Radiación.....	55
8. MODELO CINÉTICO-MOLECULAR DEL GAS IDEAL.....	55
8.1. Modelo Molecular de la presión de un Gas Ideal.....	56
8.2. Interpretación Molecular de la Temperatura.....	56

9. CAPACIDADES CALORÍFICAS DE LOS GASES	56
10. Ejercicios Propuestos	57
UNIDAD V	59
GASES	59
LEY DE LOS GASES IDEALES	59
1. Ley de Boyle	59
2. Ley de Charles y Gay- Lussac.....	60
3. Ley de Avogadro	62
4. Ecuación del Gas Ideal	62
5. Ley de Dalton de presiones parciales	64
6. Gases Reales	64
6.1 Ecuación de Van del Waals	65
7. Ejercicios Propuestos	66
UNIDAD VI	68
PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA	68
1. SISTEMAS TERMODINÁMICOS.....	68
1.1. Signos del calor y el trabajo en termodinámica	68
2. TRABAJO REALIZADO AL CAMBIAR EL VOLUMEN	68
3. TRAYECTORIA ENTRE ESTADOS TERMODINÁMICOS	70
3.1. Trabajo efectuado en un proceso termodinámico	70
3.2. Calor agregado en un proceso termodinámico.....	71
4. ENERGÍA INTERNA Y LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA	72
4.1. Comprensión de la primera ley de la termodinámica	73
4.2. Procesos cíclicos y sistemas aislados.....	74
5. TIPOS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS.....	76
<i>Proceso adiabático</i>	76
<i>Proceso isocórico</i>	77
<i>Proceso isobárico</i>	77
<i>Proceso isotérmico</i>	77
6. ENERGÍA INTERNA DE UN GAS IDEAL	78
7. CAPACIDAD CALORÍFICA DEL GAS IDEAL	79
7.1. Relación entre C_p y C_v para un gas ideal.....	80
8. EJERCICIOS PROPUESTOS.....	81

UNIDAD I

Revisión de Física Aplicada

1. ESTÁTICA

Es la parte de la física que estudia las fuerzas en equilibrio. Si sobre un cuerpo no actúan fuerzas o actúan varias fuerzas cuya resultante es cero, decimos que el cuerpo está en equilibrio. Si un cuerpo está en equilibrio significa que está en reposo o se mueve en línea recta con velocidad constante. Para que un cuerpo se halle en equilibrio se necesita que la suma vectorial de todas las fuerzas que actúa sobre él sea nula, debiendo también ser nula la suma de los momentos producidos por las fuerzas, que es una magnitud vectorial que produce rotaciones, cuya dirección está dada por el sentido de la fuerza. El momento de una fuerza se mide en relación a un punto, y es el producto de la fuerza, por la distancia que separa el punto de la recta de aplicación de la fuerza.

Una partícula puede ser cualquier objeto que en comparación con otro resulta ser muy pequeño. Una partícula puede tener solo movimiento de traslación. En cambio, un cuerpo rígido es un conjunto de muchas partículas en la cual todas las partículas no deben vibrar y deben trasladarse a la misma velocidad. Un cuerpo rígido por lo general tiene movimiento de traslación y rotación.

Equilibrio de una partícula

Por la primera ley de Newton, decimos que una partícula se encuentra en equilibrio si la suma de todas las fuerzas que actúan sobre ella es cero; esto es:

$$\sum F = 0 \text{ (Ec. 1)}$$

La Ec. 1 es equivalente a:

$$\sum F_x = 0 \text{ (Ec. 2)}$$

$$\sum F_y = 0 \text{ (Ec. 3)}$$

$$\sum F_z = 0 \text{ (Ec. 4)}$$

Ahora analicemos gráficamente el equilibrio de tres fuerzas que actúan sobre una partícula. Consideremos las tres fuerzas ilustradas en la Figura 1. Si las fuerzas están en equilibrio significa que $F_1 + F_2 + F_3 = 0$. De modo que si realizamos la suma vectorial de las tres fuerzas se obtiene un triángulo lo cual confirma que las tres fuerzas concurrentes¹ están en equilibrio.

¹ Es común que un cuerpo esté siempre sometido a la acción de dos o más fuerzas. Decimos que dos o más fuerzas son concurrentes cuando la dirección de sus vectores o sus prolongaciones se cortan en un punto.

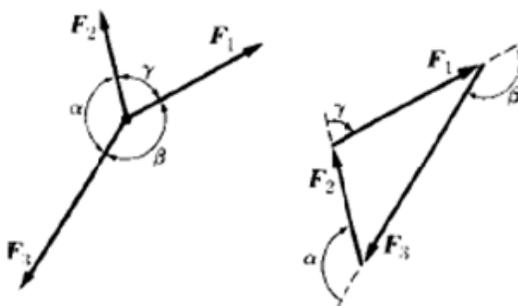


Figura 1: Diagrama vectorial.

Ejemplo:

Una partícula está sometida a 4 fuerzas F1, F2, F3 y F4, como se ve en la Figura 2. Determinar si la partícula se encuentra en equilibrio.

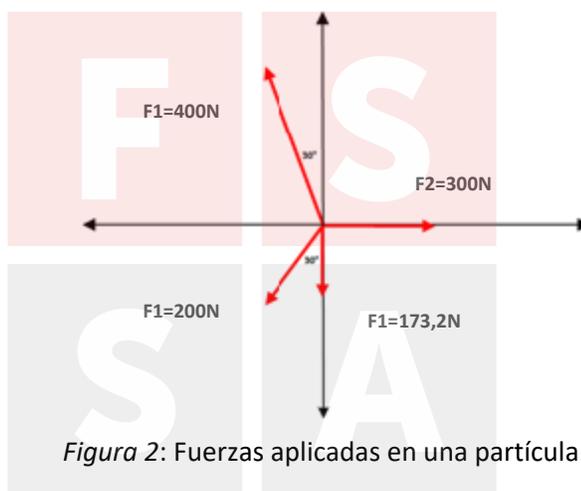


Figura 2: Fuerzas aplicadas en una partícula.

Resolución:

Plantear sumatoria de fuerzas en eje x y en el eje y. Para ello, se debe sumar las proyecciones de las fuerzas en los 2 ejes.

$$\sum F_x = 300N - 200N \cdot \text{sen}30^\circ - 400N \cdot \text{sen}30^\circ = 0N$$

$$\sum F_y = -173,2N - 200N \cdot \text{cos}30^\circ + 400N \cdot \text{cos}30^\circ = 0N$$

Como la sumatoria de fuerzas, tanto en el eje x como en el eje y, es igual a 0 (cero), la partícula se encuentra en equilibrio

Equilibrio de un cuerpo rígido

Cuando las fuerzas están actuando sobre un cuerpo rígido, es necesario considerar el equilibrio en relación tanto a la traslación como a la rotación. Por lo tanto, se requieren de las siguientes condiciones:

1. La suma de todas las fuerzas debe ser cero (equilibrio de traslación):

$$\sum F = 0 \text{ (Ec. 5)}$$

2. La suma de todos los torques con respecto a cualquier punto debe ser cero (equilibrio rotacional):

$$\sum \tau = 0 \text{ (Ec. 6)}$$

2. CINEMÁTICA

La cinemática es una rama de la física dedicada al estudio del movimiento de los cuerpos en el espacio, sin atender a las causas que lo producen (lo que llamamos fuerzas). Por tanto, la cinemática sólo estudia el movimiento en sí, a diferencia de la dinámica que estudia las interacciones que lo producen.

Se dice que un cuerpo está en movimiento si su posición respecto de un observador cambia en el tiempo. Si la posición no cambia decimos que el cuerpo está en reposo. El movimiento es un concepto relativo, depende del observador.

Para describir y estudiar un movimiento, es imprescindible establecer un sistema de referencia (observador) respecto al cual expresar las diferentes magnitudes físicas del movimiento. El sistema de referencia se compone de un punto de referencia (origen del sistema de referencia) y unos ejes de coordenadas (x e y) respecto de los cuales se expresa la posición del objeto.

Ahora se presentan algunas clases de movimiento posibles junto con las funciones y las gráficas que la describen:

1. **Ningún movimiento en absoluto:** aquí la partícula ocupa la posición x_0 en la coordenada en todo momento. La Figura 3 muestra el caso de la bolita que está en reposo en la ubicación $x=x_0$.

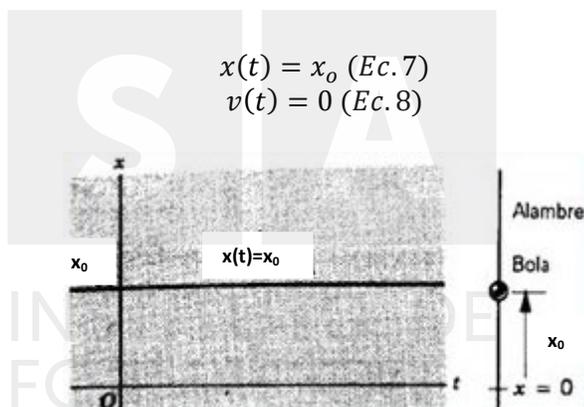


Figura 3: Partícula que se encuentra en reposo, no se mueve.

2. **Movimiento a velocidad constante:** en el movimiento unidimensional, la velocidad puede ser positiva, si la partícula se mueve en la dirección en que x crece, o bien negativa, si se mueve en la dirección opuesta. En el caso del movimiento a velocidad constante, la posición contra el tiempo en la gráfica es una línea recta con pendiente constante.

La Figura 4 muestra a la partícula en la posición $x=x_0$ en el tiempo $t=0$. Se está moviendo con rapidez en la dirección creciente de x. Su velocidad es, entonces positiva, como lo indica la pendiente positiva.

$$x(t) = v_0 \cdot t + x_0 \text{ (Ec. 9)}$$

$$v(t) = v_0 \text{ (Ec. 10)}$$

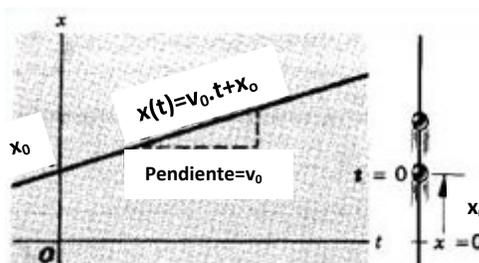


Figura 4: Partícula en movimiento a velocidad constante.

3. **Movimiento acelerado:** en este caso la velocidad está cambiando (la aceleración se define como la razón de cambio de la velocidad), y por lo tanto la pendiente cambiara también. En el ejemplo que ilustra la Figura 5, suponiendo $a > 0$, la pendiente aumenta en forma continua al moverse la partícula más y más rápidamente.

$$x(t) = a_0 \cdot \frac{t^2}{2} + v_0 \cdot t + x_0 \text{ (Ec. 11)}$$

$$v(t) = a_0 \cdot t + v_0 \text{ (Ec. 12)}$$

$$a(t) = a_0 \text{ (Ec. 13)}$$

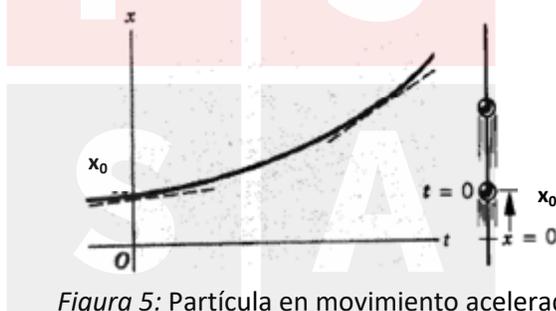


Figura 5: Partícula en movimiento acelerado.

Ejemplo:

Un tren eléctrico parte del reposo, a los 5 segundos el tren posee una velocidad de 180 km/h hacia la derecha. Si su aceleración es constante, calcular:

- Aceleración.
- Espacio recorrido en esos 5 segundos.
- ¿Qué velocidad tendrá a los 11 segundos?

Resolución:

- a) Este es un caso de un cuerpo en movimiento acelerado. Como el tren parte del reposo la velocidad inicial es igual a 0 ($v_0=0$). Considerando que los ejes de coordenada se encuentran en la posición de partida del tren, entonces $x_0=0$. Por lo tanto, las Ec. 11, 12 y 13 se simplifican de la siguiente manera:

$$x(t) = a_0 \cdot \frac{t^2}{2}$$

$$v(t) = a_0 \cdot t$$

$$a(t) = a_0$$

A los 5s la velocidad es igual a 150 km/h (41,67 m/s), reemplazando en la ecuación de velocidad:

$$v(5s) = a_0 \cdot 5s = 41,67 \frac{m}{s}$$

$$a_0 = \frac{41,67 \frac{m}{s}}{5s}$$

$$a_0 = 8,33 \frac{m}{s^2}$$

b) Para obtener el espacio recorrido en los 5s, se utiliza la ecuación de distancia:

$$x(t) = a_0 \cdot \frac{t^2}{2}$$

$$x(5s) = \frac{8,33m}{s^2} \cdot \frac{(5s)^2}{2}$$

$$x(5s) = 104,17 m$$

c) La velocidad a los 11s se obtiene utilizando la ecuación de velocidad:

$$v(11s) = \frac{8,33m}{s^2} \cdot (11s)$$

$$v(11s) = 91,67 \frac{m}{s}$$

3. DINÁMICA

La Dinámica es la parte de la física que estudia la relación entre el movimiento y las causas que lo producen (las fuerzas). El movimiento de un cuerpo es el resultado de las interacciones con otros cuerpos que se describen mediante fuerzas.

Isaac Newton estableció, mediante experimentos con cuerpos en movimiento, las Leyes de Newton las cuales constituyen los tres principios básicos que explican el movimiento de los cuerpos.

3.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Fuerza: la fuerza es “un empujón o un tirón”, es toda acción capaz de producir cambios en el movimiento o en la estructura de un cuerpo, por lo tanto da una descripción cualitativa de la interacción entre 2 cuerpos o entre un cuerpo y su entorno. La fuerza es una magnitud vectorial y se representa como una flecha, que se caracterizan por su longitud (módulo), donde se aplica (punto de aplicación), su dirección y sentido.

Fuerza Neta (o Resultante): es la suma vectorial de todas las fuerzas individuales aplicadas en una partícula o cuerpo.

Masa: es la cantidad de materia que tiene un cuerpo. Me indica que tan difícil es acelerar o frenar un cuerpo. La masa es una magnitud escalar.

Inercia: es la propiedad que poseen los cuerpos de oponerse a un cambio de su estado de reposo o movimiento en que se encuentran. Como tal, la inercia es la resistencia ofrecida por un cuerpo a la alteración de su estado en reposo o movimiento. La medida de la inercia de un objeto es su masa.

Velocidad y Rapidez:

Velocidad	Rapidez
Magnitud vectorial	Magnitud escalar
Longitud/tiempo	Longitud/tiempo
Desplazamiento/tiempo	Distancia/tiempo
$\Delta x/t$	d/t

Figura 6: Tabla de diferencia entre Velocidad y Rapidez.

Aceleración: es el cambio de velocidad por unidad de tiempo. Un cambio de velocidad requiere la aplicación de una fuerza. La aceleración es una magnitud vectorial.

3.2. LEYES DE NEWTON

Primera Ley de Newton: todo cuerpo en reposo sigue en reposo a menos que sobre él actúe una fuerza externa. Un cuerpo en movimiento continúa moviéndose con velocidad constante a menos que sobre él actúe una fuerza externa.

$$\sum F = 0 \text{ (Ec. 14)}$$

Segunda Ley de Newton: La aceleración de un cuerpo tiene la misma dirección que la fuerza externa neta que actúa sobre él. Es proporcional a la fuerza externa neta $F_{neta} = m \cdot a$, donde m es la masa del cuerpo. La fuerza neta que actúa sobre un cuerpo, también llamada fuerza resultante, es el vector suma de todas las fuerzas que actúan sobre él: $F_{neta} = \sum F$. Por lo tanto:

$$\sum F = m \cdot a \text{ (Ec. 15)}$$

Tercera Ley de Newton o principio de acción-reacción: La fuerza siempre actúa por pares iguales y opuestos. Si el cuerpo A ejerce una fuerza $F_{A,B}$ sobre el cuerpo B, ésta ejerce una fuerza igual, pero opuesta $F_{B,A}$, sobre el cuerpo A. Por lo tanto:

$$F_{A,B} = -F_{B,A} \text{ (Ec. 16)}$$

4. TEOREMA TRABAJO Y ENERGÍA

El trabajo efectuado por la fuerza neta sobre una partícula es igual al cambio de energía cinética de la partícula:

$$W_{total} = K_2 - K_1 = \Delta K \text{ (Ec. 17)}$$

Siendo la energía cinética:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (Ec. 18)}$$

Y el W_{tot} puede definirse como el producto de la magnitud de la fuerza neta, F_{Neta} , y la magnitud del desplazamiento, s . Como F_{Neta} y s son magnitudes vectoriales, si la fuerza no tiene la misma dirección que el vector desplazamiento, se va a utilizar la proyección de la fuerza en la misma dirección que el vector desplazamiento.

$$W_{\text{total}} = \overrightarrow{F_{\text{Neta}}} \cdot \vec{s} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$W_{\text{total}} = F_{\text{Neta}} \cdot s \cdot \cos\theta \quad (\text{Ec. 20})$$

Siendo θ ángulo entre el vector fuerza y el vector desplazamiento.

- Si W_{tot} es positivo, la energía cinética aumenta (la energía cinética final K_2 es mayor que la energía cinética inicial K_1) y la partícula tiene mayor rapidez al final del desplazamiento que al principio.
- Si W_{tot} es negativa, la energía cinética disminuye (K_2 es menor que K_1) y la rapidez es menor después del desplazamiento.
- Si $W_{\text{total}} = 0$, la energía cinética permanece igual ($K_1 = K_2$) y la rapidez no cambia.

Observe que el de teorema trabajo y energía (Ec. 17) sólo indica cambios en la rapidez, no en la velocidad, pues la energía cinética no depende de la dirección del movimiento. De la igualdad de la ecuación se nota que la energía cinética y el trabajo deben tener las mismas unidades. Por lo tanto, el **Joule** es la unidad del **J** tanto del trabajo como de la energía cinética (y de todos los tipos de energía). Para verificarlo, observe que la cantidad $K = \frac{1}{2}mv^2$ tiene unidades de $\text{kg} \cdot (\text{m/s})^2$ o $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$; recordamos que $1\text{N} = 1 \text{kg} \cdot (\text{m/s})^2$ así que,

$$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 1 \text{Kg} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot \text{m} = 1\text{Kg} \cdot \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right)$$

Ejemplo:



Esteban ejerce una fuerza constante de magnitud 210 N sobre un auto averiado, mientras lo empuja una distancia de 18 m. Además, un neumático se desinfló, así que para lograr que el auto avance al frente, Esteban debe empujarlo con un ángulo de 30° respecto a la dirección del movimiento. ¿Cuánto trabajo efectúa Esteban?

Resolución:

$$W = F \cdot s \cdot \cos\phi$$

$$W = 210 \text{ N} \cdot 18 \text{ m} \cdot \cos 30^\circ$$

$$W = 3,3 \cdot 10^3 \text{ J}$$

Ejemplo:

Un trineo que pesa 1500 kg tiene una rapidez inicial de 2 m/s, y sobre él se aplica un trabajo 10000 J, ¿cuál es la rapidez final del trineo?

Resolución:

$$W_{total} = K_2 - K_1$$

$$K_2 = K_1 + W_{total}$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot 1500 \text{ kg} \cdot \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3000 \text{ J}$$

$$K_2 = 3000 \text{ J} + 10000 \text{ J} = 13000 \text{ J}$$

Como:

$$K_2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2$$

Entonces,

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{K_2}{m}} = \sqrt{2 \cdot \frac{13000 \text{ J}}{1500 \text{ kg}}}$$

$$v_2 = 4,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5. MAGNITUDES Y UNIDADES FUNDAMENTALES DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Magnitudes Físicas	Nombre de la Unidad	Símbolo
Longitud	Metro	m
Masa	Kilogramo	Kg
Tiempo	Segundo	s
Intensidad de corriente Eléctrica	Ampere	A
Temperatura	Kelvin	K
Cantidad de Sustancia	Mol	mol
Intensidad Luminosa	Candela	Cd

Figura 7: Tabla de Magnitudes Físicas.

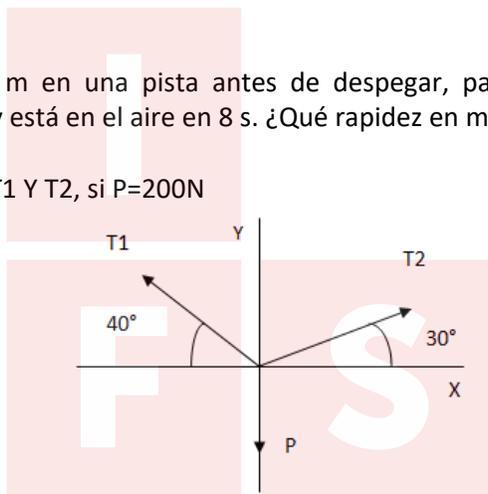
Magnitud	Unidad SI derivada	Símbolo
Fuerza	Newton	N (1N = 1Kg. 1m/s ²)
Presión	Pascal	Pa (1Pa = 1N/m ²)
Energía, trabajo	Joule	J (1J = 1N.m)
Potencia	Watt	W (1W = 1J/s)
Área	Metro cuadrado	m ² (1m ² = 1m*1m)
Volumen	Metro cúbico	m ³ (1m ³ = 1m*1m*1m)
Densidad	kilogramo/metro cúbico	kg/m ³
Aceleración	metro/segundo cuadrado	m/s ²
Velocidad	metro/segundo	m/s

Figura 8: Tabla de Magnitudes Físicas.

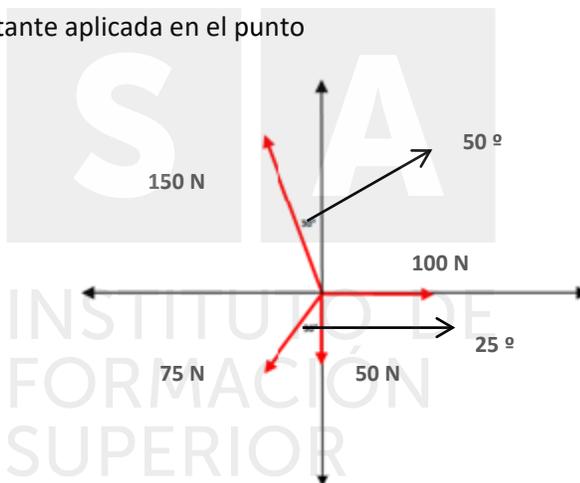


6. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. Un automóvil viaja a una velocidad constante de 100 Km/h. ¿Cuánto tarda en recorrer 55 Km?
2. Un ciclista circula por la ciclo vía a una velocidad de 15 km/h. A los 500 m del lugar de partida hay un cruce vehicular, por lo que el ciclista debe frenar. ¿Cuánto tiempo tarda en frenar y cuál es su aceleración?
3. Un avión recorre 280 m en una pista antes de despegar, parte del reposo, se mueve con una aceleración constante y está en el aire en 8 s. ¿Qué rapidez en m/s tiene cuando despega?
4. Obtener las tensiones T1 Y T2, si P=200N



5. Obtener la fuerza resultante aplicada en el punto



6. ¿Qué fuerza neta se requiere para impartir a un refrigerador de 135 kg una aceleración de 1,4 m/s²?
7. Una caja descansa sobre un estanque helado que actúa como superficie horizontal sin fricción. Si un pescador aplica una fuerza horizontal de 48 N a la caja y produce una aceleración de 3 m/s², ¿qué masa tiene la caja?
8. Un obrero debe mover una caja 20 m sobre una superficie sin rugosidad. El trabajo necesario para mover la caja es de 3000 J, ¿cuál es la fuerza que necesita realizar el obrero?
9. Un cuerpo de 150 g de masa se lanza hacia arriba con velocidad inicial de 400 m/s, calcular la energía cinética inicial.

10. Un auto de 1.400 Kg viaja hacia el Norte, acelera de manera constante, cambiando su velocidad de 18 m/s a 30 m/s en 20 s. Calcula el trabajo realizado en esta situación a raíz del cambio en la velocidad.

PROBLEMAS ADICIONALES:

11. Un cuerpo se mueve, partiendo del reposo, con una aceleración constante de 8 m/s^2 . Calcular:
 a) La velocidad que tiene al cabo de 5 s.
 b) la distancia recorrida, desde el reposo, en los primeros 5 s.
12. Si se aplica una fuerza neta de horizontal de 132 N a una persona de 60 Kg que descansa en el borde de una alberca, ¿qué aceleración horizontal se produce?
13. Calcular la energía cinética, en joules, de un auto de 1600 kg que viaja a 50 km/h.
14. Un trineo de 8 kg se mueve en línea recta sobre una superficie horizontal sin fricción. En cierto punto, su rapidez es de 4 m/s; 2,5 m más adelante, es de 6 m/s. Use el teorema de trabajo-energía para determinar la fuerza que actúa sobre el trineo, suponiendo que es constante y actúa en la dirección del movimiento.
15. Un vagón de juguete de 7 kg se mueve en línea recta sobre una superficie horizontal sin fricción. Tiene rapidez inicial de 4 m/s y luego es empujado 3 m en la dirección de la velocidad inicial por una fuerza de 10 N. Calcule la rapidez final del vagón.

7. RESULTADOS

1. $t = 0,55 \text{ h}$
2. $t = 0,067 \text{ h}$; $a_0 = -0,017 \text{ m/s}^2$
3. $a_0 = -8,75 \text{ m/s}^2$; $v = 70 \text{ m/s}$
4. $T_1 = 184,32 \text{ N}$; $T_2 = 163,04 \text{ N}$
5. $F_{\text{resultante}} = 51,34 \text{ N}$; $\theta = 24,82^\circ$
6. $F = 189 \text{ N}$
7. $m = 16 \text{ Kg}$
8. $F = 150 \text{ N}$
9. $K = 12000 \text{ J}$
10. $W = 403200 \text{ J}$

Ejercicios adicionales.

11. $V(t=5 \text{ s}) = 40 \text{ m/s}$; $x(t=5 \text{ s}) = 100 \text{ m}$
12. $a = 2,2 \text{ m/s}^2$
13. $K = 154345,68 \text{ J}$
14. $F = 32 \text{ N}$
15. $V_2 = 4,96 \text{ m/s}$

UNIDAD II
HIDROSTÁTICA

1. DENSIDAD

Una propiedad importante de cualquier material es su densidad, que se define como su masa por unidad de volumen. Un material homogéneo, como el hielo o el hierro, tiene la misma densidad en todas sus partes. Si una masa m de material homogéneo tiene un volumen V , la densidad ρ es:

$$\rho = \frac{m}{V} = \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \text{ (Ec. 21)}$$

$$1 \frac{g}{cm^3} = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

Material	Densidad (g/cm ³)
Aire	0,00130
Hielo	0,920
Agua	1,00
Agua de mar	1,04
Aluminio	2,70
Hierro	7,90
Cobre	8,90
Mercurio	13,6
Oro	19,3

Figura 9: Tabla de Densidades.

La **Densidad Relativa** de un cuerpo es un número adimensional que viene dado por la relación de la densidad de un cuerpo y la densidad de un volumen igual de una sustancia que se toma como referencia. Los sólidos y líquidos se refieren al agua a 4°C, mientras que los gases se refieren al aire libre de CO₂ e Hidrogeno a 0°C y 1 Atm de presión, como condiciones normales.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{referencia}}} \text{ (Ec. 22)}$$

Por ejemplo la densidad relativa del aceite es 0,75, la del agua es 1 y la del Mercurio es 13,57.

2. PESO ESPECÍFICO

El peso específico de un material homogéneo es la división entre el peso que tiene dicho material y el volumen que está ocupando, esto es:

$$\gamma = \frac{w}{V} = \frac{m \cdot g}{\frac{m}{\rho}} = g \cdot \rho = \left[\frac{N}{m^3} \right] \text{ (Ec. 23)}$$

3. PRESIÓN

Cuando un fluido (ya sea líquido o gas) está en reposo, ejerce una fuerza perpendicular a cualquier superficie en contacto con él, como la pared de un recipiente o un cuerpo sumergido en el fluido.

Si imaginamos una superficie dentro del fluido, el fluido a cada lado de ella ejerce fuerzas iguales y opuestas sobre la superficie (si no, la superficie se aceleraría y el fluido no permanecería en reposo). Considere una superficie pequeña de área dA centrada en un punto en el fluido; la fuerza normal que el fluido ejerce sobre cada lado es dF_{\perp} , entonces definimos la presión p en ese punto como la fuerza normal por unidad de área, es decir:

$$p = \frac{dF_{\perp}}{dA} \quad (\text{Ec. 24})$$

Si la presión es la misma en todos los puntos de una superficie plana finita de área A , entonces:

$$p = \frac{F_{\perp}}{A} = [Pa] \quad (\text{Ec. 25})$$

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1,013 \text{ bar} = 1013 \text{ milibares} = 14.7 \frac{\text{lb}}{\text{pul}^2}$$

Donde F_{\perp} es la fuerza normal neta en un lado de la superficie.

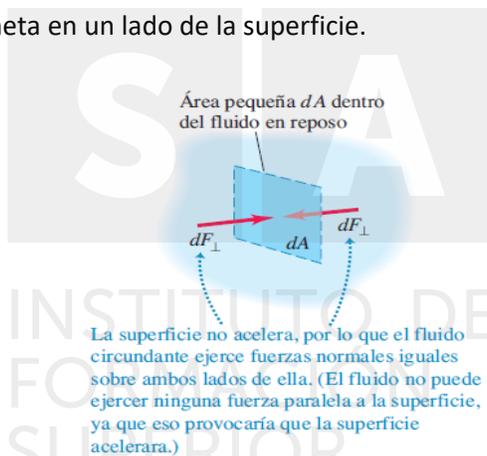
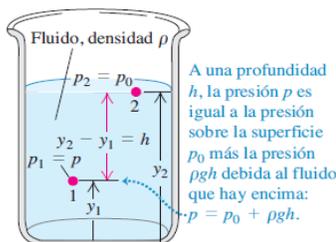


Figura 10: Representación del dA del fluido y las dF_{\perp} aplicadas en ella.

4. PRINCIPIO DE PASCAL

A partir de la Figura 11 veremos cómo varía la presión en función de la profundidad en un fluido con densidad uniforme.



La diferencia de presión entre los niveles 1 y 2:

$$p_2 - p_1 = -\rho g(y_2 - y_1)$$

La presión es mayor en un nivel más bajo.

Figura 11: Presiones de un fluido contenido en un recipiente.

Si p_1 y p_2 son las presiones en las alturas y_1 y y_2 respectivamente, y si ρ y g son constantes, entonces:

$$p_2 - p_1 = -\rho \cdot g (y_2 - y_1) \text{ (Ec. 26)}$$

Si ahora tomamos el punto 1 en cualquier nivel en el fluido y sea p la presión en ese punto. Tomemos el punto 2 en la superficie del fluido, donde la presión es p_0 (el subíndice indica profundidad cero). La profundidad del punto 1 bajo la superficie es $h = y_2 - y_1$, y la Ec. 26 se convierte en:

$$p_0 - p = -\rho \cdot g (y_2 - y_1) = -\rho g h \text{ (Ec. 27)}$$

o bien,

$$p = p_0 + \rho g h \text{ (Ec. 28)}$$

Observe que la presión es la misma en dos puntos cualesquiera situados en el mismo nivel en el fluido. En la Ec. 28, se nota que la presión p a una profundidad h es mayor que la presión p_0 en la superficie, en una cantidad $\rho g h$ y a su vez nos dice que si aumentamos la presión p_0 en la superficie, tal vez usando un pistón que embona herméticamente en el recipiente para empujar contra la superficie del fluido, la presión p a cualquier profundidad aumenta exactamente en la misma cantidad. El científico Blaise Pascal reconoció este hecho y lo enunció en el Principio de Pascal.

“El principio de pascal establece lo siguiente: la presión aplicada a un fluido encerrado se transmite sin disminución a todas las partes del fluido y las paredes del recipiente”.

El elevador hidráulico que se representa en la Figura 12, ilustra la ley de Pascal.

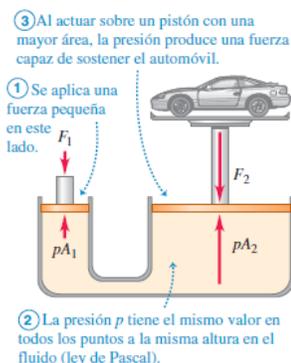


Figura 12: Elevador hidráulico.

Un pistón con área transversal pequeña A_1 ejerce una fuerza F_1 sobre la superficie de un líquido (aceite). La presión aplicada $p = F_1/A_1$ se transmite a través del tubo conector a un pistón mayor de área A_2 . La presión aplicada es la misma en ambos cilindros, así que:

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \text{ (Ec 29)}$$

y,

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1 \text{ (Ec. 30)}$$

En el caso de los gases, el supuesto de que la densidad es uniforme sólo es realista en distancias verticales cortas. Los líquidos, en cambio, son casi incompresibles, y suele ser una buena aproximación considerar su densidad como independiente de la presión. Una presión de varios cientos de atmósferas sólo causa un pequeño incremento porcentual en la densidad de la mayoría de los líquidos.

Ejemplo:

Los émbolos de una prensa hidráulica tienen 25 cm^2 y 150 cm^2 . Si se aplica una fuerza de 100 N en el émbolo pequeño, ¿Cuál será la fuerza que se ejercerá sobre el mayor?

Resolución:

Como la presión se ejerce por todo el fluido íntegramente, entonces la presión del embolo grande (P_1) será la misma que la del émbolo pequeño (P_2), esto es:

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$\frac{100 \text{ N}}{250000 \text{ N}} = \frac{F_2}{1500000 \text{ N}}$$

$$\boxed{F_2 = 600 \text{ N}}$$

5. PRESIÓN ABSOLUTA, PRESIÓN MANOMÉTRICA Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Presión absoluta	Presión manométrica	Presión atmosférica
Cuando la presión se mide en relación a un vacío perfecto o cero absoluto se llama presión absoluta.	Cuando la presión se mide con respecto a la presión atmosférica se llama presión manométrica.	Es la presión que ejerce el aire sobre la tierra.
Es la suma de la presión manométrica y la atmosférica.	Es la diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica. Se aplica tan solo en aquellos casos en los que la presión es superior a la presión atmosférica, pues cuando esta cantidad es negativa se llama presión de vacío.	A nivel del mar la presión atmosférica es 101325 Pa = 1 atm.
	La presión manométrica se mide con un manómetro.	La presión atmosférica se mide con un barómetro

Figura 13: Tabla de diferencia entre Presión absoluta, manométrica y atmosférica.

Ejemplo

Un tanque de almacenamiento de 12 m de profundidad está lleno de agua. La parte superior del tanque está abierto al aire. ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo del tanque? ¿Y la presión manométrica?

Resolución

La presión absoluta está dada por:

$$p = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h = 101325 \text{ Pa} + 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 12\text{m} = 219045 \text{ Pa}$$

La presión manométrica es:

$$p - p_{atm} = 219045 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa} = 117720 \text{ Pa}$$

6. MEDIDORES DE PRESIÓN

El medidor de presión más sencillo es el **manómetro de tubo abierto**.

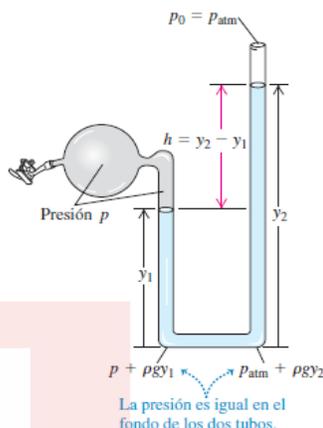


Figura 14: Manómetro de tubo abierto.

El tubo en forma de U contiene un líquido de densidad ρ , con frecuencia mercurio o agua. El extremo izquierdo del tubo se conecta al recipiente donde se medirá la presión p , y el extremo derecho está abierto a la atmósfera, con $p_0 = p_{atm}$. La presión en el fondo del tubo debida al fluido de la columna izquierda es $p + \rho g y_1$, y la debida al fluido de la columna derecha es $p_{atm} + \rho g y_2$. Estas presiones se miden en el mismo punto, así que deben ser iguales:

$$p + \rho g y_1 = p_{atm} + \rho g y_2 \text{ (Ec. 31)}$$

$$p - p_{atm} = \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \text{ (Ec. 32)}$$

p es la presión absoluta, y la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica es la presión manométrica. Así, la presión manométrica es proporcional a la diferencia de altura $h = y_2 - y_1$ de las columnas de líquido. Otro medidor de presión común es el **barómetro de mercurio**.



Figura 15: Barómetro de Mercurio.

Consiste en un largo tubo de vidrio, cerrado por un extremo, que se llena con mercurio y luego se invierte sobre un plato con mercurio. El espacio arriba de la columna sólo contiene vapor de mercurio, cuya presión es insignificante, así que la presión p_0 arriba de la columna es prácticamente cero. Entonces,

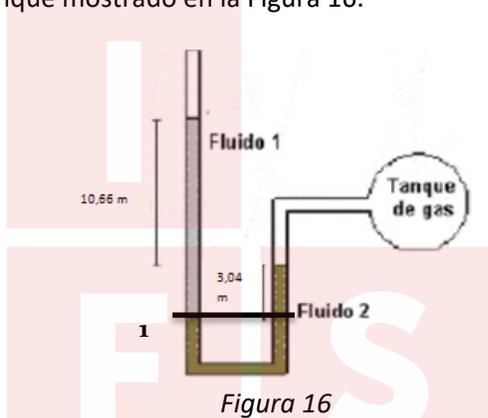
$$p_{atm} = p = 0 + \rho g (y_2 - y_1) = \rho g h \text{ (Ec. 33)}$$

Así, el barómetro de Mercurio indica la presión atmosférica directamente por la altura de la columna de Mercurio.

Las presiones a menudo se describen en términos de la altura de la columna de Mercurio correspondiente, como “pulgadas de mercurio” o “milímetros de mercurio” (que se abrevia mm Hg). Una presión de 1 mm Hg es 1 torr, en honor a Evangelista Torricelli, inventor del barómetro de Mercurio. Sin embargo, estas unidades dependen de la densidad del Mercurio, que varía con la temperatura, y del valor de g , que varía con el lugar, y por ello se prefiere el Pascal como unidad de presión.

Ejemplo

La densidad del fluido 1 es 999,55 kg/m³ y la densidad del fluido 2 es 2191,32 kg/m³, determinar la presión del gas en el tanque mostrado en la Figura 16.



Resolución:

La presión en el fondo del tubo debida al fluido de la columna izquierda es:

$$\rho_{fluido\ 1} \cdot g \cdot 10,66\ m + p_{atm}$$

Y la debida al fluido de la columna derecha es:

$$\rho_{fluido\ 2} \cdot g \cdot 3,04\ m + p$$

Estas presiones se miden en el mismo punto, así que deben ser iguales:

$$\rho_{fluido\ 1} \cdot g \cdot (10,66\ m + 3,04\ m) + p_{atm} = \rho_{fluido\ 2} \cdot g \cdot 3,04\ m + p$$

Despejando p se tiene:

$$p = -\rho_{fluido\ 2} \cdot g \cdot 3,04\ m + \rho_{fluido\ 1} \cdot g \cdot 13,7\ m + p_{atm}$$

$$p = -2191,32 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 3,04\ m + 999,55 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 13,7\ m + 101325\ Pa$$

$$\boxed{p = 170240,77\ Pa = 170,24\ KPa}$$

7. PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

La flotación es un fenómeno muy conocido: un cuerpo sumergido en agua parece pesar menos que en el aire. Si el cuerpo es menos denso que el fluido, entonces flota. El cuerpo humano normalmente flota en el agua, y un globo lleno de Helio flota en el aire.

El principio de Arquímedes establece lo siguiente: **“Si un cuerpo está parcial o totalmente sumergido en un fluido, éste ejerce una fuerza hacia arriba sobre el cuerpo igual al peso del fluido desplazado por el cuerpo”**.

Para demostrar este principio, consideremos una porción arbitraria de fluido en reposo. En la Figura 17 el contorno irregular es la superficie que delimita esta porción de fluido. Las flechas representan las fuerzas que el fluido circundante ejerce sobre la superficie de frontera. Todo el fluido está en equilibrio, así que la suma de todas las componentes y de fuerza sobre esta porción de fluido es cero. Por lo tanto, la suma de todas las componentes y de las fuerzas de superficie debe ser una fuerza hacia arriba de igual magnitud que el peso mg del fluido dentro de la superficie.

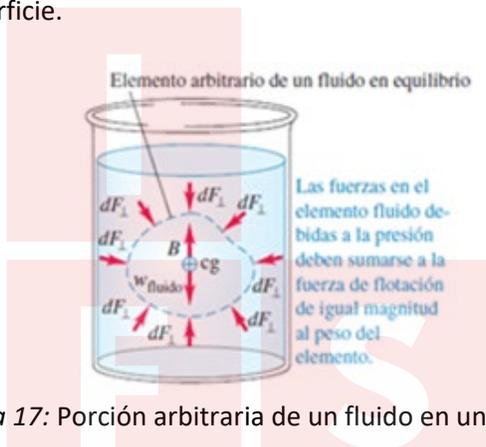


Figura 17: Porción arbitraria de un fluido en un recipiente.

Ahora retiramos el fluido que está dentro de la superficie y lo sustituimos por un cuerpo sólido cuya forma es idéntica.

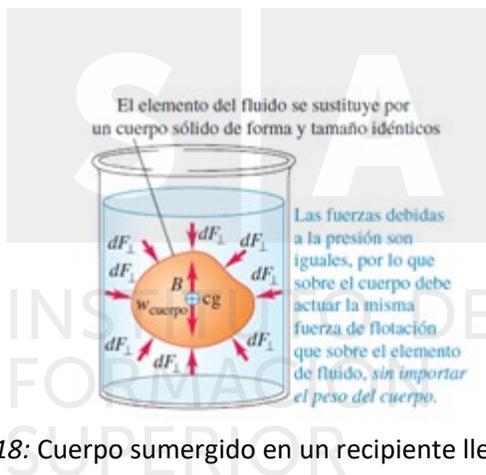


Figura 18: Cuerpo sumergido en un recipiente lleno de fluido.

La presión en cada punto es exactamente la misma que antes, de manera que la fuerza total hacia arriba ejercida por el fluido sobre el cuerpo también es la misma, igual en magnitud al peso mg del fluido que se desplazó para colocar el cuerpo. Llamamos a esta fuerza ascendente la fuerza de flotación que actúa sobre el cuerpo sólido o fuerza de empuje (E).

$$E = \rho_{agua} V_{sumergido} g \quad (Ec. 34)$$

Ejemplo:

Una bola de acero de 5 cm de radio se sumerge en agua, calcular el empuje que sufre.

Resolución:

El empuje está dado por:

$$E = \rho_{agua} V_{sumergido} g = 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (0,05 m)^3 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 5,136N$$

En este tema es importante definir peso aparente por lo tanto a continuación dejamos en claro este concepto y presentamos un ejemplo.

Cuando un cuerpo está totalmente sumergido en un fluido, este experimenta un empuje que tiene sentido opuesto al peso del objeto. La fuerza resultante por lo tanto es inferior al peso que tendría el cuerpo en el aire, a este peso (en el agua) se le denomina **peso aparente**.

Ejemplo:

¿Sabrías decir cuál es el peso aparente de un cubo de 10 cm de lado y 10 kg de masa que se sumerge completamente en un fluido cuya densidad es 1000 kg/m³?

$$P_{aparente} = P_{real} - P_{fluido}$$

$$P_{real} = 10 Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$P_{fluido} = E = 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot (0,1m^3) \cdot 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$P_{aparente} = 10 Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} - 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot (0,1m^3) \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 88,2 N$$

8. TENSIÓN SUPERFICIAL

Un clip puede descansar sobre una superficie de agua aunque su densidad es varias veces mayor que la del agua, esto es un ejemplo de tensión superficial en el que superficie del líquido se comporta como una membrana en tensión. La tensión superficial se debe a que las moléculas del líquido ejercen fuerzas de atracción entre sí. La fuerza neta sobre una molécula dentro del volumen del líquido es cero, pero una molécula en la superficie es atraída hacia el volumen. Por esa razón, el líquido tiende a reducir al mínimo su área superficial. La tensión superficial explica por qué las gotas de lluvia en caída libre son esféricas (no con forma de lágrima): una esfera tiene menor área superficial para un volumen dado que cualquier otra forma.

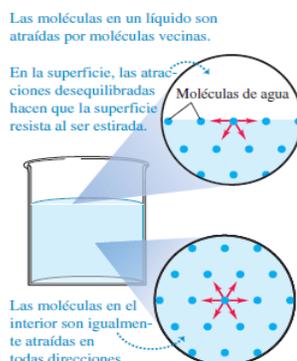


Figura 19: Interacción molecular en la superficie de un fluido y en su interior.

9. LA SUPERFICIE DE LOS LÍQUIDOS

Se llama **menisco** a la curvatura que toma la superficie libre de un líquido encerrado en un recipiente. Un líquido puede mojar o no mojar las paredes del recipiente que lo encierra y en ese sentido tenemos que si el líquido moja las paredes el menisco es cóncavo y si no lo moja, el menisco es convexo. Que un líquido moje o no las paredes del recipiente depende de si las moléculas del líquido y las del recipiente se atraen (agua y vidrio) o repelen (Mercurio y vidrio). Si las moléculas del recipiente y del líquido se atraen, el líquido mojará las paredes del recipiente (menisco cóncavo) y si las moléculas no se atraen entonces las paredes no serán mojadas (menisco convexo).



Figura 20: Izquierda: tubo de ensayo con agua. Derecha: tubo de ensayo con Mercurio.

10. COHESIÓN Y ADHESIÓN

La adhesión y la cohesión son fuerzas de atracción a corta distancia entre las moléculas de la materia. **Cohesión** es la atracción entre moléculas iguales, que tiende a mantener unidos los materiales líquidos y sólidos.

La **Adhesión** se realiza entre moléculas distintas o cuerpos diferentes. A causa de la adhesión, el agua se adhiere a una superficie de vidrio limpia. Las fuerzas de cohesión de las moléculas líquidas hacen que la superficie de un líquido tienda a contraerse y que las cantidades pequeñas de líquido formen gotas esféricas (Tensión superficial).

11. CAPILARIDAD

Es un proceso de los fluidos que depende de su tensión superficial la cual, a su vez depende de la cohesión del líquido y que le confiere la capacidad de subir o bajar por tubo capilar. El efecto se produce de forma más marcada en tubos capilares, es decir, tubos de diámetro muy pequeño.

Cuando un líquido sube por un tubo capilar es debido a que las fuerzas adhesivas son mayores que las fuerzas cohesivas y el menisco tiende a ser cóncavo como en el caso del vidrio y agua. Por otra parte cuando las fuerzas cohesivas son superiores a las adhesivas la tensión superficial hace que el líquido descienda a un nivel inferior y el menisco resulta convexo como en el caso del mercurio.

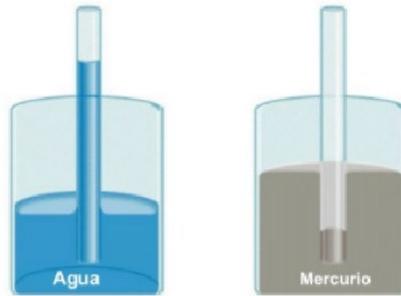


Figura 21: Efecto de capilaridad con agua y Mercurio.



12. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. ¿A qué profundidad del mar hay una presión manométrica de 1.10^5 Pa?
2. Un barril que contiene una capa de aceite (densidad de 600 Kg/m^3) de 0,12 m sobre 0,25 m de agua.
 - a. ¿Qué presión manométrica hay en la interfase aceite-agua?
 - b. ¿Qué presión manométrica hay en el fondo del barril?
3. Los radios de los émbolos de una prensa hidráulica son de 10 cm y 50 cm respectivamente. ¿Qué fuerza ejercerá el émbolo mayor si sobre el menor actúa una de 30 N?
4. Sobre el émbolo de 12 cm^2 de una prensa hidráulica se aplica una fuerza de 40 N, en el otro se obtiene una fuerza de 150 N, ¿qué sección tiene éste émbolo?
5. Con una prensa hidráulica, se quiere levantar un coche de masa 1250 kg. Si la superficie del embolo menor es de 15 cm^2 y la del embolo mayor de 3 m^2 . Calcula la fuerza que debe aplicarse.
6. Para el montaje mostrado en la Figura 22 calcular la lectura H del manómetro.

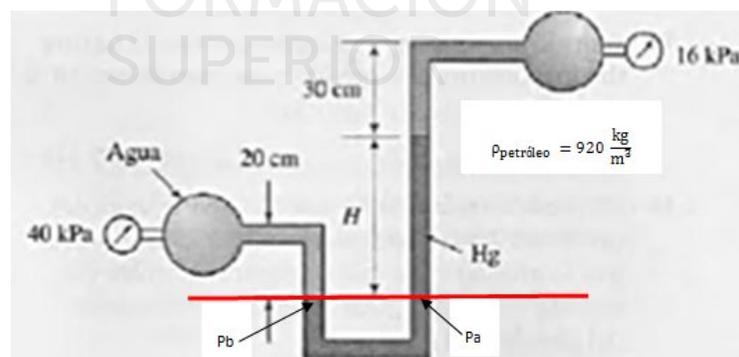
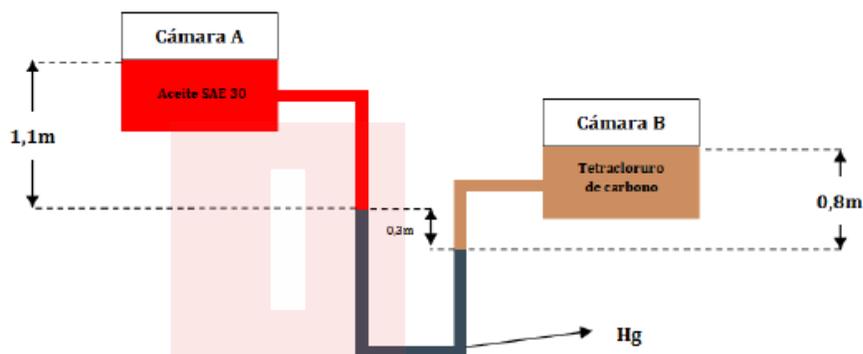


Figura 22

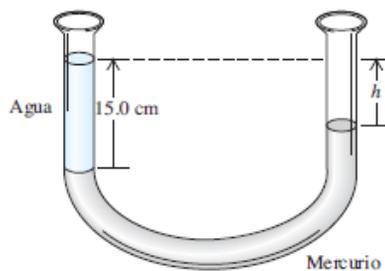
5. Para los dos tanques cerrados que se muestran en la siguiente figura, determinar el valor de la diferencia de presión $P_{\text{cámara A}} - P_{\text{cámara B}}$. Considere los siguientes valores de densidad $\rho_{\text{Hg}} = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{\text{aceite SAE 30}} = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\rho_{\text{Tetracloruro de carbono}} = 1587 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.



6. Al sumergir una piedra de 2.5 Kg en agua, comprobamos que tiene un peso aparente de 20 N. Sabiendo que la gravedad es 9.8 m/s^2 y la densidad del agua 1000 kg/m^3 , calcular:
- El empuje que sufre dicha piedra.
 - El volumen de la piedra.
 - La densidad de la piedra.
7. Un objeto tiene una masa de 10 Kg y ocupa un volumen de 7 litros, tiene un peso aparente de 24 N dentro del líquido. Calcula la densidad del líquido.
8. Un objeto que se halla totalmente sumergido en un recipiente con agua, tiene un volumen de 3 dm^3 y una densidad de 50000 kg/m^3 . Calcula:
- Su peso real.
 - Su peso aparente.
 - El empuje que experimenta

Problemas adicionales:

- Un cilindro alto con área transversal de 12 cm^2 se llenó parcialmente con mercurio hasta una altura de 5 cm. Se vierte lentamente agua sobre el mercurio (los 2 líquidos no se mezclan). ¿Qué volumen de agua deberá añadirse para aumentar el doble la presión manométrica en la base del cilindro?
- Un tubo en forma de U abierto por ambos extremos contienen un poco de Mercurio. Se vierte con cuidado un poco de agua en el brazo izquierdo del tubo hasta que la altura de la columna de agua es de 15 cm.
 - Calcular la presión manométrica en la interfaz agua-mercurio.
 - Calcule la distancia vertical h entre la superficie del mercurio en el brazo derecho del tubo y la superficie del agua en el brazo izquierdo.



3. Se desea calcular la densidad de una pieza metálica, para ello se pesa en el aire dando un peso de 19 N y a continuación se pesa sumergida en agua dando un peso aparente de 17 N. Calcular la densidad del metal.
4. Un cuerpo experimenta un empuje de 25 N si se le sumerge en agua, de 23 N si se le sumerge en aceite y de 20 N si se le sumerge en alcohol. Hallar las densidades del aceite y del alcohol.

13. RESULTADOS

1. $h=9,81$ m
2. a) $P_{\text{interfase}}=705,6$ Pa; b) $P_{\text{fondo}}=3155,6$ Pa.
3. $F_2=750$ N
4. $A_2=45$ cm²
5. $F_1=6,125$ N
6. $H=0,17$ m
7. $P_A-P_B=-37427,18$ Pa
8. a) $E=4,5$ N, b) $V_p=4,6 \cdot 10^{-4}$ m³; c) $\rho_p=5434,78$ Kg/m³
9. $\rho_f=1078,71$ Kg/m³
10. a) $P_{\text{real}}=14700$ N; b) $P_{\text{ap}}=1440,6$ N; c) $E=29,4$ N

Ejercicios adicionales.

1. $H=0,68$ m
 2. a) $P_1=1470$ Pa; b) $h=0,139$ m
 3. $\rho=9500$ Kg/m³
- $\rho_{\text{aceite}}=920,37$ Kg/m³; $\rho_{\text{alcohol}}=800,32$ Kg/m³

UNIDAD III
HIDRODINÁMICA

1. FLUJO DE FLUIDOS

En algunas situaciones el flujo de fluidos se puede representar con modelos idealizados. **Un fluido ideal es incompresible (su densidad no puede cambiar) y no tiene fricción interna (llamada viscosidad)**. Los líquidos son aproximadamente incompresibles en casi todas las situaciones, y también podemos tratar un gas como incompresible si las diferencias de presión de una región a otra no son muy grandes.

Con respecto al flujo solo vamos a considerar situaciones de flujo estable. Se llama línea de flujo al trayecto de una partícula individual en un fluido en movimiento, entonces si el patrón global de flujo no cambia con el tiempo, tenemos un **flujo estable**. Las líneas de flujo que pasan por el borde de un elemento de área imaginario, como el área A que se observa en la imagen forman un tubo llamado tubo de flujo.

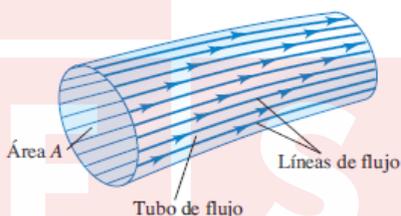


Figura 23: Tubo de flujo.

2. LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD – LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA

La masa de un fluido en movimiento no cambia al fluir, y esto conduce a la llamada **Ecuación de continuidad**. Considere una porción de un tubo de flujo entre dos secciones transversales estacionarias con áreas A_1 y A_2 y los valores de la rapidez del fluido en estas secciones son v_1 y v_2 , respectivamente.

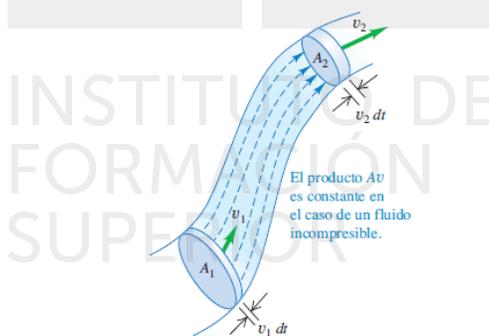


Figura 24: Porción de un tubo de flujo.

Durante un breve intervalo de tiempo dt , el fluido en A_1 se mueve una distancia $v_1 dt$, así que un cilindro de fluido de altura $v_1 dt$ y volumen $dV_1 = A_1 v_1 dt$ fluye hacia el tubo a través de A_1 . Durante ese mismo lapso, un cilindro de volumen $dV_2 = A_2 v_2 dt$ sale del tubo a través de A_2 . Consideremos primero el caso de un fluido incompresible cuya densidad tiene el mismo valor en todos los puntos. La masa dm_1 que fluye al tubo por A_1 en el tiempo dt es $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$. De manera similar, la masa dm_2 que sale por A_2 en el mismo tiempo es $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$. En flujo estable, la masa total en el tubo es constante, así que $dm_1 = dm_2$, entonces:

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt \text{ (Ec. 35)}$$

O bien,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \text{ (Ec. 36)}$$

La Ec. 36 es la **Ecuación de continuidad para fluido incompresible**. El producto $A.v$ es la tasa de flujo de volumen dV/dt , la rapidez con que el volumen cruza una sección del tubo:

$$\frac{dV}{dt} = A v \text{ (Ec. 37)}$$

La Ecuación de continuidad para fluido incompresible indica que la tasa de flujo de volumen tiene el mismo valor en todos los puntos a lo largo de cualquier tubo de flujo.

Podemos generalizar la ecuación de continuidad para el caso en que el fluido no es incompresible entonces, si ρ_1 y ρ_2 son las densidades en las secciones 1 y 2, la **Ecuación de continuidad para fluido compresible** queda:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \text{ (Ec. 38)}$$

3. FLUJO DE VOLUMEN: CAUDAL

El **Caudal** es el volumen de flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo. La magnitud denominada flujo de volumen o caudal se define como sigue:

$$Q = A v = [m^3/s] \text{ (Ec. 39)}$$

En el flujo estable de un fluido incompresible sin fricción interna (sin viscosidad), el caudal es el mismo en todos los puntos de fluido.

Ejemplo:

Por una tubería de 30 cm de diámetro circulan 1800 l/min, reduciendo después el diámetro de tubería a 15 cm. Calcular las velocidades medias en ambas tuberías.

Resolución:

Datos:

$$Q = 1800 \frac{l}{min} = 1800 \frac{l}{min} \cdot \frac{10^{-3} m^3 \cdot min}{60 s \cdot l} = 0,030 \frac{m^3}{s}$$

$$\phi_1 = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$$

$$\phi_2 = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$$



$$Q = A v$$

$$Q = A_1 v_1$$

$$0,030 \frac{m^3}{s} = \frac{\pi(0,3 m)^2}{4} \cdot v_1$$

$$v_1 = \frac{0,030 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi(0,3 m)^2}{4}}$$

$$v_1 = 0,43 \frac{m}{s}$$

$$Q = A_2 v_2$$

$$0,030 \frac{m^3}{s} = \frac{\pi(0,15 m)^2}{4} \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{0,030 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi(0,15 m)^2}{4}}$$

$$v_2 = 1,7 \frac{m}{s}$$

4. ECUACIÓN DE BERNOULLI

La Ecuación de Bernoulli proviene de aplicar a un flujo de fluido la ecuación de balance de energía y relaciona la presión, la rapidez de flujo y la altura para el flujo de un fluido ideal de la siguiente manera:

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (Ec. 40)$$

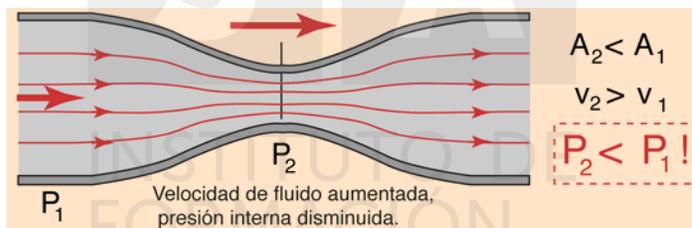


Figura 25: Flujo a través de una tubería de diámetro variable.

La ecuación de Bernoulli establece que la suma de la presión, la energía cinética por unidad de volumen y la energía potencial por unidad de volumen tiene el mismo valor en todos los puntos a lo largo de una línea de flujo, por lo tanto podemos escribir:

$$E_H = p + \rho g y + \frac{1}{2} \rho v^2 = constante \quad (Ec. 41)$$

El comportamiento que normalmente evocamos con el término "efecto de Bernoulli", es el descenso de la presión del líquido en las regiones donde la velocidad del flujo es mayor. Observe que si el fluido no se mueve $v_1 = v_2 = 0$.

El principio de Bernoulli se aplica sólo en ciertas situaciones, ya que la Ecuación de Bernoulli sólo es válida para:

- Un flujo estable.
- Fluido incompresible.
- Sin fricción interna (sin viscosidad).

Ejemplo:

Una tubería, que transporta aceite de densidad relativa 0,877, pasa de 15 cm (0,15 m) de diámetro en la sección E, a 45 cm (0,45 m) en la sección R. La sección E está a 3,6 m por debajo de R y la presión en la sección E es 0,930 kg/cm² (91201,86 Pa). ¿Cuál es la presión a la salida de la tubería (sección R) si el caudal es de 146 l/s y no existe pérdida de flujo?

Resolución:

Calculo la rapidez de flujo a la entrada y a la salida.

$$Q = 146 \frac{l}{s} 10^{-3} \frac{m^3}{l} = 0,146 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = A v$$

$$Q = A_1 v_1$$

$$0,146 \frac{m^3}{s} = \frac{\pi(0,15 m)^2}{4} \cdot v_1$$

$$v_1 = \frac{0,146 \frac{m^3}{s}}{\pi(0,15 m)^2}$$

$$v_1 = 8,26 \frac{m}{s}$$

$$Q = A_2 v_2$$

$$0,146 \frac{m^3}{s} = \frac{\pi(0,45 m)^2}{4} \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{0,146 \frac{m^3}{s}}{\pi(0,45 m)^2}$$

$$v_2 = 0,92 \frac{m}{s}$$

Plantear Ecuación de Bernoulli

$$p_1 + \rho_r \rho_{agua} g y_1 + \frac{1}{2} \rho_r \rho_{agua} v_1^2 = p_2 + \rho_r \rho_{agua} g y_2 + \frac{1}{2} \rho_r \rho_{agua} v_2^2$$

$$91201,86 Pa + 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0m + \frac{1}{2} 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \left(8,26 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$= p_2 + 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 3,6 m + \frac{1}{2} 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \left(0,92 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$p_2 = 91201,86 Pa + \frac{1}{2} 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \left(8,26 \frac{m}{s}\right)^2 - 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 3,6 m - \frac{1}{2} 0,877 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \left(0,92 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$p_2 = 89807,96 Pa$$

4.1 TUBO VENTURI

El Tubo Venturi o Venturímetro es un aparato para medir la velocidad de un fluido. Un fluido de densidad ρ_F pasa a través de una tubería de área transversal A_1 que posee un estrechamiento de área A_2 . Las 2 partes de la conducción están conectadas por un manómetro, un tubo en forma de U, parcialmente lleno de un líquido de densidad ρ_L . Como la velocidad de flujo es mayor en el estrechamiento, la presión en esta sección es menor que en la parte más ancha de la tubería. La diferencia de presión en esta sección es menor que en la parte más ancha de la tubería. La diferencia de presión viene medida por la diferencia Δh de los niveles del líquido en el tubo en U. Expresar la velocidad v_1 en función de la altura medida Δh y las magnitudes conocidas ρ_F , ρ_L y $r=A_1/A_2$

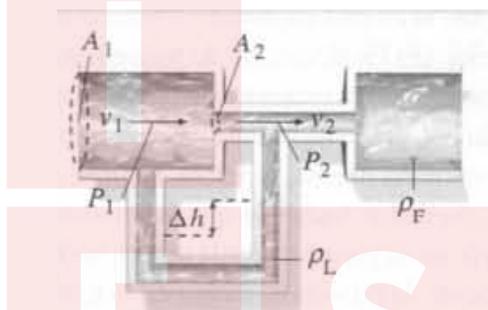


Figura 26: Venturímetro (Tubo Venturi).

Aplicando la Ecuación de Continuidad y la Ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 del Tubo Venturi, la velocidad a la entrada del tubo resulta:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}} \quad (\text{Ec. 43})$$

El efecto Venturi permite explicar cualitativamente tanto la sustentación de las alas de los aviones como las trayectorias curvas de las pelotas lanzadas con efectos. El ala de los aviones se diseña de modo que el aire se mueva más rápidamente sobre la parte superior del ala que bajo la misma, con lo cual la presión del aire es menor encima que debajo del ala.

Ejemplo:

Un tubo de Venturi en su parte más ancha posee un diámetro de 0,1524 m y una presión de $4,2 \times 10^4$ N/m². En el estrechamiento, el diámetro es de 0,0762 m y la presión es de 3×10^4 N/m². ¿Cuál es la magnitud de la velocidad inicial del agua que fluye a través de la tubería?

Resolución:

Analicemos primeramente nuestros datos:

$$d_1 = 0,1524 \text{ m}$$

$$d_2 = 0,0762 \text{ m}$$

$$p_1 = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 3.10^4 Pa$$

$$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

Esta es la fórmula que usaremos:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot (A_1^2 - A_2^2)}}$$

$$v_1 = \frac{\pi \cdot (0,0762 m)^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (4,2 \cdot 10^4 Pa - 3 \cdot 10^4 Pa)}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot ((\pi \cdot (0,1524 m)^2 / 4)^2 - (\pi \cdot (0,0762 m)^2 / 4)^2)}$$

$$v_1 = 1,2624 m/s$$

5. MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO

La Figura 27 ilustra patrones de flujo de fluidos de izquierda a derecha alrededor de varios obstáculos. Las fotografías se tomaron inyectando un tinte en el agua que fluye entre dos placas de vidrio cercanas. Estos patrones son representativos del flujo **laminar**, en el que **capas adyacentes de fluido se deslizan suavemente una sobre otra, y el flujo es estable.**

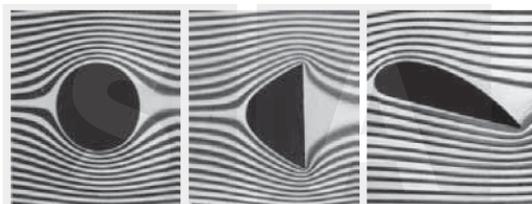


Figura 27: Patrones de Flujo.

Si la rapidez de un fluido que fluye excede cierto valor crítico, el flujo deja de ser laminar. El patrón de flujo se vuelve muy irregular y complejo, y cambia continuamente con el tiempo; no hay patrón de estado estable. Este **flujo irregular y caótico se denomina turbulencia**. Las irregularidades en el patrón de flujo pueden deberse a asperezas en la pared del tubo, variaciones en la densidad del fluido y muchos otros factores. La Ecuación de Bernoulli no es aplicable a regiones de turbulencia, pues el flujo no es estable.

En la Figura 28 se muestra en la imagen que el flujo de agua de un grifo es laminar cuando sale a baja rapidez (izquierda) y que es turbulento cuando tiene rapidez suficientemente alta (derecha).



Figura 28: Izquierda: Flujo laminar. Derecha: Flujo Turbulento.

5.1. NUMERO DE REYNOLDS (Re)

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional cuyo valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

El número de Reynolds depende de la velocidad del fluido, del diámetro de tubería y de la viscosidad cinemática o en su defecto densidad y viscosidad dinámica.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (\text{Ec. 44})$$

Dónde:

ρ : Densidad.

D : Diámetro interno de la tubería.

μ : viscosidad

v : velocidad del fluido.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

En una tubería circular se considera:

- $Re < 2300$ El flujo sigue un comportamiento laminar.
- $2300 < Re < 4000$ Zona de transición de laminar a turbulento.
- $Re > 4000$ El fluido es turbulento.

6. VISCOSIDAD

La viscosidad es fricción interna en un fluido. Las fuerzas viscosas se oponen al movimiento de una porción de un fluido en relación con otra. Los fluidos que fluyen con facilidad, como el agua y la gasolina, tienen menor viscosidad que los líquidos “esposos” como la miel o el aceite para motor. Las viscosidades de todos los fluidos dependen mucho de la temperatura, aumentan para los gases y disminuyen para los líquidos al subir la temperatura. Un fluido viscoso tiende a adherirse a una superficie sólida que está en contacto con ella. Siempre hay una capa de frontera delgada de fluido cerca de la superficie, en la que el fluido está casi en reposo respecto a ella. Pensemos primero en un fluido con cero viscosidad para poder aplicar la Ecuación de Bernoulli. Si los dos extremos de un tubo cilíndrico largo están a la misma altura ($y_1 = y_2$) y la rapidez de flujo es la misma en ambos extremos ($v_1 = v_2$), la ecuación de Bernoulli nos indica que la presión es la misma en ambos extremos. Sin embargo, este resultado simplemente no es válido si tomamos en cuenta la viscosidad. Para ver por qué, consideremos el flujo laminar de un fluido viscoso en un tubo cilíndrico largo. Debido a la viscosidad, la rapidez es cero en las paredes del tubo y máxima en el centro del tubo. Las fuerzas viscosas entre las capas de fluido se oponen al deslizamiento por lo tanto si queremos mantener el flujo, deberemos aplicar una mayor presión atrás del flujo que delante de él.

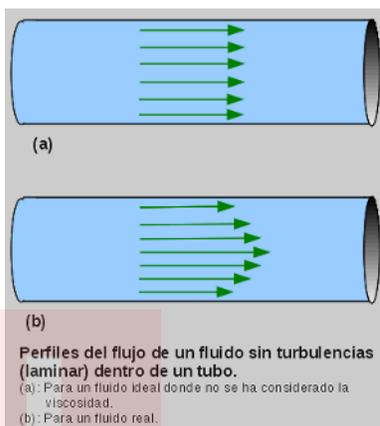


Figura 29: Perfiles de flujo de un fluido ideal y una real.

Newton fue quien estudió el efecto de la viscosidad, y estableció que la fuerza de por unidad de área es proporcional a la disminución de la velocidad V con la distancia Y . La constante de proporcionalidad μ se denomina **viscosidad del fluido**.

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (\text{Ec. 45})$$

7. FLUJOS VISCOSOS

Al hablar del flujo de fluidos supusimos que el fluido no tenía fricción interna y que el flujo era laminar. Aunque en muchos casos esos supuestos son válidos, en muchas situaciones físicas importantes los efectos de la viscosidad (fricción interna) y la turbulencia (flujo no laminar) son extremadamente importantes. Se dice que el flujo es viscoso cuando aparecen en él importantes fuerzas de rozamiento que no se pueden despreciar. Como consecuencia de estas fuerzas de rozamiento aparecen esfuerzos cortantes² entre las capas del fluido vecinas cuando están moviéndose a velocidades distintas y hay una disipación de energía mecánica³.

Cuando se consideran los efectos de la viscosidad la ecuación de la Bernoulli antes presentada, no puede ser utilizada, ya que se presentan pérdidas de energía. Estas pérdidas se llaman perdidas primarias.

No solo la viscosidad produce una variación en la energía en un flujo de fluido, la presencia de codos, bombas, turbinas, etc, varían la energía, las que se llaman pérdidas secundarias. Por lo tanto, la Ecuación de Balance de Energía queda:

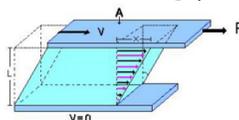
$$E_{H1} - \Delta E_{\mu 1-2} - \Delta E_{Loc} + E_{Bomba} - E_{Turбина} = E_{H2} \quad (\text{Ec. 46})$$

Siendo

$\Delta E_{\mu 1-2}$: *Perdidas de carga debido a la viscosidad.*

ΔE_{Loc} : *Pérdidas localizadas (ejemplo: codos).*

² La fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido. Matemáticamente, el esfuerzo cortante se define como: $\tau = F/A = [N/m^2]$.



³ Disipación de la energía mecánica: si existe rozamiento en una transformación de energía, la energía mecánica ($E_{mecánica} = E_{cinética} + E_{potencial}$) no se conserva por lo que se tiene $E_{mo} = E_{mf} + T_{fr}$.

E_{Bomba} : Energía proporcionada por la bomba.

$E_{Turbina}$: Energía otorgada a la turbina.

Siendo,

$$\Delta E_{\mu 1-2} = \frac{8.l.\mu.q}{\pi.R^4} \text{ (Ec. 47)}$$

La Ec. 47 se conoce con el nombre de Ley de Poiseuille. Esta ley se aplica solo al flujo laminar (no turbulento) de un fluido de viscosidad constante que es independiente de la velocidad del fluido.

8. PERDIDAS LOCALIZADAS

Además de las pérdidas de carga continuas o por rozamiento, vimos que en las conducciones se produce otro tipo de pérdidas debido a fenómenos de turbulencia que se originan al paso de líquidos por puntos singulares de las tuberías, como cambios de dirección, codos, juntas, derivaciones, etc, y que se conocen como pérdidas de carga accidentales, localizadas o singulares. Para calcular dichas pérdidas se utilizan las siguientes ecuaciones:

- De depósito a tubería
 - Conexión a ras de la pared: $h = 0,5 \cdot \frac{v^2}{2.g}$
 - Tubería entrante: $h = 1 \cdot \frac{v^2}{2.g}$
 - Conexión abocinada: $h = 0,05 \cdot \frac{v^2}{2.g}$
- De tubería a depósito (pérdida a la salida): $h = 1 \cdot \frac{v^2}{2.g}$
- Ensanchamiento brusco: $h = \frac{(v_i^2 - v_f^2)}{2.g}$
- Codos, válvulas: $h = K \cdot \frac{v^2}{2.g}$

Algunos valores corrientes de K son:

- 45° codos..... 0,35 a 0,45
- 90° codos..... 0,5 a 0,75
- Tes 1,5 a 2
- Válvulas de compuerta (abierta)..... aprox. 2
- Válvula de control (abierta)..... aprox. 3

9. FLUJOS COMPRESIBLES

Aquellos flujos donde las variaciones en densidad son insignificantes se denominan incompresibles; **cuando las variaciones en densidad dentro de un flujo no se pueden despreciar, se llaman compresibles**. Si se consideran los dos estados de la materia incluidos en la definición de fluido, líquido y gas, se podría caer en el error de generalizar diciendo que todos los flujos líquidos son flujos incompresibles y que todos los flujos de gases son flujos compresibles. La primera parte de esta generalización es correcta para la mayor parte de los casos prácticos, es decir, casi todos los flujos líquidos son esencialmente incompresibles. Por otra parte, los flujos de gases se pueden también considerar como incompresibles si las velocidades son pequeñas respecto a la velocidad del sonido en el fluido. La razón de la velocidad del flujo, v , a la velocidad del sonido, c , en el medio fluido recibe el nombre de número de Mach, M , es decir, $M=v/c$.

Entonces, los gases que fluyen con $M < 0.3$ se pueden considerar como incompresibles. Las variaciones de densidad debidas al cambio de presión pueden ser despreciadas. En realidad lo que sucede es que el gas es compresible pero la densidad puede ser considerada constante.

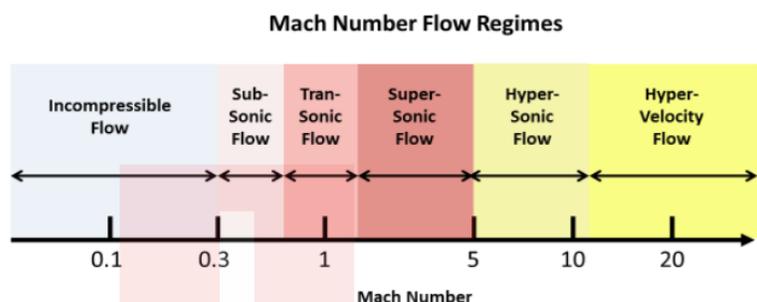


Figura 30: Diferentes régimen de flujo para el número de March.



10. EJERCICIOS PROPUESTOS

1. ¿Cuál es el caudal de una corriente que sale por una canilla de 0,5 cm de radio si la velocidad de salida es de 30 m/s?
2. Si en la canilla del problema anterior salen 50 l/min, ¿cuál es la velocidad de salida?
11. Una corriente estacionaria circula por una tubería que sufre un ensanchamiento. Si las secciones son de 1,4 cm² y 4,2 cm² respectivamente, ¿cuál es la velocidad de la segunda sección si en la primera es de 6 m/s?
12. En cierto punto de una tubería horizontal, la rapidez del agua es de 2,5 m/s y la presión manométrica es de 1,8.10⁴ Pa. Calcule la presión manométrica en un segundo punto donde el área transversal es el doble que en el primer punto.
13. El caudal de una corriente estacionaria es de 600 l/min. Las secciones de la tubería son de 5 cm² y 12 cm². Calcule la velocidad de cada sección.
14. Por un tubo ubicado en forma horizontal circula agua con un caudal de 10 m³/s. Inicialmente la superficie del tubo es 2 m² y la sección va disminuyendo hasta alcanzar un área de 1m².
 - a) Cuál es la velocidad del agua al ingresar al tubo.
 - b) Cuál es la diferencia de presión entre las dos secciones.
 - c) En qué sección del tubo es mayor la presión.

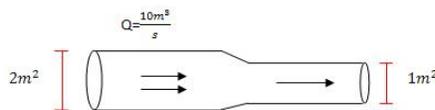
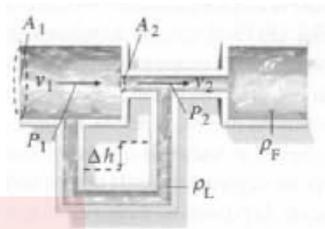


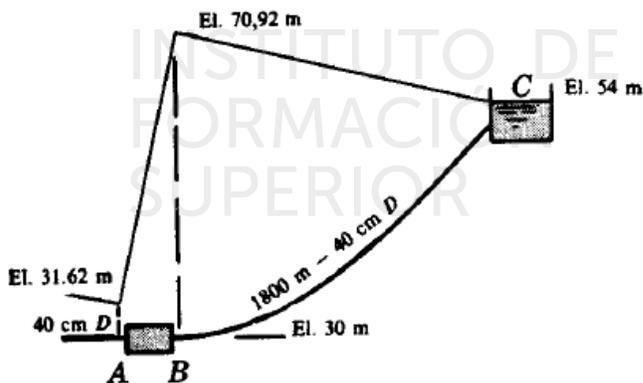
Figura 31

15. A través de un venturímetro fluye agua a lo largo de una tubería de diámetro de 9,5 cm que en el estrechamiento se reduce a 5,6 cm. El manómetro en U está parcialmente lleno de Mercurio.

Determinar la velocidad de flujo del agua en la tubería de 9,5 cm de diámetro si la diferencia entre los niveles de Mercurio del tubo en U es de 2,4 cm



16. Glicerina a 25°C fluye por un conducto circular a 150 mm de diámetro con una velocidad promedio de 3,6 m/s. Determine si fluye en régimen laminar o turbulento. $\rho = 1258 \text{ Kg/m}^3$; $\mu = 0,96 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
17. Determinar la velocidad crítica para:
 - a. Un fuel-oil medio que fluye a 15°C a través de una tubería de 15 cm de diámetro (viscosidad cinemática a 15°C es $4,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).
 - b. El agua a 15° C que circula por una tubería de 15 cm (viscosidad cinemática a 15°C es $1,13 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).
18. Un caudal de 44 l/s de un aceite de viscosidad absoluta $0,0103 \text{ kg/m}^2$ y de densidad relativa 0,85 está circulando por una tubería de 30 cm de diámetro y 3000 m de longitud. ¿Cuál es la pérdida de carga en la tubería?
19. Un fuel-oil medio a 15°C se bombea al depósito C a través de 1800 m de una tubería nueva de acero roblonado de 40 cm de diámetro interior. La presión en A es de $0,14 \text{ kg/cm}^2$, cuando el caudal es de 197 l/s.
 - a. ¿qué potencia debe suministrar la bomba a la corriente de fuel oil?
 - b. ¿Qué presión debe mantenerse en B?



Problemas Adicionales

1. En un punto de la tubería, la rapidez del agua es de 3 m/s y la presión manométrica es de $5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. Calcule la presión manométrica en otro punto de la tubería, 11 m más abajo, si el diámetro del tubo ahí es el doble que en el primer punto.

2. Se descarga agua de un tubo horizontal cilíndrico a razón de $465 \text{ cm}^3/\text{s}$. En el punto donde el radio es de $2,05 \text{ cm}$, la presión absoluta es de $1,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. ¿Qué radio tiene una constricción del tubo donde la presión reduce a $1,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$?
3. Un tubo Venturi tiene un área transversal de 40 cm^2 en la parte más ancha y de 10 cm^2 en la reducción. Fluye agua a través de tubo, cuya descarga es de $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (6 l/s). calcule:
 - a. La rapidez del flujo en las porciones ancha y angosta.
 - b. La diferencia de presión entre esas porciones.
 - c. La diferencia de altura entre las columnas de Mercurio en el tubo en forma de U.
4. Para un flujo en régimen laminar, ¿qué diámetro de tubería será necesario para transportar 350 l/min de un fuel-oil medio a $4,5^\circ\text{C}$ ($\nu=7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).
5. Un aceite lubricante medio, de densidad relativa $0,86$, es bombeado a través de una tubería horizontal de 5 cm de diámetro y 300 m de longitud. El caudal bombeado es de $1,2 \text{ l/s}$. si la caída de presión es de $2,1 \text{ kg/cm}^2$, ¿cuál es la viscosidad absoluta del aceite?

11. RESULTADOS

1. $Q=2,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
2. $V=10,61 \text{ m/s}$
3. $V_2=2 \text{ m/s}$
4. $V_2=1,25 \text{ m/s}$; $P_2=20343,75 \text{ Pa}$
5. $V_1=20 \text{ m/s}$; $V_2=8,33 \text{ m/s}$
6. a) $V_1=5 \text{ m/s}$; $V_2=10 \text{ m/s}$; b) $P_2-P_1=-37500 \text{ Pa}$; c) Hay mayor presión en la sección 1
7. $v_1=0,254 \text{ m/s}$
8. $Re=707,625$
9. a) $V_c=0,0678 \text{ m/s}$; b) $V_c=0,01733 \text{ m/s}$
10. $\Delta E_{\mu 1 \rightarrow 2}=6838,89 \text{ Pa}$
11. $E_{\text{bomba}}=188799,25 \text{ Pa}$; $H_{\text{bomba}}=22,38 \text{ m}$; $PH=371,93 \text{ Hp}$

Ejercicios adicionales.

1. $P_2=162018,75 \text{ Pa}$
2. $R_2=0,33 \text{ m}$
3. a) $V_1=1,5 \text{ m/s}$; $V_2=6 \text{ m/s}$; b) $P_1-P_2=16875 \text{ Pa}$; c) $\Delta h=1,72 \text{ m}$
4. $D=0,46 \text{ m}$
5. $M=5,6161 \text{ cP}$

UNIDAD IV

ENERGÍA INTERNA, TEMPERATURA Y CALOR

1. TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO

El concepto de temperatura se origina en las ideas cualitativas de “caliente” y “frio” basadas en el sentido del tacto. Muchas propiedades de la materia que podemos medir dependen de la temperatura. La longitud de una barra de metal, la presión de vapor en una caldera, la capacidad de un alambre para conducir corriente eléctrica y el color de un objeto brillante muy caliente: todo esto depende de la temperatura. La temperatura, además, se relaciona con la energía cinética de las moléculas de un material. La definición que desarrollaremos es una definición macroscópica de la temperatura.

Para usar la temperatura como medida de calidez o de frialdad, necesitamos construir una escala de temperatura. Para ello, podemos usar cualquier propiedad medible de un sistema que varíe con su “calidez” o “frialdad”. La Figura 32 muestra un sistema común para medir la temperatura. Cuando el sistema se calienta, el líquido colorido (usualmente Mercurio o Etanol) se expande y sube por el tubo, y el valor de L aumenta.

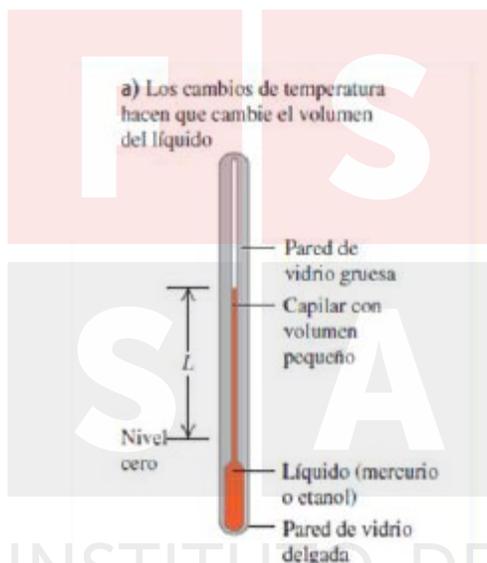


Figura 32: Sistema cuya temperatura se especifica con el valor de la longitud L .

Otro sistema sencillo es una cantidad de gas en un recipiente de volumen constante. La presión p medida por el manómetro aumenta o disminuye, al calentarse o enfriarse el gas.

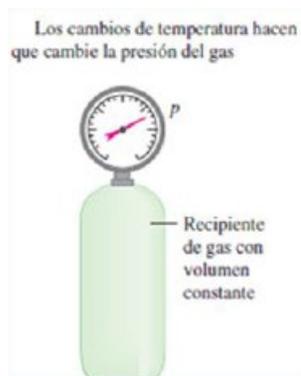


Figura 33: Sistema cuya temperatura está dada por el valor de la presión p .

Un tercer ejemplo es la resistencia eléctrica R de un alambre conductor, que también varía al calentarse o enfriarse el alambre. Todas estas propiedades nos dan un número (L , ρ , R) que varía con la calidez y la frialdad, así que pueden usarse para hacer un **termómetro**.

Para medir la temperatura de un cuerpo, colocamos el termómetro en contacto con él. Si queremos conocer la temperatura de una taza con café, introducimos el termómetro en él; al interactuar los dos, el termómetro se calienta y el café se enfría un poco. Una vez que el termómetro se estabiliza, leemos la temperatura. El sistema está en una condición de equilibrio, en la cual la interacción entre el termómetro y el café ya no causa un cambio en el sistema. Llamamos **equilibrio térmico** a dicho estado.

Si dos sistemas están separados por un material **aislante**, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, se afectan mutuamente con más lentitud. Un aislante ideal es un material que no permite la interacción entre los dos sistemas; evita que alcancen el equilibrio térmico si no estaban en él inicialmente. Los aislantes ideales son sólo eso: una idealización; los aislantes reales, como los de las hieleras, no son ideales, así que finalmente su contenido se calentará.

1.1. Ley cero de la termodinámica

Considerando tres sistemas, A, B y C, que inicialmente no están en equilibrio térmico, rodeamos los sistemas con una caja aislante ideal para que sólo puedan interactuar entre sí. Separamos A y B con una pared aislante ideal (la barra verde en la imagen a) de la Figura 34); pero dejamos que C interactúe tanto con A como con B. Esta interacción se indica en la figura con una barra amarilla que representa un **conductor** térmico, es decir, un material que permite la interacción térmica. Esperamos hasta que se establece el equilibrio térmico; entonces, A y B están en equilibrio térmico con C pero, ¿están en equilibrio térmico entre sí? Para averiguarlo, separamos el sistema C de los sistemas A y B con una pared aislante ideal (Imagen b) de la Figura 34) y sustituimos la pared aislante entre A y B por una conductora que permite que A y B interactúen. ¿Qué sucede? Los experimentos indican que nada sucede; no hay cambios adicionales en A ni en B. Entonces concluimos que: **“Si inicialmente C está en equilibrio térmico con A y con B, entonces A y B también están en equilibrio térmico entre sí. Este resultado se llama ley cero de la termodinámica”**.

Suponga ahora que el sistema C es un termómetro, como el sistema de tubo y líquido de que vimos anteriormente. En la Imagen a) de la Figura 34, el termómetro C está en contacto con A y con B. Cuando se encuentran en equilibrio térmico, la lectura del termómetro se estabiliza, el termómetro mide la temperatura tanto de A como de B; por lo tanto, ambos tienen la misma temperatura. Los experimentos indican que el equilibrio térmico no se afecta si se agregan o quitan aislantes, así que la lectura de C no cambiaría si sólo estuviera en contacto con A o sólo con B. Concluimos que: **“Dos sistemas están en equilibrio térmico si y sólo si tienen la misma temperatura”**. En esto radica la utilidad de los termómetros; un termómetro realmente mide su propia temperatura, pero cuando está en equilibrio térmico con otro cuerpo, las temperaturas deben ser iguales. Si difieren las temperaturas de dos sistemas, no pueden estar en equilibrio térmico.

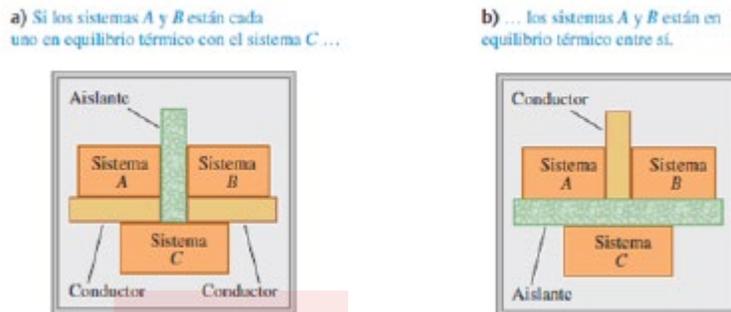


Figura 34

2. TERMÓMETROS Y ESCALAS DE TEMPERATURA

Para que el dispositivo de líquido en un tubo sea un termómetro útil, necesitamos marcar una escala numerada en la pared del tubo. Esos números son arbitrarios, e históricamente se han usado muchos esquemas diferentes. Suponga que marcamos con “0” el nivel del líquido del termómetro a la temperatura de congelación del agua pura, y con “100” el nivel a la temperatura de ebullición, y luego dividimos la distancia entre ambos puntos en cien intervalos iguales llamados grados. El resultado es la **escala de temperatura Celsius** (antes llamada centígrada). La temperatura en la escala Celsius para un estado más frío que el agua al momento de congelarse es un número negativo. La escala Celsius se usa, tanto en la vida cotidiana como en la ciencia y la industria, en casi todo el mundo.

Otro tipo de termómetro común usa una **tira bimetalica**, que se fabrica pegando tiras de dos metales distintos. Al aumentar la temperatura de la tira compuesta, un metal se expande más que el otro y la tira se dobla. La tira usualmente se moldea en espiral, con el extremo exterior anclado a la caja y el interior unido a un puntero. El puntero gira en respuesta a cambios de temperatura.



Figura 35: Termómetro con tira bimetalica.

En un **termómetro de resistencia**, se mide el cambio en la resistencia eléctrica de una bobina de alambre fino, un cilindro de carbono o un cristal de germanio. Puesto que la resistencia puede medirse con gran precisión, los termómetros de resistencia suelen ser más precisos que los de otro tipo.

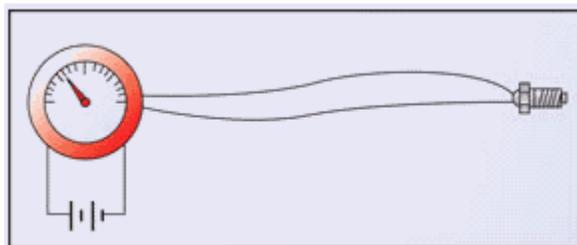


Figura 36: Termómetro de Resistencia.

Algunos termómetros no necesitan estar en contacto físico con el objeto cuya temperatura están midiendo, por ejemplo, el termómetro de oído, que usa un dispositivo llamado termopila para medir la cantidad de radiación infrarroja emitida por el tímpano, lo cual indica la temperatura.

En la **escala de temperatura Fahrenheit** la temperatura de congelación del agua es de 32 °F (32 grados Fahrenheit) y la de ebullición es de 212 °F, ambas a presión atmosférica estándar. Para convertir temperaturas de Celsius a Fahrenheit se utiliza la Ec. 48.

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ \text{ (Ec. 48)}$$

Para convertir de Fahrenheit a Celsius, despejamos T_C de la Ec. 48 y se obtiene la Ec. 49:

$$T_C = \frac{5}{9} \cdot (T_F - 32^\circ) \text{ (Ec. 49)}$$

3. TERMÓMETROS DE GAS Y LA ESCALA KELVIN

Cuando calibramos dos termómetros, como un sistema de líquido en tubo o un termómetro de resistencia, de modo que coincidan en 0 °C y 100 °C, podrían no coincidir exactamente a temperaturas intermedias. Cualquier escala de temperatura definida de este modo siempre depende un tanto de las propiedades específicas del material empleado. Idealmente, nos gustaría definir una escala de temperatura que no dependa de las propiedades de un material específico. Veremos un termómetro que se acerca al ideal, el termómetro de gas. **El principio de un termómetro de gas muestra que la presión de un gas a volumen constante aumenta con la temperatura.** Una cantidad de gas se coloca en un recipiente de volumen constante (Imagen a) de la Figura 37) y se mide su presión con un dispositivo. Para calibrar dicho termómetro, medimos la presión a dos temperaturas, digamos 0 °C y 100 °C, graficamos esos puntos y trazamos una recta entre ellos. Así, podemos leer de la gráfica la temperatura correspondiente a cualquier otra presión. La Imagen b) de la Figura 37 muestra los resultados de tres experimentos de este tipo, utilizando en cada caso distintas clase y cantidad de gas. Si extrapolamos la línea, veremos que hay una temperatura hipotética, -273.15 °C, en la que la presión absoluta del gas sería cero. Podríamos esperar que tal temperatura fuera diferente para diferentes gases, pero resulta ser la misma para muchos gases distintos. Usamos esta temperatura extrapolada a presión cero como base para una escala de temperatura, con su cero en esta temperatura: la **escala de temperatura Kelvin**, así llamada por el físico inglés Lord Kelvin (1824-1907). Las unidades tienen el mismo tamaño que las de la escala Celsius, pero el cero se desplaza de modo que 0 K = -273.15 °C y 273.15 K = 0 °C; es decir:

$$T_K = T_C + 273,15 \text{ (Ec. 50)}$$

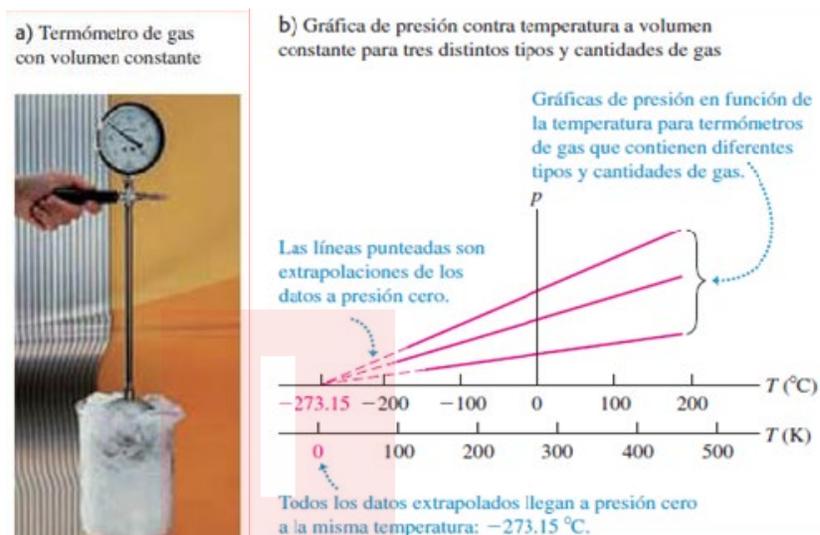


Figura 37: Termómetro de gas con volumen constante y gráficas de Presión en función de la Temperatura

Ejemplo:

Imagine que coloca un trozo de hielo en la boca. En algún momento, toda el agua pasa de hielo a $T_1 = 32^\circ F$ a la temperatura corporal $T_2 = 98.60^\circ F$. Expresé estas temperaturas como $^\circ C$ y K , y calcule $\Delta T = T_2 - T_1$ en ambos casos.

Resolución:

Primero convertiremos las temperaturas Fahrenheit a Celsius:

$$T_1 = \frac{5}{9} \cdot (32^\circ F - 32^\circ) = 0^\circ C$$

$$T_2 = \frac{5}{9} \cdot (98,6^\circ F - 32^\circ) = 37^\circ C$$

Ahora obtenemos las temperaturas en Kelvin:

$$T_1 = 0^\circ C + 273,15 = 273,15 K$$

$$T_2 = 37^\circ C + 273,15 = 310,15 K$$

La diferencia de temperatura es:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 37^\circ C - 0^\circ C = 37^\circ C$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 310,15 K - 273,15 K = 37 K$$

Las escalas Celsius y Kelvin tienen diferentes ceros pero grados del mismo tamaño. Por lo tanto, cualquier diferencia de temperatura es la misma en las escalas Celsius y Kelvin, pero no en la escala Fahrenheit.

3.1. La escala Kelvin y temperatura absoluta

La escala Celsius tiene dos puntos fijos, los puntos de congelación y ebullición normales del agua. No obstante, podemos definir la escala Kelvin usando un termómetro de gas con sólo una temperatura de

referencia. Definimos el cociente de cualesquiera dos temperaturas T1 y T2 en la escala Kelvin, como el cociente de las presiones correspondientes de termómetro de gas p1 y p2:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (\text{Ec. 51})$$

La presión p es directamente proporcional a la escala de temperatura Kelvin. Para completar la definición de T, sólo necesitamos especificar la temperatura Kelvin de un solo estado específico. Por razones de precisión y de capacidad de reproducción, el estado elegido es el punto triple del agua. Ésta es una combinación única de temperatura y presión en la que pueden coexistir agua sólida (hielo), agua líquida y vapor de agua. Esto ocurre a una temperatura de 0.01 °C con una presión de vapor de agua de 610 Pa (cerca de 0.006 atm). La temperatura del punto triple del agua es, por definición, $T_{\text{triple}} = 273.16 \text{ K}$, que corresponden a 0.01 °C. Por la Ec. 46., si p_{triple} es la presión en un termómetro de gas a la temperatura T_{triple} y p es la presión a otra temperatura T, entonces T está dada en la escala Kelvin por:

$$T = T_{\text{triple}} \cdot \frac{p}{p_{\text{triple}}} = 273,15 \text{ K} \cdot \frac{p}{p_{\text{triple}}} \quad (\text{Ec. 52})$$

Las relaciones entre las tres escalas de temperatura que hemos visto se muestran gráficamente en la Figura 38.

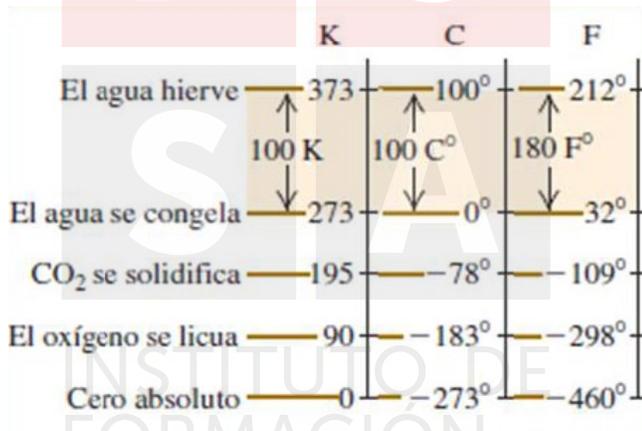


Figura 38: Relación entre las tres escalas.

La escala Kelvin se denomina **escala de temperatura absoluta** y su cero [$T = 0 \text{ K} = -273.15 \text{ °C}$, la temperatura en que $p = 0$] se llama **cero absoluto**.

4. EXPANSIÓN O DILATACIÓN TÉRMICA

Casi todos los materiales se expanden al aumentar su temperatura. El aumento en la temperatura hace que el líquido se expanda en los termómetros de líquido en un tubo y que las tiras bimetalicas se doblen como vimos antes. Una botella totalmente llena de agua y tapada se revienta al calentarse; pero podemos aflojar la tapa metálica de un frasco vertiendo agua caliente sobre ella. Éstos son ejemplos de expansión térmica.

4.1. Expansión lineal

Considere una varilla de material de longitud L_0 a una temperatura inicial T_0 . Si la temperatura cambia en ΔT , la longitud cambia en ΔL . Se observa experimentalmente que si ΔT no es muy grande (digamos, menos de $100\text{ }^\circ\text{C}$), ΔL es directamente proporcional a ΔT .

Para cambios de temperatura moderados,
 ΔL es directamente proporcional a ΔT .

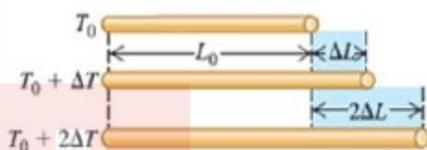


Figura 39: Expansión térmica en una barra.

Si dos varillas del mismo material tienen el mismo cambio de temperatura, pero una es dos veces más larga que la otra, su cambio de longitud también será del doble. Por lo tanto, ΔL también debe ser proporcional a L_0 .

ΔL también es directamente proporcional a L_0

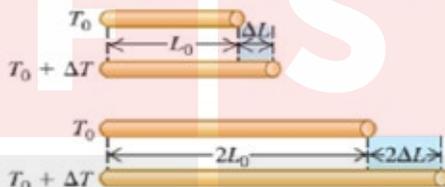


Figura 40: Expansión térmica en 2 barras del mismo material y distinta longitud.

Si introducimos una constante de proporcionalidad α (diferente para cada material), expresaremos estas relaciones en una ecuación:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \text{ (Ec. 53)}$$

Si un cuerpo tiene longitud L_0 a la temperatura T_0 , su longitud L a la temperatura $T = T_0 + \Delta T$ es:

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 + \alpha L_0 \Delta T = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \text{ (Ec. 54)}$$

La constante α , que describe las propiedades de expansión térmica de un material dado, se denomina **coeficiente de expansión lineal**. Las unidades de α son K^{-1} , o bien, $(^\circ\text{C})^{-1}$ (Recuerde que un intervalo de temperatura es igual en las escalas Kelvin y Celsius).

Material	α [K^{-1} o $(^\circ\text{C})^{-1}$]
Aluminio	2.4×10^{-5}
Latón	2.0×10^{-5}
Cobre	1.7×10^{-5}
Vidrio	$0.4\text{--}0.9 \times 10^{-5}$
Invar (aleación níquel-hierro)	0.09×10^{-5}
Cuarzo (fundido)	0.04×10^{-5}
Acero	1.2×10^{-5}

Figura 41: Constante de proporcionalidad α de diferentes materiales.

4.2. Expansión de volumen

Un aumento de temperatura suele aumentar el volumen de materiales tanto líquidos como sólidos. Al igual que en la expansión lineal, se ha visto experimentalmente que, si el cambio de temperatura ΔT no es muy grande (menos de 100 °C), el aumento de volumen ΔV es aproximadamente proporcional al cambio de temperatura ΔT y al volumen inicial V_0 :

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \text{ (Ec. 55)}$$

La constante β caracteriza las propiedades de expansión de volumen de un material dado; se llama **coeficiente de expansión de volumen**. Las unidades de β son K^{-1} , o bien $(^\circ C)^{-1}$. Al igual que en la expansión lineal, β varía un poco con la temperatura, y la Ec. 51 de expansión térmica de volumen es una relación aproximada válida sólo para cambios de temperatura pequeños. En muchas sustancias, β disminuye a bajas temperaturas.

Para **materiales sólidos**, hay una relación sencilla entre el coeficiente de expansión de volumen β y el coeficiente de expansión lineal α : $\beta=3\alpha$.

Sólidos	$\beta [K^{-1} \text{ o } (^\circ C)^{-1}]$	Líquido	$\beta [K^{-1} \text{ o } (^\circ C)^{-1}]$
Aluminio	7.2×10^{-5}	Etanol	75×10^{-5}
Latón	6.0×10^{-5}	Disulfuro de carbono	115×10^{-5}
Cobre	5.1×10^{-5}	Glicerina	49×10^{-5}
Vidrio	$1.2-2.7 \times 10^{-5}$	Mercurio	18×10^{-5}
Invar	0.27×10^{-5}		
Cuarzo (fundido)	0.12×10^{-5}		
Acero	3.6×10^{-5}		

Figura 42: Coeficiente de expansión volumétrico para diferentes materiales.

Ejemplo de cambio de longitud por cambio de temperatura (problema de expansión lineal): Un evaluador usa una cinta métrica de acero que tiene exactamente 50 m de longitud a una temperatura de 20 °C. ¿Qué longitud tiene en un día caluroso de verano en el que la temperatura es de 35 °C?

Primero calculamos el cambio ΔL en la longitud de la cinta, esto es:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} K^{-1} \cdot 50 \text{ m} \cdot (35^\circ C - 20^\circ C) = 9 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 9 \text{ mm}$$

Luego la longitud que tiene en un día caluroso de verano es:

$$L = L_0 + \Delta L = 50 \text{ m} + 9 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 50,009 \text{ m}$$

Ejemplo de cambio de longitud por cambio de temperatura (problema de expansión lineal): En un experimento en laboratorio los ingenieros quieren saber la temperatura en la que un cuerpo de plomo alcanza los 25.43 m de longitud, cuando inicialmente se mantiene 25.34 m a una temperatura de 26°C. Dato: Coeficiente de dilatación lineal del Plomo: $\alpha=29 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ C^{-1}$

Para saber la temperatura en la que un cuerpo de plomo alcanza los 25.43 m de longitud planteamos lo siguiente:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot (T_f - T_0)$$

Despejando T_f obtenemos:

$$T_f = \frac{L_f - L_0}{\alpha \cdot L_0} + T_0$$

$$T_f = \frac{25,43 \text{ m} - 25,34}{29 \cdot 10^{-6} \cdot 25,34} + 26^\circ\text{C} = \mathbf{148,47^\circ\text{C}}$$

Ejemplo Cambio de volumen por cambio de temperatura (problema implica la expansión de volumen del vidrio y del Mercurio): Un frasco de vidrio con volumen de 200 cm^3 se llena hasta el borde con mercurio a 20°C . ¿Cuánto Mercurio se desbordará si la temperatura del sistema se eleva a 100°C ? El coeficiente de expansión lineal del vidrio es de $0,40 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

La cantidad que se desborda es igual a la diferencia entre los valores de ΔV para el mercurio y el vidrio. El valor para el mercurio $\beta_{\text{mercurio}} = 18 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ (tomado de la tabla) y el valor de β para este tipo de vidrio lo obtenemos con la ecuación con la ecuación $\beta = 3\alpha$.

Entonces, el coeficiente de expansión de volumen para el vidrio es:

$$\beta_{\text{vidrio}} = 3 \cdot \alpha_{\text{vidrio}} = 3 \cdot (0,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

El aumento de volumen del frasco de vidrio es:

$$\Delta V_{\text{vidrio}} = \beta_{\text{vidrio}} \cdot V_0 \cdot \Delta T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 200 \text{ m}^3 \cdot (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0,19 \text{ cm}^3$$

El aumento de volumen de vidrio es:

$$\Delta V_{\text{Mercurio}} = \beta_{\text{Mercurio}} \cdot V_0 \cdot \Delta T = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \cdot 200 \text{ m}^3 \cdot (100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 2,9 \text{ cm}^3$$

El volumen del mercurio que se desborda es:

$$\Delta V_{\text{Mercurio}} - \Delta V_{\text{vidrio}} = 2,9 \text{ cm}^3 - 0,19 \text{ cm}^3 = \mathbf{2,7 \text{ cm}^3}$$

Ejemplo Cambio de volumen por cambio de temperatura (problema implica la expansión de volumen del vidrio y del mercurio): Una barra de aluminio de $0,5$ metros cúbicos de volumen, experimenta inicialmente una temperatura de 14°C , posteriormente se calienta a 45°C , ¿Cuál será su volumen final? ¿Qué tanto ha incrementado?

Para saber su volumen final planteamos:

$$\Delta V_{\text{Aluminio}} = \beta_{\text{Aluminio}} \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

$$V_f - V_0 = \beta_{\text{Aluminio}} \cdot V_0 \cdot (T_f - T_0) = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 0,5 \text{ m}^3 \cdot (45^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C})$$

Despejando V_f se obtiene:

$$V_f = \beta_{\text{Aluminio}} \cdot V_0 \cdot (T_f - T_0) + V_0$$

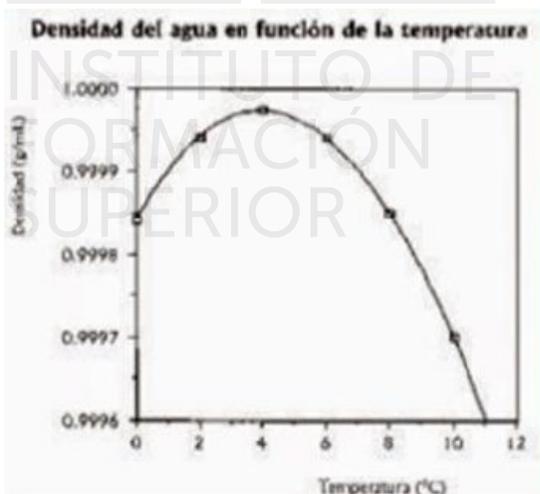
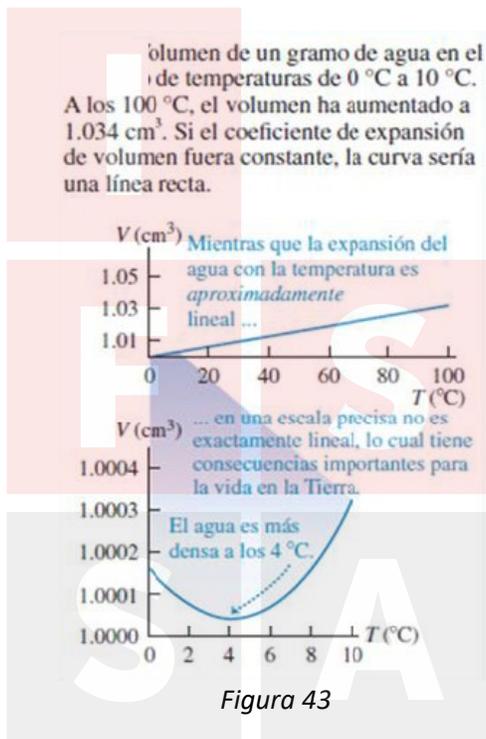
$$V_f = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 0,5 \text{ m}^3 \cdot (45^\circ\text{C} - 14^\circ\text{C}) + 0,5 \text{ m}^3 = \mathbf{0,5011 \text{ m}^3}$$

Para ver el incremento calculamos:

$$\Delta V_{Aluminio} = V_f - V_0 = 0,5011 m^3 - 0,5 m^3 = 1,1 \cdot 10^{-3} m^3$$

4.3. Expansión térmica del agua

El agua, en el intervalo de temperaturas de 0 °C a 4 °C, se contrae al aumentar la temperatura. En este intervalo, su coeficiente de expansión es negativo. Por arriba de 4 °C, el agua se expande al calentarse. Por lo tanto, el agua tiene su mayor densidad a 4 °C. El agua también se expande al congelarse, en cambio, la mayoría de los materiales se contraen al congelarse.



4.4. Esfuerzo térmico

Si sujetamos rígidamente los extremos de una varilla para evitar su expansión o contracción y luego variamos la temperatura, aparecerán esfuerzos de tensión o compresión llamados **esfuerzos térmicos**. La varilla quiere expandirse o contraerse, pero las abrazaderas no la dejan. Los esfuerzos pueden ser tan grandes que deformen irreversiblemente la varilla o incluso la rompan.

Definimos el esfuerzo F/A necesario para mantener constante la longitud de una varilla como sigue:

$$\frac{F}{A} = -Y \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 56}) \text{ Esfuerzo Térmico}$$

Si la temperatura disminuye, ΔT es negativo, así que F y F/A son positivos; esto implica que se requieren una fuerza y un esfuerzo de tensión para mantener la longitud. Si ΔT es positivo, F y F/A son negativos, y la fuerza y el esfuerzo requeridos son de compresión.

Material	Módulo de Young (Y) (Pa) ⁴
Aluminio	7.0×10^{10} Pa
Latón	9.0×10^{10} Pa
Cobre	11×10^{10} Pa
Vidrio óptico	6.0×10^{10} Pa
Hierro	21×10^{10} Pa
Plomo	1.6×10^{10} Pa
Níquel	21×10^{10} Pa
Acero	20×10^{10} Pa

Figura 45: Módulo de Young para diferentes materiales.

El Módulo de Young es una medida de la rigidez de un material, entonces mientras mayor es el valor de Y más rígido es el material y menor será la deformación.

Ejemplo de esfuerzo térmico: Un cilindro de aluminio de 10 cm de longitud, con área transversal de 20 cm^2 , se usará como espaciador entre dos paredes de acero. A $17,2 \text{ }^\circ\text{C}$, el cilindro apenas se desliza entre las paredes. Si se calienta a $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$, ¿qué esfuerzo habrá en el cilindro y qué fuerza total ejercerá éste sobre cada pared, suponiendo que las paredes son perfectamente rígidas y están separadas por una distancia constante?

Entonces para el aluminio, $Y = 7.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ y $\alpha = 2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. El cambio de temperatura es $\Delta T = 22,3 \text{ }^\circ\text{C} - 17,2 \text{ }^\circ\text{C} = 5,1 \text{ }^\circ\text{C} = 5,1 \text{ K}$. El esfuerzo es:

$$\frac{F}{A} = -Y \cdot \alpha \cdot \Delta T = -(7.10^{10} \text{ Pa}) \cdot (2,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}) \cdot (5,1 \text{ K}) = -8568000 \text{ Pa}$$

El signo negativo indica que se requiere un esfuerzo de compresión, no de tensión, para mantener constante la longitud del cilindro. Este esfuerzo es independiente de la longitud y del área de sección transversal. La fuerza total F es:

$$F = A \cdot \left(\frac{F}{A}\right) = (20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2) \cdot (-8,6 \cdot 10^6 \text{ Pa}) = -17200 \text{ N}$$

5. CANTIDAD DE CALOR

Si metemos una cuchara fría en una taza con café caliente, la cuchara se calienta y el café se enfría para establecer el equilibrio térmico. La interacción que causa estos cambios de temperatura es básicamente una transferencia de energía de una sustancia a otra. La transferencia de energía que se da exclusivamente por una diferencia de temperatura se denomina flujo de calor o transferencia de calor, en tanto que la energía así transferida se llama **calor**. Sir James Joule (1818-1889) estudió cómo puede calentarse el agua por agitación vigorosa con una rueda de paletas la cual agrega energía al agua realizando un trabajo sobre ella. **Joule observó que el aumento de temperatura es directamente proporcional a la cantidad de trabajo realizado.**

Es posible lograr el mismo cambio de temperatura poniendo el agua en contacto con un cuerpo más caliente; por lo tanto, esta interacción también debe implicar un intercambio de energía.



Figura 46

Podemos definir una unidad de cantidad de calor con base en el cambio de temperatura de un material específico. La **caloría** (abreviada cal) se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 °C a 15.5 °C.

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186 \text{ J}$$

5.1. Calor específico

Usamos el símbolo Q para cantidad de calor. Se observa que la cantidad de calor Q necesaria para elevar la temperatura de una masa m de cierto material de T_1 a T_2 es aproximadamente proporcional al cambio de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ y a la masa m del material. Si calentamos agua para hacer té, necesitamos el doble de calor para dos tazas que para una, si el intervalo de temperatura es el mismo. La cantidad de calor requerida también depende de la naturaleza del material; se requieren 4190 J de calor para elevar la temperatura de 1 kilogramo de agua 1 C°, pero sólo 910 J para elevar en 1 C° la temperatura de 1 kilogramo de aluminio. Juntando todas estas relaciones, tenemos:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ (Ec. 57) } \textit{Calor requerido para cambiar la temperatura de la masa } m$$

Donde c es una cantidad, diferente para cada material, llamada **calor específico** del material. Q y ΔT pueden ser positivos o negativos. Si son positivos, entra calor en el cuerpo y aumenta su temperatura; si son negativos, sale calor del cuerpo y disminuye su temperatura.

5.2. Capacidad calorífica molar

A veces resulta más útil describir una cantidad de sustancia en términos del número de moles n , en vez de la masa m del material. La masa molar de cualquier sustancia, denotada con M , es la masa por mol. Por ejemplo, la masa molar del agua es de 18,0 g/mol = 18,0 x 10⁻³ kg/mol; un mol de agua tiene una masa de 18,0 g = 0,0180 kg. La masa total m de material es la masa por mol M multiplicada por el número de moles n :

$$m = n \cdot M \text{ (Ec. 58)}$$

Entonces reemplazando en la ecuación de calor requerido para cambiar la temperatura de la masa m , se tiene:

$$Q = n \cdot M \cdot c \cdot \Delta T \text{ (Ec. 59)}$$

El producto $M \cdot c$ se denomina **capacidad calorífica molar** (o calor específico molar) y se denota con C . Con esta notación, reescribimos la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$Q = n \cdot C \cdot \Delta T \text{ (Ec. 60)}$$

En la Figura 47 se dan valores de calor específico y capacidad calorífica molar para varias sustancias.

Valores aproximados del calor específico y capacidad calorífica molar (a presión constante)

Sustancia	Calor específico, (J/kg · K)	Masa molar, (kg/mol)	Capacidad calorífica molar (J/mol · K)
Aluminio	910	0.0270	24.6
Berilio	1970	0.00901	17.7
Cobre	390	0.0635	24.8
Etanol	2428	0.0461	111.9
Etilenglicol	2386	0.0620	148.0
Hielo (cerca de 0 °C)	2100	0.0180	37.8
Hierro	470	0.0559	26.3
Plomo	130	0.207	26.9
Mármol (CaCO ₃)	879	0.100	87.9
Mercurio	138	0.201	27.7
Sal (NaCl)	879	0.0585	51.4
Plata	234	0.108	25.3
Agua (líquida)	4190	0.0180	75.4

Figura 47: Tabla de Calor Específico y Capacidad Calorífica Molar para varias sustancias.

Ejemplos de cantidad de calor:

Ejemplo 1:

Calcular la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura a 10 Kg de cobre de 25 °C a 125 °C.

$$Q = m \cdot c_{Cu} \cdot \Delta T = 10 \text{ kg} \cdot 390 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (398\text{K} - 298\text{K}) = 390000 \text{ J}$$

Ejemplo 2:

Un recipiente de aluminio de 2,5 kg contiene 5 kg de agua a la temperatura de 28 °C. ¿Qué cantidad de calor se requiere para elevarles la temperatura hasta 80°C?

$$Q_{Al} = m \cdot c_{Al} \cdot \Delta T = 2,5 \text{ kg} \cdot 910 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (353 \text{ K} - 301 \text{ K}) = 118300 \text{ J}$$

$$Q_{H_2O} = m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta T = 5 \text{ kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (353 \text{ K} - 301 \text{ K}) = 1089400 \text{ J}$$

Entonces el calor que se requiere para elevarles la temperatura es:

$$Q_{Al} + Q_{H_2O} = 118300 \text{ J} + 1089400 \text{ J} = 1207700 \text{ J}$$

6. CALORIMETRÍA Y CAMBIOS DE FASE

Calorimetría significa “medición de calor”. Hemos hablado de la transferencia de energía (calor) durante los cambios de temperatura. El calor también interviene en los cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua.

6.1. Cambios de fase

Usamos el término fase para describir un estado específico de la materia, como sólido, líquido o gas. El compuesto H₂O existe en la fase sólida como hielo, en la fase líquida como agua y en la fase gaseosa como

vapor de agua (También llamamos a éstos **estados de la materia**: el estado sólido, el estado líquido y el estado gaseoso).

Una transición de una fase a otra es un **cambio de fase**. Para una presión dada, los cambios de fase se dan a una temperatura definida, generalmente acompañada por absorción o emisión de calor, y un cambio de volumen y densidad. Un ejemplo conocido de cambio de fase es la fusión del hielo. Si agregamos calor al hielo a 0 °C y a presión atmosférica normal, la temperatura del hielo no aumenta. En vez de ello, parte de él se funde para formar agua líquida. Si agregamos calor lentamente, manteniendo el sistema muy cerca del equilibrio térmico, la temperatura seguirá en 0 °C hasta que todo el hielo se haya fundido. El efecto de agregar calor a este sistema no es elevar su temperatura sino cambiar su fase de sólida a líquida.

Para convertir 1 kg de hielo a 0 °C en 1 kg de agua líquida a 0 °C y a presión atmosférica normal, necesitamos $3,34 \times 10^5$ J de calor. El calor requerido por unidad de masa se llama **calor de fusión** (o calor latente de fusión), denotado con L_f . Para fundir una masa m de material con calor de fusión L_f se requiere una cantidad de calor Q dada por:

$$Q = m \cdot L_f \text{ (Ec. 61)}$$

Este proceso es reversible. Para congelar agua líquida a 0 °C tenemos que quitar calor; la magnitud es la misma, pero ahora Q es negativa porque se quita calor en vez de agregarse. Para cubrir ambas posibilidades e incluir otros tipos de cambios de fase, escribimos:

$$Q = \mp m \cdot L \text{ (Ec. 62)}$$

Usamos el signo más (entra calor) cuando el material se funde, y el signo menos (sale calor) cuando se congela. El calor de fusión es diferente para diferentes materiales, y también varía un poco con la presión.

Para un material dado, a una presión dada, la temperatura de congelación es la misma que la de fusión. En esta temperatura única, las fases líquida y sólida (agua líquida y hielo, por ejemplo) pueden coexistir en una condición llamada **equilibrio de fases**. Algo similar sucede con la ebullición o evaporación, una transición de fase entre líquido y gas. El calor correspondiente (por unidad de masa) se llama **calor de vaporización** L_v . Al igual que la fusión, la ebullición es una transición reversible. Si quitamos calor a un gas a la temperatura de ebullición, el gas vuelve a la fase líquida (se condensa), cediendo a su entorno la misma cantidad de calor (calor de vaporización) que se necesitó para vaporizarlo. A una presión dada, las temperaturas de ebullición y condensación siempre son la misma; en ella, las fases líquida y gaseosa pueden coexistir en equilibrio de fases. Tanto L_v como la temperatura de ebullición de un material dependen de la presión.

La Figura 48 presenta calores de fusión y vaporización para varios materiales y sus temperaturas de fusión y ebullición, a presión atmosférica normal.

Sustancia	Punto de fusión normal		Calor de fusión, L_f (J/kg)	Punto de ebullición normal		Calor de vaporización, L_v (J/kg)
	K	°C		K	°C	
Helio	*	*	*	4.216	-268.93	20.9×10^3
Hidrógeno	13.84	-259.31	58.6×10^3	20.26	-252.89	452×10^3
Nitrógeno	63.18	-209.97	25.5×10^3	77.34	-195.8	201×10^3
Oxígeno	54.36	-218.79	13.8×10^3	90.18	-183.0	213×10^3
Etanol	159	-114	104.2×10^3	351	78	854×10^3
Mercurio	234	-39	11.8×10^3	630	357	272×10^3
Agua	273.15	0.00	334×10^3	373.15	100.00	2256×10^3
Azufre	392	119	38.1×10^3	717.75	444.60	326×10^3
Plomo	600.5	327.3	24.5×10^3	2023	1750	871×10^3
Antimonio	903.65	630.50	165×10^3	1713	1440	561×10^3
Plata	1233.95	960.80	88.3×10^3	2466	2193	2336×10^3
Oro	1336.15	1063.00	64.5×10^3	2933	2660	1578×10^3
Cobre	1356	1083	134×10^3	1460	1187	5069×10^3

*Se requiere una presión mayor que 25 atmósferas para solidificar el helio. A presión de 1 atmósfera, el helio sigue siendo líquido hasta el cero absoluto.

Figura 48: Tabla de calores de fusión y vaporización.

Ejemplo de calorimetría y cambio de fase:

¿Cuántas calorías son necesarias para convertir 15 g de hielo a 0 °C en vapor de agua a 100 °C?

$$Q_1 = m \cdot L_f = 0,015 \text{ Kg} \cdot 334 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} = 5010 \text{ J}$$

$$Q_2 = m \cdot C_{H_2O} \cdot \Delta T = 0,015 \text{ Kg} \cdot 4190 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (373 \text{ K} - 273 \text{ K}) = 6285 \text{ J}$$

$$Q_3 = m \cdot L_v = 0,015 \text{ Kg} \cdot 2256 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{Kg}} = 33840 \text{ J}$$

Finalmente calculamos las calorías necesarias:

$$Q_{TOTAL} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 45135 \text{ J} = 10,7 \text{ Kcal}$$

7. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Los tres mecanismos de transferencia de calor son conducción, convección y radiación. Hay conducción dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos que están en contacto. La convección depende del movimiento de una masa de una región del espacio a otra y la radiación es transferencia de calor por radiación electromagnética, como la luz del Sol, sin que tenga que haber materia en el espacio entre los cuerpos.

Conducción

La conducción es el fenómeno consistente en la propagación de calor entre dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo a diferente temperatura debido a la agitación térmica de las moléculas, no existiendo un desplazamiento real de estas.

Por ejemplo si sujetamos el extremo de una varilla de cobre y colocamos el otro en una flama, el extremo que sostenemos se calienta cada vez más, aunque no esté en contacto directo con la flama. El calor llega al

extremo más frío por conducción a través del material. En el nivel atómico, los átomos de las regiones más calientes tienen más energía cinética, en promedio, que sus vecinos más fríos, así que empujan a sus vecinos, transfiriéndoles algo de su energía. Los vecinos empujan a otros vecinos, continuando así a través del material. Los átomos en sí no se mueven de una región del material a otra, pero su energía sí.

Sólo hay transferencia de calor entre regiones que están a diferente temperatura, y la dirección de flujo siempre es de la temperatura más alta a la más baja.

Convección

La convección es transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra. Como ejemplos conocidos tenemos los sistemas de calefacción domésticos de aire caliente y de agua caliente, el sistema de enfriamiento de un motor de combustión y el flujo de sangre en el cuerpo. Si el fluido circula impulsado por un ventilador o bomba, el proceso se llama **convección forzada**; si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama **convección natural o convección libre**.

Radiación

La radiación es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. Todos hemos sentido el calor de la radiación solar y el intenso calor de un asador de carbón, o las brasas de una chimenea. Casi todo el calor de estos cuerpos tan calientes no nos llega por conducción ni por convección en el aire intermedio, sino por radiación. Habría esta transferencia de calor aunque sólo hubiera vacío entre nosotros y la fuente de calor.

Ejemplos de mecanismo de transferencia de calor:

- Lo largo de los instrumentos para manipular carbón u otros objetos potencialmente muy calientes. Si su extensión fuera más corta, la transferencia de calor sería más rápida y no se podría tocar ninguno de los extremos.
- El calor que tiene una cuchara al dejarla en un recipiente y volcar una sopa extremadamente caliente sobre él.
- Al hervir agua, la llama conduce el calor al recipiente y al cabo de un tiempo permite calentar el agua.
- La transferencia de calor de una estufa.
- El secador de manos o de pelo, que transmiten calor por convección forzada.
- El calor emitido por un radiador.
- La radiación ultravioleta solar, precisamente el proceso que determina la temperatura terrestre.

8. MODELO CINÉTICO-MOLECULAR DEL GAS IDEAL

Este modelo cinético-molecular representa el gas como un gran número de partículas que rebotan dentro de un recipiente cerrado. He aquí los supuestos de nuestro modelo:

1. Un recipiente con volumen V contiene un número muy grande N de moléculas idénticas, cada una con masa m .
2. Las moléculas se comportan como partículas puntuales; su tamaño es pequeño en comparación con la distancia media entre partículas y las dimensiones del recipiente.

3. Las moléculas están en constante movimiento, y obedecen las leyes del movimiento de Newton. Las moléculas chocan ocasionalmente con las paredes del recipiente. Tales choques son perfectamente elásticos.
4. Las paredes del recipiente son perfectamente rígidas y con masa infinita; no se mueven.

8.1. Modelo Molecular de la presión de un Gas Ideal

En nuestro modelo, la presión ejercida por un gas en una superficie dada es debido a las colisiones de las moléculas de gas contra la superficie. Como sería imposible de tratar por separado cada molécula de gas, en este caso, es importante trabajar con las medias tales como la energía cinética media de una molécula, la cual está dada por:

$$E_{cm} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_{medio}^2 \quad (Ec. 63)$$

La presión debida a n moléculas de un gas ideal contenidas en un volumen V está dada por:

$$P = \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V}\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_{media}^2 \quad (Ec. 64)$$

Tenga en cuenta que esta presión es directamente proporcional al de número moléculas y la energía cinética de ellos, puesto que con más energía y más colisiones ocurran en las paredes, mayor será la presión. Y esta presión es inversamente proporcional al volumen, ya que el mayor es el volumen, más espacio las moléculas se producirá un menor número de colisiones con las paredes.

8.2. Interpretación Molecular de la Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética molecular media. Las moléculas más pesadas se mueven a una velocidad menor que la más ligera, es decir, mientras más ligera la molécula más rápidamente se moverá a la misma temperatura. La temperatura absoluta de un gas ideal está relacionada con la energía cinética media de traslación por molécula por la expresión:

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{E_{cm}}{k_B} \quad (Ec. 65)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann.

Esto simplemente significa que diferentes gases a la misma temperatura tendrán igual energía cinética media por molécula.

9. CAPACIDADES CALORÍFICAS DE LOS GASES

Las Ec. 66 indican que la capacidad calorífica molar (a volumen constante) de todo gas cuyas moléculas pueden representarse como puntos es igual a:

$$C_v = \frac{3}{2} \cdot R \quad (Ec. 66) \quad \text{Para un gas ideal monoatómico}$$

$$C_v = \frac{5}{2} \cdot R \quad (Ec. 67) \quad \text{Para un gas diatómico}$$



10. EJERCICIOS PROPUESTOS

- Convertir las siguientes temperaturas Celsius a Fahrenheit:
 - 62,8°C
 - 56,7°C
 - 31,1°C
- Convertir las siguientes temperaturas Fahrenheit a Celsius:
 - 41°F
 - 107°F
 - 18°F
- Convertir las temperaturas de los incisos anteriores a la escala Kelvin.
- El puente Humber de Inglaterra tiene el claro individual más largo del mundo (1410 m). Calcule el cambio de longitud de la cubierta de acero del claro si la temperatura aumenta de -5°C a 18°C.
- La varilla del péndulo de un reloj es de latón. Calcule su cambio de fraccionario de longitud si se enfría de 19,5°C a 5°C.
- Un tanque de acero se llena totalmente con 2,8 m³ de etanol cuando ambos el tanque como el etanol están a 32°C. una vez que el tanque y el contenido se hayan enfriado a 18°C, ¿qué volumen adicional de etanol podrá meterse en el tanque?
- Un recipiente de hierro de 2 kg contiene 500 grde agua, ambos a 25°C. ¿qué cantidad de calor se requiere para elevar la temperatura hasta 80°C?. Datos : $c_{hierro} = 470 \frac{J}{Kg K}$ y $c_{H2O} = 4190 \frac{J}{Kg.K}$
- Determinar la energía térmica necesaria para transformar 40 g de hielo a -10°C y a una presión atmosférica en vapor de agua a una temperatura de 100°C.
Datos: $L_{fusión\ hielo} = 80 \frac{cal}{g}$; $L_{vap\ agua} = 540 \frac{cal}{g}$; $c_{hielo} = 2114 \frac{J}{g°C}$; $c_{agua} = 4181 \frac{J}{g°C}$
- ¿Cuánto calor hay que suministrar a medio kilogramo de hielo que está a 40°C bajo cero para convertirlo en vapor de agua a 100°C?. Busca los datos que necesites.
- ¿Qué cantidad de aluminio se podrá fundir con 20 kcal, si está a temperatura de fusión?
- Si 300 g de agua están a 100°C y presión normal, ¿qué cantidad de calor será necesaria para vaporizarlos?

Ejercicios adicionales:

- Convertir las siguientes temperaturas en escala Kelvin a °C y °F:
 - 400 K
 - 95 K

- c. 1200 K
2. Un alambre con longitud de 1,5 m a 20°C se alarga 1,9 cm al calentarse a 420°C. Calcule su coeficiente medio de expansión lineal para este intervalo de temperatura.
 3. Un Ingeniero trabaja en una pieza de 1,4 kg de aluminio y está diseñada para operar a 150°C. ¿Cuánto calor se requiere para dar elevar su temperatura de 20°C a 150°C?
 4. Para elevar la temperatura de una pieza de hierro de 20 kg desde 10 °C a 90 °C hay que suministrar una energía de 720 kJ. Calcular el calor específico del hierro.
 5. Un estudiante de física desea enfriar 0,25 kg de Diet Omni-Cola (casi pura agua), que está a 25°C, agregándole hielo que está a -20°C. ¿Cuánto hielo debe agregar para que la temperatura final sea 0°C con todo el hielo derretido, si puede despreciarse la capacidad calorífica del recipiente?

11. RESULTADOS

1. a) $T_F = -81,04 \text{ } ^\circ\text{F}$
b) $T_F = 134,06 \text{ } ^\circ\text{F}$
c) $T_F = 87,98 \text{ } ^\circ\text{F}$
2. a) $T_C = 5^\circ\text{C}$
b) $T_C = 41,67^\circ\text{C}$
c) $T_C = -27,78^\circ\text{C}$
3. a) $T_K = 278,15 \text{ K}$
b) $T_K = 314,82 \text{ K}$
c) $T_K = 245,37 \text{ K}$
4. $\Delta l = 0,389 \text{ m}$
5. $\frac{\Delta l}{l_o} = -2,8 * 10^{-4}$
6. $V_{\text{etanol}} = 0,0274 \text{ m}^3$
7. $Q_{\text{total}} = 166925 \text{ J}$
8. $Q_{\text{total}} = 121382,4 \text{ J} = 28997,23 \text{ cal}$
9. $Q_{\text{total}} = 1548990 \text{ J} = 370040,61 \text{ cal}$
10. $m = 0,21 \text{ kg}$
11. $Q_v = 162000 \text{ cal}$

UNIDAD V
GASES

Se denomina **gas** al estado de agregación de la materia en el que las sustancias no tienen forma ni volumen propio, adoptando el de los recipientes que las contienen. Las moléculas que constituyen un gas casi no son atraídas unas por otras, por lo que se mueven en el vacío a gran velocidad y muy separadas unas de otras, explicando así las propiedades:

- Las moléculas de un gas se encuentran prácticamente libres, de modo que son capaces de distribuirse por todo el espacio en el cual son contenidos. Las fuerzas gravitatorias y de atracción entre las moléculas son despreciables, en comparación con la velocidad a que se mueven las moléculas.
- Los gases ocupan completamente el volumen del recipiente que los contiene.
- Los gases no tienen forma definida, adoptando la de los recipientes que los contiene.
- Pueden comprimirse fácilmente, debido a que existen enormes espacios vacíos entre unas moléculas y otras

LEY DE LOS GASES IDEALES

1. LEY DE BOYLE

Las propiedades de los gases a bajas densidades permiten definir la escala de temperatura del gas ideal. Si comprimimos este gas manteniendo su temperatura constante, la presión crece. Del mismo modo, si el gas se expande a temperatura constante, su presión decrece. Esto quiere decir que existe una relación inversa entre la presión y el volumen:

$$P \propto \frac{1}{V} \text{ (a temperatura constante) (Ec. 68)}$$

Dónde el símbolo \propto significa *proporcionalidad a*. Para cambiar el signo \propto por el de igualdad se escribe:

$$P = k_1 \cdot \frac{1}{V} \text{ (Ec. 69)}$$

FIGURA 5.7 En estos gráficos se representa la variación del volumen de una muestra de gas con la presión que se ejerce sobre él a temperatura constante. a) P contra V. Observe que el volumen del gas se duplica cuando la presión se reduce a la mitad; b) P contra 1/V.

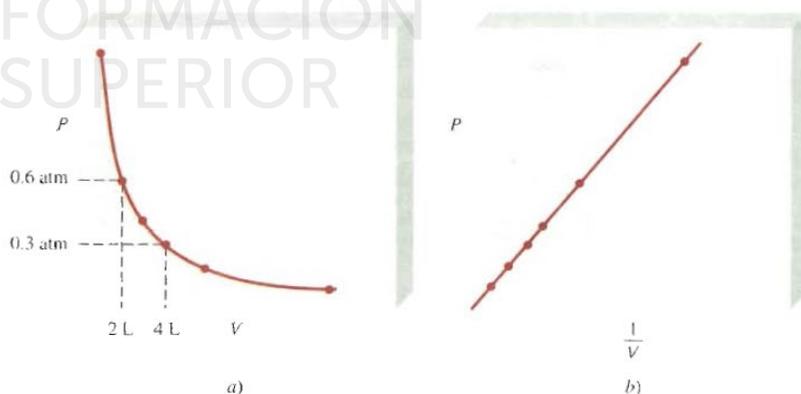


Figura 49: Variación de volumen con respecto a la presión.

Donde k_1 es una constante llamada **constante de proporcionalidad**. La Ec. 69 es una expresión de la **Ley de Boyle**, la cual establece que *“la presión de una cantidad fija de un gas manteniendo a temperatura constante es inversamente proporcional al volumen del gas”*.

La Ec. 69 también puede expresarse como:

$$P \cdot V = k_1 \text{ (Ec. 70)}$$

Aunque los valores individuales de presión y volumen pueden variar mucho para una muestra dada de un gas, siempre que la temperatura permanezca constante y la cantidad de gas no cambie, el producto $P \cdot V$ será igual a la misma constante. Por consiguiente, para una muestra de un gas bajo 2 condiciones distintas a temperatura constante, se tiene:

$$P_1 \cdot V_1 = k_1 = P_2 \cdot V_2 \text{ (Ec. 71)}$$

Ejemplo:

Un globo inflado con un volumen de 0,55 l al nivel del mar (1 atm) se deja elevar a una altura de 6,5 km, donde la presión es de casi 0,4 atm. Suponiendo que la temperatura permanece constante, ¿cuál es el volumen final del globo?

Resolución:

Como no hay ingreso o salida de gas del interior del globo, la cantidad de moles se mantiene constante, y como la temperatura se mantiene constante, se utiliza la ley de Boyle.

$$\begin{aligned}
 P_1 \cdot V_1 &= P_2 \cdot V_2 \\
 V_2 &= V_1 \cdot \frac{P_1}{P_2} \\
 V_2 &= 0,55 \text{ l} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{0,4 \text{ atm}} \\
 \underline{V_2} &= \underline{1,4 \text{ l}}
 \end{aligned}$$

Cuando la presión se reduce (a una temperatura constante), el volumen aumenta. El volumen final es mayor que el inicial, de modo que la respuesta resulta razonable.

2. LEY DE CHARLES Y GAY- LUSSAC

La Ley de Boyle depende de que la temperatura del sistema permanezca constante. Pero suponga que cambia la temperatura. ¿Cómo afectará el cambio de la temperatura al volumen y la presión de un gas? Veamos por principio de cuentas el efecto de la temperatura sobre el volumen de un gas. Los primeros investigadores que estudiaron esta relación fueron los científicos franceses, Jacques Charles y Joseph Gay-Lussac. Sus estudios demostraron que, a una presión constante, el volumen de una muestra de gas se expande cuando se calienta y se contrae al enfriarse.

La dependencia del volumen de un gas con la temperatura, se da por:

$$\begin{aligned}
 V &\propto T \text{ (Ec. 72)} \\
 V &= k_2 \cdot T \text{ (Ec. 73)} \\
 \frac{V}{T} &= k_2 \text{ (Ec. 74)}
 \end{aligned}$$

Dónde k_2 es la constante de proporcionalidad. La Ec. 74 se conoce como **Ley de Charles y de Gay-Lussac**, o simplemente **Ley de Charles**, la cual establece que “*el volumen de una cantidad fija de gas, manteniendo a presión constante, es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas*”.

Otra forma de presentar la Ley de Charles muestra que para una cantidad de gas y volumen constante, la presión del gas es directamente proporcional a la temperatura.

$$P \propto T \text{ (Ec. 75)}$$

$$P = k_3 \cdot T \text{ (Ec. 76)}$$

$$\frac{P}{T} = k_3 \text{ (Ec. 77)}$$

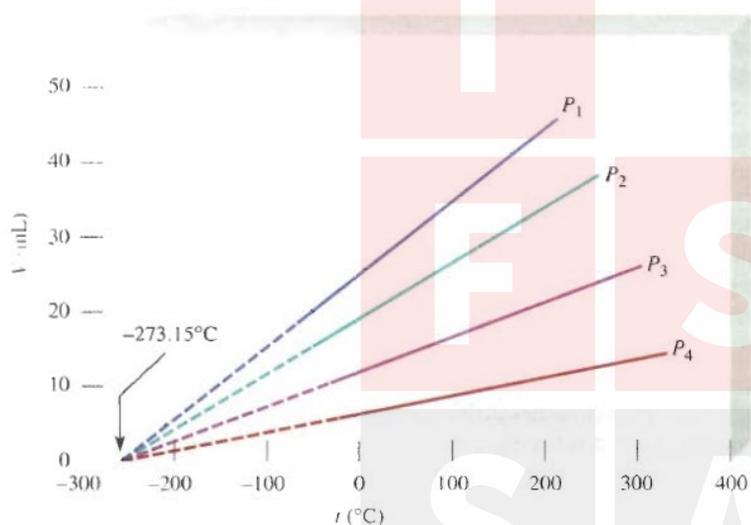


FIGURA 5.9 Variación del volumen de una muestra de gas con el cambio de temperatura a presión constante. Cada línea representa la variación a una cierta presión. Las presiones aumentan desde P_1 hasta P_4 . Todos los gases terminan por condensarse (se vuelven líquidos) si se enfrían a temperaturas suficientemente bajas; las líneas sólidas representan la región de temperatura por arriba del punto de condensación. Al extrapolar estas líneas (líneas interrumpidas), todas coinciden en el punto que representa el volumen cero y una temperatura de -273.15°C .

Figura 50: Variación del volumen con respecto a la temperatura a diferentes presiones.

Igual como se hizo para la relación presión y volumen a temperatura constante, es posible comparar dos condiciones de volumen y temperatura para una muestra dada de un gas a presión constante.

$$\frac{V_1}{T_1} = k_3 = \frac{V_2}{T_2} \text{ (Ec. 78)}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ (Ec. 79)}$$

Donde V_1 y V_2 son los volúmenes de los gases a las temperaturas T_1 y T_2 (ambas en kelvin), respectivamente.

Ejemplo:

Una muestra de 452 ml de fluor gaseoso se calienta de 22 a 187°C a presión constante, ¿Cuál es el volumen final?

Resolución:

Este cambio se realiza a presión y número de moles del gas constante, así que se puede aplicar la Ley de Charles.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$V_2 = 452 \text{ ml} \cdot \frac{460 \text{ K}}{295 \text{ K}}$$

$$\boxed{V_2 = 705 \text{ ml}}$$

Como se ve, el gas se expande cuando se calienta a presión constante.

3. LEY DE AVOGADRO

El trabajo del científico italiano Amadeo Avogadro complementó los estudios de Boyle, Charles y Gay-Lussac. En 1811 publicó una hipótesis en donde estableció que a la misma temperatura y presión, volúmenes iguales de diferentes gases contienen el mismo número de moléculas (o átomos si el gas es monoatómico), de ahí el volumen de cualquier gas debe ser proporcional al número de moles de moléculas presentes, es decir:

$$V \propto n \text{ (Ec. 80)}$$

$$V = k_4 \cdot n \text{ (Ec. 81)}$$

Dónde n representa el número de moles y k_4 es la constante de proporcionalidad. La Ec. 81 es la expresión matemática de la **Ley de Avogadro**, la cual establece que *“a presión y temperatura constante, el volumen de un gas es directamente proporcional al número de moles del gas presente”*.

4. ECUACIÓN DEL GAS IDEAL

Resumiendo las leyes de los gases que se han analizado hasta el momento:

$$\text{Ley de Boyle: } V \propto \frac{1}{P} \text{ (a } n \text{ y } T \text{ constante)} \text{ (Ec. 82)}$$

$$\text{Ley de Charles: } V \propto T \text{ (a } n \text{ y } P \text{ constante)} \text{ (Ec. 83)}$$

$$\text{Ley de Avogadro: } V \propto n \text{ (a } P \text{ y } T \text{ constante)} \text{ (Ec. 84)}$$

Es posible combinar las tres expresiones a una sola ecuación maestra para el comportamiento de los gases:

$$V \propto \frac{nT}{P} \text{ (Ec. 85)}$$

$$V = R \frac{nT}{P} \text{ (Ec. 86)}$$

$$P \cdot V = nRT \text{ (Ec. 87)}$$

Dónde R, la *contante de proporcionalidad*, se denomina **constante de los gases**.

$$R = 62,36367 \text{ L} \cdot \text{mmHg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R = 0,08205746 \text{ L} \cdot \text{atm} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R = 62,36367 \text{ L} \cdot \text{Torr} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$R = 83,14472 \text{ L} \cdot \text{mbar} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Figura 51: Valor de R en diferentes unidades.

La Ec. 87, conocida como **Ecuación del gas ideal**, explica la relación entre las cuatro variables P , V , T y n . Un **gas ideal** es un gas hipotético cuyo comportamiento de presión, volumen y temperatura se pueden describir completamente por la ecuación del gas ideal. Las moléculas de un gas no se atraen o se repelen entre sí, y su volumen es despreciable en comparación con el volumen del recipiente que lo contiene. Aunque en la naturaleza no existe un gas ideal, las discrepancias en el comportamiento de los gases reales en márgenes razonables de temperatura y presión no alteran sustancialmente los cálculos. Por lo tanto, se puede usar con seguridad la ecuación del gas ideal para resolver muchos problemas de gases.

Ejemplo:

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es un gas incoloro muy poco reactivo. Calcule la presión (en atm) ejercida por 1,82 moles del gas en un recipiente de acero de 5,43 l de volumen a 69,5 °C.

Resolución:

Este problema ofrece información acerca del número de moles, el volumen y la temperatura de un gas, pero no presenta cambio en ninguna de las cantidades. Por lo tanto, para calcular la presión se utiliza la ecuación del gas ideal, que puede reordenarse y obtiene:

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

$$P = \frac{(1,82 \text{ mol}) \cdot (0,0821 \text{ l} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{K} \cdot \text{mol}}) \cdot (69,5 + 273) \text{K}}{5,43 \text{ l}}$$

$$P = 9,42 \text{ atm}$$

La ecuación del gas ideal es útil para resolver problemas que no implican cambios en P , T , V y n de una muestra de gas. Sin embargo, a veces es necesario trabajar con cambios de presión, volumen y temperatura, o incluso, de cantidad del gas. Cuando cambian las condiciones, se debe emplear una forma modificada de la ecuación del gas ideal que toma en cuenta las condiciones iniciales y finales.

$$R = \frac{P_1 V_1}{n_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{n_2 T_2} \text{ (Ec. 88)}$$

Si $n_1 = n_2$, como normalmente ocurre, porque la cantidad de gas por lo general no cambia, la ecuación en tal caso se reduce a:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \text{ (Ec. 89)}$$

5. LEY DE DALTON DE PRESIONES PARCIALES

Cuando están presentes más de una sustancia gaseosa, mezcla de gases, la presión total del gas se relaciona con las **presiones parciales**, es decir, *las presiones de los componentes gaseosos individuales de la mezcla*. en 1801, Dalton formuló una ley, que actualmente se conoce como **ley de Dalton de las presiones parciales**, la cual establece que *la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones que cada gas ejercería si estuviera solo*.

Considérese el caso en el que dos gases A y B están en un recipiente de volumen V. la presión ejercida por el gas A, de acuerdo con la ecuación del gas ideal, es:

$$P_A = n_A \cdot R \cdot \frac{T}{V} \quad (\text{Ec. 90})$$

Dónde n_A es el número de moles de A presente. Del mismo modo, la presión ejercida por el gas B es:

$$P_B = n_B \cdot R \cdot \frac{T}{V} \quad (\text{Ec. 91})$$

En una mezcla de gases A y B, la presión total P_T es el resultado de las colisiones de ambos tipos de moléculas A y B, con las paredes del recipiente. Por tanto, de acuerdo con la Ley de Dalton,

$$P_T = P_A + P_B \quad (\text{Ec. 92})$$

$$P_T = n_A \cdot R \cdot \frac{T}{V} + n_B \cdot R \cdot \frac{T}{V} \quad (\text{Ec. 93})$$

$$P_T = \frac{RT}{V} (n_A + n_B) \quad (\text{Ec. 94})$$

$$P_T = \frac{RT}{V} n \quad (\text{Ec. 95})$$

Donde n, es el número total de moles de los gases presentes, está dado por $n = n_A + n_B$ y P_A y P_B son las presiones parciales de los gases A y B, respectivamente. Así, para una mezcla de gases, la P_T depende sólo del número total de moles de gas presentes, no de la naturaleza de las moléculas del gas

En general, la presión total de una mezcla de gases está dada por:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (\text{Ec. 96})$$

Siendo $P_1, P_2, P_3,$ etc son presiones parciales.

6. GASES REALES

El factor de compresibilidad (Z), conocido también como el factor de compresión, es la razón del volumen molar de un gas con relación al volumen molar de un gas ideal a la misma temperatura y presión. Es una propiedad termodinámica útil para modificar la ley de los gases ideales para ajustarse al comportamiento de un gas real. En general, la desviación del comportamiento ideal se vuelve más significativa entre más cercano esté un gas a un cambio de fase, sea menor la temperatura o más grande la presión. Para medir la desviación de la idealidad de un gas real se define el factor de compresibilidad (Z).

$$Z = \frac{V_m}{V_m(\text{ideal})} = \frac{P \cdot V_m}{R \cdot T} \quad (\text{Ec. 97})$$

$$Z = 1 \text{ gas ideal a cualquier } P \text{ y } T.$$

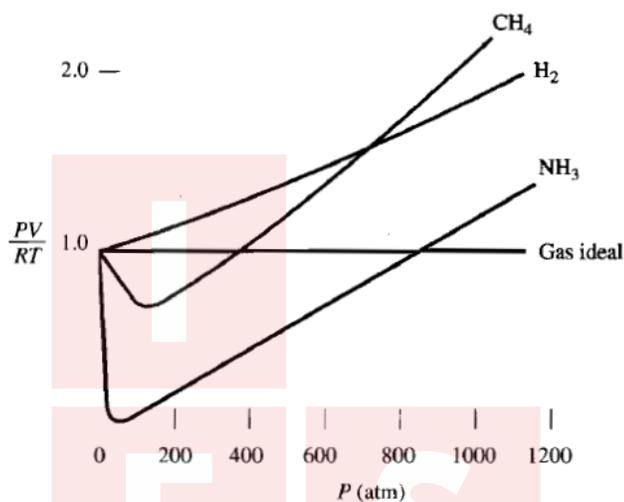


Figura 52

6.1 Ecuación de Van del Waals

La Ecuación de Van del Waals es una ecuación de estado que hace correcciones a la ecuación de gas ideal, considerando el volumen de las moléculas del gas y las fuerzas de atracción entre ellas. La ecuación fue desarrollada por en el siglo XIX por el físico Holandes J.D. Van der Waals, y ella tiene la siguiente expresión:

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (\text{Ec. 98})$$

Donde a y b son constantes empíricas, diferentes para cada gas; b representa aproximadamente el volumen de un mol de moléculas, así que el volumen total de las moléculas es nb y el volumen neto disponible para que se mueva es $V-nb$. La constante a depende de las fuerzas de atracción intermoleculares, que reduce el presión del gas para valores dados de: n , V , y T juntando las moléculas al tiempo que estas empujan las paredes del recipiente. La reducción de presión es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen en una capa cerca de la pared y también al número por unidad de volumen en la siguiente capa más allá de la pared (que son las que atraen). Así la reducción de la presión debida a fuerzas intermoleculares es proporcional a n^2/V^2

GAS	a (litro ² . atm/mol ²)	b (litro / mol)
Acetileno	4,4	0,051
Aire	1,4	0,039
Amoniaco	4,0	0,036
Argón	1,35	0,032
Cloro	5,5	0,049
Cloruro de hidrógeno	3,8	0,041
Dióxido de carbono	3,60	0,0428
Etileno	4,5	0,056
Helio	0,034	0,0236
Hidrógeno	0,245	0,0267
Monóxido de carbono	1,49	0,040
Nitrógeno	1,38	0,0394
Oxígeno	1,32	0,0312

Figura 53



7.- EJERCICIOS PROPUESTOS

- Una muestra de cloro gaseoso ocupa un volumen de 946 mL a una presión de 726 mmHg. Calcule la presión del gas (en mmHg) si el volumen se reduce a temperatura constante mL.
- Una muestra de monóxido de carbono gaseoso ocupa 3,2 l a 125°C. calcular la temperatura a la que el gas ocupará un volumen de 1,54 l si la presión se mantiene constante.
- El hexafluoruro de azufre (SF₆) es un gas incoloro e inodoro muy poco reactivo. Calcule la presión (en atm) ejercida por 1,86 moles del gas en un recipiente de acero de 5,43 l de volumen a 69,5 °C.
- Calcule el volumen (en litros) ocupado por 2,12 moles de óxido nítrico (NO) a 6,54 atm y 76°C.
- Una pequeña burbuja se eleva desde el fondo de un lago, donde la temperatura y presión son 8°C y 6,4 atm, hasta la superficie del agua, donde la temperatura es 25°C y la presión de 1 atm. Calcule el volumen final de la burbuja (en ml) si su volumen inicial era de 2,1 ml.
- Un gas que inicialmente tiene un volumen de 4 l a 1,2 atm y 66°C experimenta un cambio de manera que su volumen y temperatura final se convierten en 1,7 l y 42°C. ¿Cuál es su presión final? Suponga que el número de moles no ha cambiado.
- El argón es un gas inerte que se emplea en los focos para retrasar la vaporización del filamento. Un cierto foco que contiene argón a 1,2 atm y 18°C se calienta a 85°C a volumen constante. Calcule su presión final (en atm).
- Una muestra de oxígeno gaseoso sometida a una presión inicial de 0,97 atm se enfría de 21 a -68°C a volumen constante. ¿Cuál es su presión final (en atm)?

9. Una mezcla de gases contiene 4,46 moles de neón (Ne), 0,76 moles de argón (Ar) y 2,15 moles de xenón (Xe). Calcule las presiones parciales de los gases si la presión total es 2 atm a cierta temperatura.
10. Un gas real a 270°C y 25 atm de presión presenta un volumen molar un 15% menor que el calculado por medio de la ecuación de estado de los gases ideales. Calcule el factor de compresibilidad.
11. Un tanque de 20 l contiene 0,225 kg de Helio a 18°C. La masa molar del Helio es de 4 g/mol.
 - a. ¿Cuántos moles de Helio hay en el tanque?
 - b. Calcule la presión en el tanque.
12. Para el Dióxido de Carbono (CO₂) gaseoso, las constantes de la ecuación de Van de Waals son $a=0,364 \text{ Jm}^3/\text{mol}^2$ y $b=4,27 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$. Si 1 mol de CO₂ gaseoso a 350 K se confina a un volumen de 400 cm³, calcule la presión del gas usando la ecuación del gas ideal y la ecuación de Van der Waals.

8. RESULTADOS

1. $P_2=1373,59 \text{ mmHg}$ (dato faltante 500 ml)
2. $T_2=60,16 \text{ °C}$
3. $P=9,63 \text{ atm}$
4. $V=9,29 \text{ l}$
5. $V_2=14,25 \text{ ml}$
6. $P=2,62 \text{ atm}$
7. $P_2=1,48 \text{ atm}$
8. $P_2=0,68 \text{ atm}$
9. $P_{\text{Ne}}=1,21 \text{ atm}$; $P_{\text{Ar}}=0,206 \text{ atm}$, $P_{\text{Xe}}=0,584 \text{ atm}$.
10. $Z=0,85$
11. a) $n=56,25 \text{ mol}$; b) $P=67,19 \text{ atm}$ (gas ideal), $P=71,71 \text{ atm}$ (gas real).
12. $P=71,8 \text{ atm}$ (gas ideal), $P=57,89 \text{ atm}$ (gas real)

UNIDAD VI

PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

1. SISTEMAS TERMODINÁMICOS

Siempre hablaremos de transferencia de energía hacia o desde algún sistema específico.

En general, un sistema termodinámico es cualquier conjunto de objetos que conviene considerar como una unidad, y que podría intercambiar energía con el entorno. Donde hay cambios en el estado de un sistema termodinámico, se denomina **proceso termodinámico**.

1.1. Signos del calor y el trabajo en termodinámica

Describimos las relaciones de energía de cualquier proceso termodinámico en términos de la cantidad de calor Q agregada al sistema y el trabajo W realizado por él. Tanto Q como W pueden ser positivos, negativos o cero. Un valor positivo de Q representa flujo de calor hacia el sistema, con un suministro de energía correspondiente; un Q negativo representa flujo de calor hacia afuera del sistema. Un valor positivo de W representa trabajo realizado por el sistema contra el entorno, como el de un gas en expansión y, por lo tanto, corresponde a la energía que sale del sistema. Un W negativo, como el realizado durante la compresión de un gas, cuando el entorno realiza trabajo sobre el gas, representa energía que entra en el sistema.

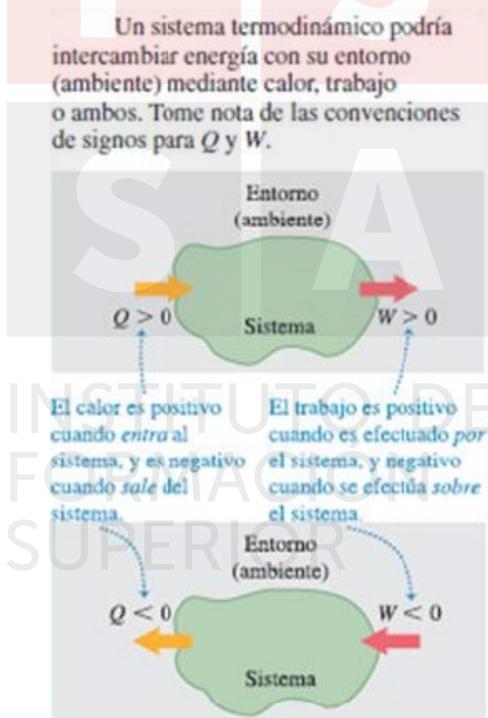


Figura 54

2. TRABAJO REALIZADO AL CAMBIAR EL VOLUMEN

Podemos entender el trabajo efectuado por un gas en un cambio de volumen considerando sus moléculas. Cuando una de ellas choca contra una superficie estacionaria, ejerce una fuerza momentánea sobre ella pero no realiza trabajo porque la superficie no se mueve. En cambio, si la superficie se mueve, como un pistón de un motor de gasolina, la molécula sí realiza trabajo sobre la superficie durante el choque. Si el pistón de la

Imagen a) de la Figura 55 se mueve a la derecha, de modo que aumente el volumen del gas, las moléculas que golpean el pistón ejercen una fuerza a lo largo de una distancia y realizan trabajo positivo sobre el pistón. Si éste se mueve a la izquierda como en la Imagen b) de la Figura 55, reduciendo el volumen del gas, se realiza trabajo positivo sobre la molécula durante el choque. Por lo tanto, las moléculas de gas realizan trabajo negativo sobre el pistón.

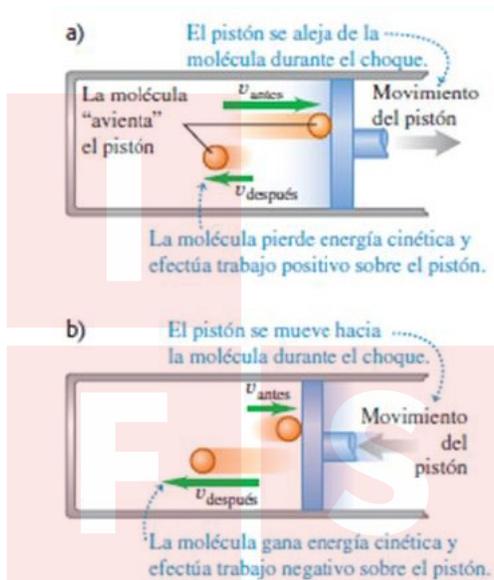


Figura 55

La Figura 56 muestra un sistema cuyo volumen puede cambiar (un gas, líquido o sólido) en un cilindro con pistón móvil. Suponga que el área transversal del cilindro es A y la presión ejercida por el sistema en la cara del pistón es p . La fuerza total F ejercida por el sistema sobre el pistón es $F = pA$. En general, la presión del sistema puede variar durante un cambio de volumen y podemos representar esta relación en una gráfica de p en función de V .

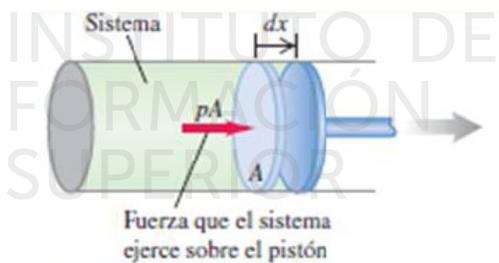


Figura 56

El trabajo efectuado es igual al área bajo la curva en una gráfica pV .

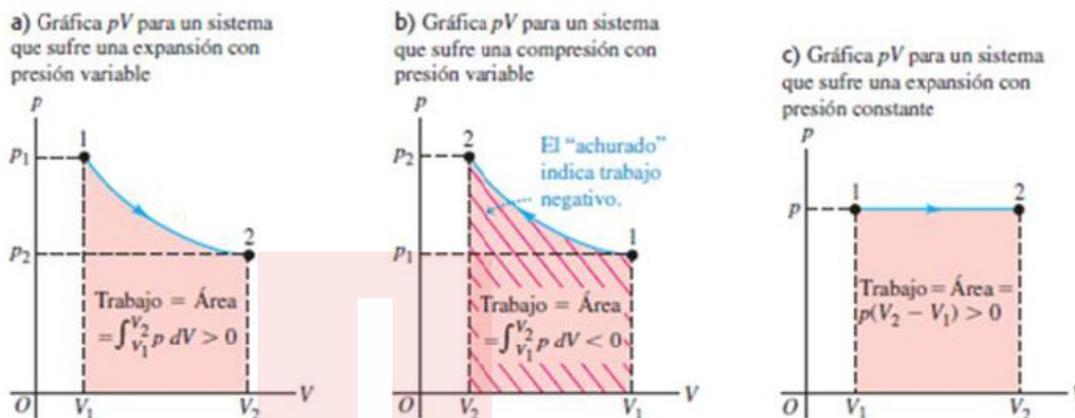


Figura 57

3. TRAYECTORIA ENTRE ESTADOS TERMODINÁMICOS

Hemos visto que, si un proceso termodinámico implica un cambio de volumen, el sistema realiza trabajo (positivo o negativo) sobre su entorno. También entrará o saldrá calor del sistema durante el proceso, si hay una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Veamos ahora cómo el trabajo efectuado por el sistema, y el calor agregado a él durante un proceso termodinámico, dependen de cómo se realiza el proceso.

3.1. Trabajo efectuado en un proceso termodinámico

Cuando un sistema termodinámico cambia de un estado inicial a uno final, pasa por una serie de estados intermedios, a los que llamamos trayectoria. Siempre hay un número infinito de posibilidades para dichos estados intermedios. Si todos son estados de equilibrio, la trayectoria podrá verse en una gráfica pV como muestra la Figura 58. El punto 1 representa un estado inicial con presión p_1 y volumen V_1 , y el punto 2 representa un estado final con presión p_2 y volumen V_2 .

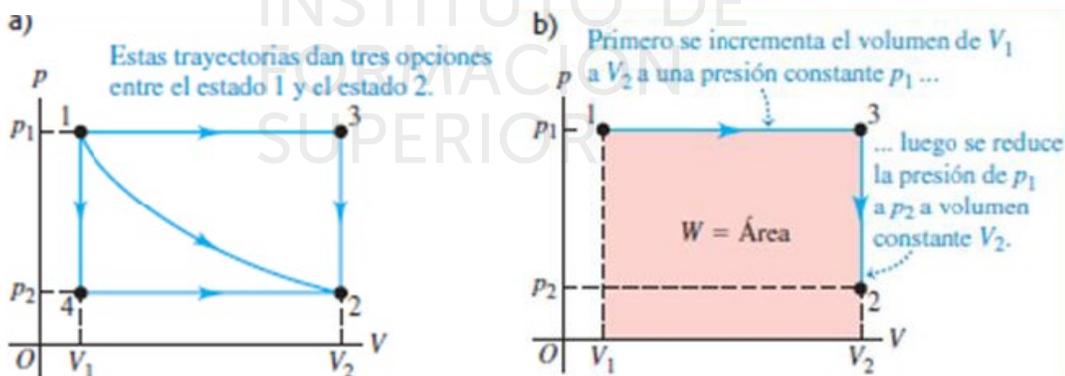


Figura 58

Para pasar del estado 1 al 2, podríamos mantener la presión en p_1 mientras el sistema se expande al volumen V_2 (punto 3 de la Imagen b) de la Figura 58) y luego reducir la presión a p_2 (tal vez reduciendo la temperatura) mientras se mantiene el volumen en V_2 (al punto 2 del diagrama). El trabajo efectuado por el

sistema durante este proceso es el área bajo la línea 1 →3; no se efectúa trabajo durante el proceso a volumen constante 3 → 2.

O bien, el sistema podría seguir la trayectoria 1 →4 →2 (Figura 58); en tal caso, el trabajo es el área bajo la línea 4 →2, ya que no se efectúa trabajo durante el proceso a volumen constante 1 → 4.

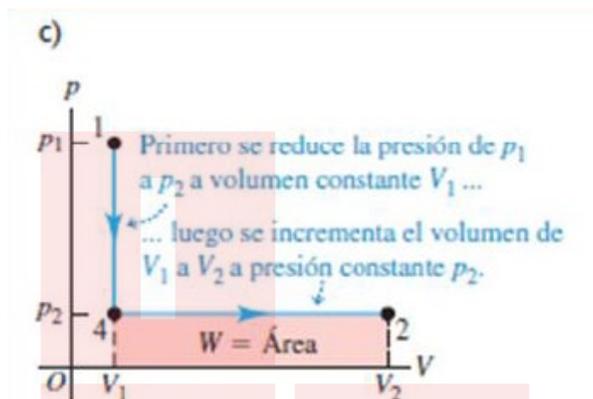


Figura 59

La curva continua de 1 a 2 (Figura 60) es otra posibilidad, y el trabajo para esta trayectoria es diferente del de cualquiera de las otras.

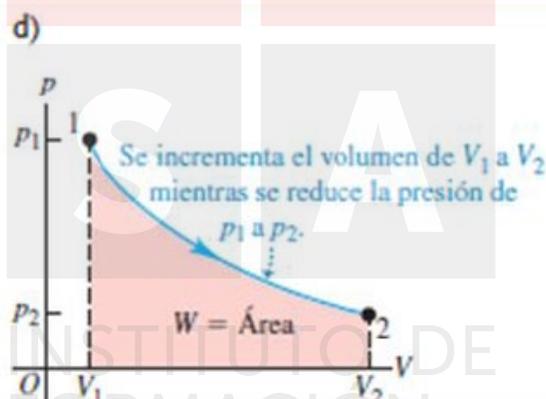


Figura 60

Concluimos que el trabajo realizado por el sistema depende no sólo del estado inicial y final, sino también de los estados intermedios, es decir, de la trayectoria.

Además, podemos llevar al sistema por una serie de estados que formen un ciclo completo, como 1 → 3 → 2 → 4 → 1. En este caso, el estado final será el mismo que el inicial, pero el trabajo total efectuado por el sistema no es cero. (De hecho, se representa en la gráfica con el área encerrada por el ciclo). Por lo tanto, no tiene sentido hablar de la cantidad de trabajo contenida en un sistema. En cierto estado, un sistema puede tener valores definidos de las coordenadas de estado p , V y T ; no obstante, sería absurdo decir que tiene un valor definido de W .

3.2. Calor agregado en un proceso termodinámico

Al igual que el trabajo, el calor agregado a un sistema termodinámico cuando cambia de estado depende de la trayectoria del estado inicial al final. Por ejemplo, suponga que nos interesa cambiar el volumen de cierta

cantidad de gas ideal de 2.0 L a 5.0 L manteniendo la temperatura en $T = 300$ K. La Figura 61 muestra dos formas diferentes de hacerlo.

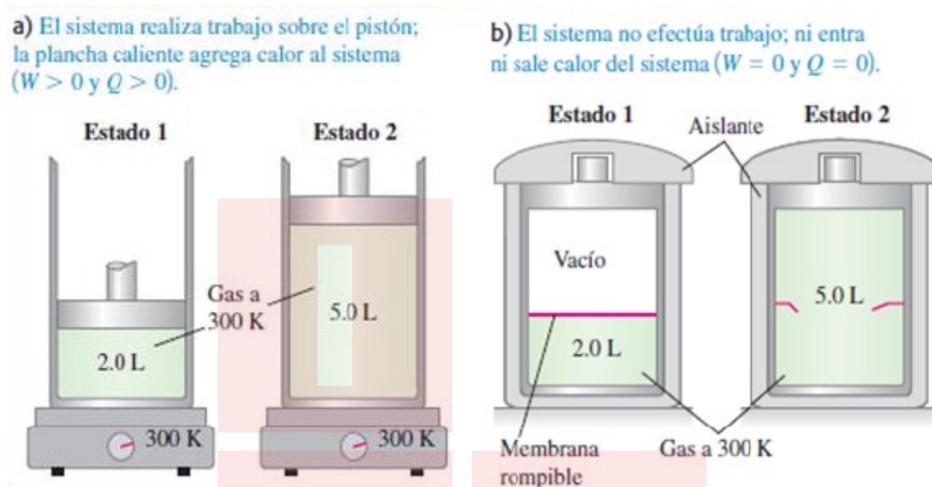


Figura 61

En la Imagen a) de la Figura 61, el gas está en un cilindro provisto de un pistón, con un volumen inicial de 2.0 L. Dejamos que el gas se expanda lentamente, suministrando calor con el calentador eléctrico para mantener la temperatura en 300 K. Después de expandirse de esta forma lenta, controlada e isotérmica, el gas alcanza su volumen final de 5.0 L, absorbiendo una cantidad definida de calor en el proceso.

La Imagen b) de la Figura 61 muestra un proceso distinto que conduce al mismo estado final. El recipiente está rodeado por paredes aislantes, y dividido por una membrana delgada rompible en dos compartimientos. La parte inferior tiene un volumen de 2.0 L, y la superior, de 3.0 L. En el compartimiento inferior colocamos la misma cantidad del mismo gas que en la Imagen a) de la Figura 61, también a 300 K. El estado inicial es el mismo que antes. Ahora rompemos la membrana; el gas sufre una expansión rápida sin control, sin que pase calor por las paredes aislantes. El volumen final es de 5.0 L, como en la Imagen a) de la Figura 61. El gas no realiza trabajo durante esta expansión porque no empuja contra algo que se mueva. Esta expansión sin control de un gas a un vacío se denomina **expansión libre**.

Se ha observado experimentalmente que, si un gas con comportamiento ideal sufre una expansión libre, no hay cambio de temperatura. Por lo tanto, el estado final del gas es el mismo que en la Imagen a) de la Figura 60. Los estados intermedios (presiones y volúmenes) durante la transición del estado 1 al 2 son muy diferentes en ambos casos; las Imágenes a) y b) de la Figura 61 representan dos trayectorias distintas que conectan los mismos estados 1 y 2. En la trayectoria de la Imagen b) de la Figura 61, no se transfiere calor al sistema, y éste no efectúa trabajo. **Al igual que el trabajo, el calor depende no sólo de los estados inicial y final, sino también de la trayectoria.** Por esta dependencia de la trayectoria, es absurdo decir que un sistema “contiene” cierta cantidad de calor. Si bien no tiene sentido hablar del “trabajo en un cuerpo” o el “calor en un cuerpo”, sí lo tiene hablar de la cantidad de energía interna en un cuerpo.

4. ENERGÍA INTERNA Y LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La materia consiste en átomos y moléculas, y éstas se componen de partículas que tienen energías cinética y potencial. **Definimos tentativamente la energía interna de un sistema como la suma de las energías cinéticas de todas sus partículas constituyentes, más la suma de todas las energías potenciales de interacción entre ellas.** Usamos el símbolo U para la energía interna. (Usamos el mismo símbolo para energía potencial en mecánica. Tenga presente que U tiene un significado distinto en termodinámica). Durante un

cambio de estado del sistema, la energía interna podría cambiar de un valor inicial U_1 a uno final U_2 . Denotamos el cambio en energía interna con $\Delta U = U_2 - U_1$. Sabemos que la transferencia de calor es transferencia de energía. Si agregamos cierta cantidad de calor Q a un sistema y éste no realiza trabajo en el proceso, la energía interna aumenta en una cantidad igual a Q ; es decir, $\Delta U = Q$. Si el sistema efectúa un trabajo W expandiéndose contra su entorno y no se agrega calor durante ese proceso, sale energía del sistema y disminuye la energía interna. Es decir, si W es positivo, ΔU es negativo, y viceversa: $\Delta U = -W$. Si hay tanto transferencia de calor como trabajo, el cambio total de energía interna es:

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W \text{ (Ec. 99)}$$

Podemos reacomodar esto así:

$$Q = \Delta U + W \text{ (Ec. 100)}$$

Puesto que W y Q pueden ser positivos, negativos o cero, ΔU puede ser positiva, negativa o cero para diferentes procesos como se ve en la Figura 62.

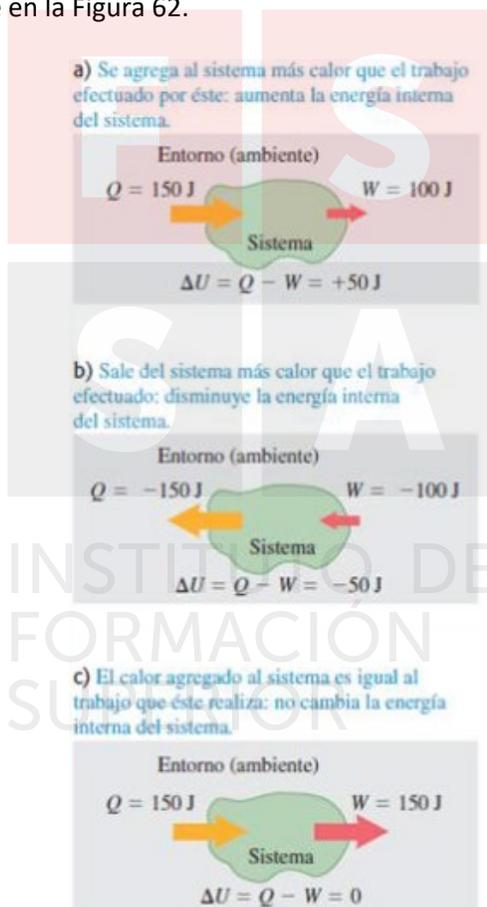


Figura 62

4.1. Comprensión de la primera ley de la termodinámica

Definimos el cambio de energía interna ΔU durante cualquier cambio de un sistema como la cantidad dada por la ecuación $\Delta U = Q - W$. Si definimos ΔU con esta ecuación entonces, cuando el sistema pase del estado 1 al 2 por dos trayectorias distintas, ¿cómo sabemos que ΔU es el mismo para las dos trayectorias? Ya vimos

que, en general, Q y W no son iguales para diferentes trayectorias. La única forma de contestar esta pregunta es experimentando. Medimos Q y W para varios materiales, cambios de estado y trayectorias, para saber si ΔU depende de la trayectoria o no. Los resultados de todas esas investigaciones son claros e inequívocos: en tanto que Q y W dependen de la trayectoria, $\Delta U = Q - W$ es independiente de la trayectoria. El cambio de energía interna de un sistema durante un proceso termodinámico depende sólo de los estados inicial y final, no de la trayectoria que lleva de uno al otro.

De esta manera, la experimentación es la justificación definitiva para creer que un sistema termodinámico en cierto estado tiene una energía interna única que depende sólo de ese estado. Un planteamiento equivalente es que la energía interna U de un sistema es función de las coordenadas de estado: p , V y T (de hecho, de cualesquiera dos de ellas, ya que las tres variables están relacionadas por la ecuación de estado).

Es correcto decir que la primera ley de la termodinámica, dada por la ecuación $\Delta U = Q - W$ representa la conservación de la energía en procesos termodinámicos.

4.2. Procesos cíclicos y sistemas aislados

Vale la pena mencionar dos casos especiales de la primera ley de la termodinámica.

Un proceso que tarde o temprano vuelve a su estado inicial es un proceso cíclico. En un proceso así, el estado final es el mismo que el inicial, así que el cambio total de energía interna debe ser cero. Entonces, $U_2 = U_1$ y $Q = W$. Si el sistema realiza una cantidad neta de trabajo W durante este proceso, deberá haber entrado en el sistema una cantidad igual de energía como calor Q . Pero no es necesario que Q o W individualmente sean cero.

Otro caso especial se da en un sistema aislado, que no realiza trabajo sobre su entorno ni intercambia calor con él. Para cualquier proceso que se efectúa en un sistema aislado: $W = Q = 0$, y por lo tanto: $U_2 = U_1 = \Delta U = 0$. En otras palabras, la energía interna de un sistema aislado es constante.

Ejemplo de un proceso cíclico: La Figura 63 es una gráfica pV para un proceso cíclico, donde los estados inicial y final son el mismo. Inicia en a y procede en sentido antihorario en la gráfica pV hasta b y vuelve a a , siendo el trabajo total $W = -500$ J. a) ¿Por qué es negativo el trabajo? b) Calcule el cambio de energía interna y el calor agregado en el proceso.

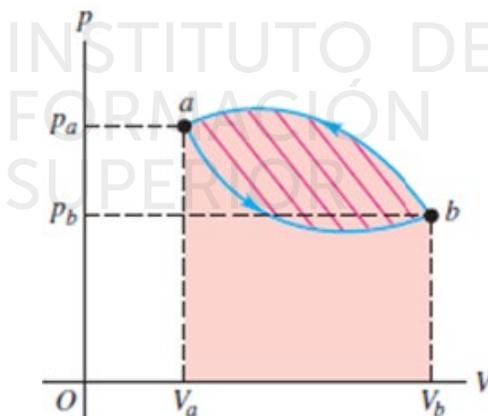


Figura 63

a) El trabajo realizado es igual al área bajo la curva, tomando el área positiva cuando aumenta el volumen, y negativa cuando disminuye. El área bajo la curva inferior de a a b es positiva, pero es menor que el del área negativa bajo la curva superior de b a a . Por lo tanto, el área neta (encerrada por la trayectoria y marcada

con diagonales rojas) y el trabajo son negativos. En otras palabras, el entorno efectúa sobre el sistema 500 joules más de trabajo, que el trabajo efectuado por el sistema.

b) En éste y en cualquier otro proceso cíclico (cuyos puntos inicial y final son el mismo), $\Delta U = 0$, así que $Q = W = -500 \text{ J}$. Es decir, deben salir 500 joules de calor del sistema.

Observemos que este ejemplo ilustra un principio general de las gráficas pV de procesos cíclicos: el trabajo total es positivo si el proceso recorre el ciclo en dirección horaria, y es negativo si el proceso recorre el ciclo en dirección antihoraria (como el caso de este ejemplo).

Ejemplo de procesos termodinámicos: La gráfica pV de la Figura 64 muestra una serie de procesos termodinámicos. En el proceso ab, se agregan 150 J de calor al sistema; en el proceso bd, se agregan 600 J. Calcule

- el cambio de energía interna en el proceso ab;
- el cambio de energía interna en el proceso abd; y
- el calor total agregado en el proceso acd.

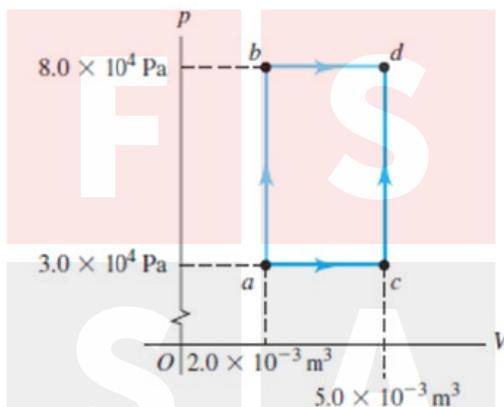


Figura 64

- No hay cambio de volumen durante el proceso ab, así que $W_{ab} = 0$ y $\Delta U_{ab} = Q_{ab} = 150 \text{ J}$.
- El proceso bd se da a presión constante, así que el trabajo efectuado por el sistema durante esta expansión es:

$$W_{bd} = p(V_2 - V_1) = 8.10^4 \text{ Pa} \cdot (5.10^{-3} \text{ m}^3 - 2.10^{-3} \text{ m}^3) = 240 \text{ J}$$

El trabajo total para el proceso abd es:

$$W_{abd} = W_{ab} + W_{bd} = 0 + 240 \text{ J} = 240 \text{ J}$$

Y el calor total es:

$$Q_{abd} = Q_{ab} + Q_{bd} = 150 \text{ J} + 600 \text{ J} = 750 \text{ J}$$

Finalmente obtenemos:

$$\Delta U_{abd} = Q_{abd} - W_{abd} = 750 \text{ J} - 240 \text{ J} = 510 \text{ J}$$

c) Dado que ΔU es independiente de la trayectoria, el cambio de energía interna es el mismo para la trayectoria acd que para la abd; es decir:

$$\Delta U_{acd} = \Delta U_{abd} = 510 \text{ J}$$

El trabajo total para la trayectoria acd es:

$$W_{acd} = W_{ac} + W_{cd} = p \cdot (V_2 - V_1) + 0 = 3 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot (5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 - 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) = 90 \text{ J}$$

Finalmente obtenemos:

$$Q_{acd} = \Delta U_{acd} + W_{acd} = 510 \text{ J} + 90 \text{ J} = 600 \text{ J}$$

Veamos una tabulación de las distintas cantidades:

Paso	Q	W	$\Delta U = Q - W$	Paso	Q	W	$\Delta U = Q - W$
ab	150 J	0 J	150 J	ac	?	90 J	?
bd	600 J	240 J	360 J	cd	?	0 J	?
abd	750 J	240 J	510 J	acd	600 J	90 J	510 J

Figura 65

Vemos que, a pesar de que ΔU es el mismo (510 J) para abd y para acd, W (240 J contra 90J) y Q (750 J contra 600 J) tienen valores muy diferentes para los dos procesos.

Observe que no tenemos suficiente información para obtener Q ni ΔU en los procesos ac y cd. No obstante, pudimos analizar el proceso compuesto acd comparándolo con el proceso abd, que tiene los mismos estados inicial y final, y para el cual poseemos información más completa.

5. TIPOS DE PROCESOS TERMODINÁMICOS

Describiremos cuatro clases específicas de procesos termodinámicos que se dan con frecuencia en situaciones prácticas y que podemos resumir como “sin transferencia de calor” o adiabáticos, “a volumen constante” o isocóricos, “a presión constante” o isobáricos, y “a temperatura constante” o isotérmicos.

Proceso adiabático

Definimos un proceso adiabático como aquel donde no entra ni sale calor del sistema: $Q = 0$. Podemos evitar el flujo de calor ya sea rodeando el sistema con material térmicamente aislante o realizando el proceso con tal rapidez que no haya tiempo para un flujo de calor apreciable. Por la primera ley, para todo proceso adiabático, $U_2 - U_1 = \Delta U = -W$.

Cuando un sistema se expande adiabáticamente, W es positivo (el sistema efectúa trabajo sobre su entorno), así que ΔU es negativo y la energía interna disminuye. Si un sistema se comprime adiabáticamente, W es negativo (el entorno efectúa trabajo sobre el sistema) y U aumenta. En muchos sistemas (aunque no en todos), el aumento de energía interna va acompañado por un aumento de temperatura; y una disminución de energía interna, de un descenso en la temperatura.

Proceso isocórico

Un proceso isocórico se efectúa a volumen constante. Si el volumen de un sistema termodinámico es constante, no efectúa trabajo sobre su entorno; por lo que $W = 0$ y $U_2 - U_1 = \Delta U = Q$.

En un proceso isocórico, toda la energía agregada como calor permanece en el sistema como aumento de energía interna. Calentar un gas en un recipiente cerrado de volumen constante es un ejemplo de proceso isocórico. Los procesos ab y cd del ejemplo de procesos termodinámicos que vimos anteriormente son también ejemplos de procesos isocóricos. (Observe que hay tipos de trabajo que no implican un cambio de volumen. Por ejemplo, efectuamos trabajo sobre un fluido agitiándolo).

Proceso isobárico

Un proceso isobárico se efectúa a presión constante. En general, ninguna de las tres cantidades: ΔU , Q y W es cero en un proceso isobárico, pero aun así es fácil calcular W por la ecuación: $W = p \cdot (V_2 - V_1)$.

Proceso isotérmico

Un proceso isotérmico se efectúa a temperatura constante. Para ello, todo intercambio de calor con el entorno debe efectuarse con tal lentitud para que se mantenga el equilibrio térmico. En general, ninguna de las cantidades ΔU , Q o W es cero en un proceso isotérmico. En algunos casos especiales, la energía interna de un sistema depende únicamente de su temperatura, no de su presión ni de su volumen. El sistema más conocido que posee esta propiedad especial es el gas ideal. En tales sistemas, si la temperatura es constante, la energía interna también lo es: $\Delta U = 0$ y $Q = W$. Es decir, toda la energía que entre en el sistema como calor Q deberá salir como trabajo W efectuado por el sistema. En casi todos los demás sistemas, la energía interna depende de la presión y de la temperatura, así que U podría variar incluso si T es constante.

La Figura 66 muestra una gráfica pV para cada uno de estos cuatro procesos con una cantidad constante de gas ideal. La trayectoria seguida en un proceso adiabático.

(a a 1) se llama adiabática. Una línea vertical (volumen constante) es una isocórica; una línea horizontal (presión constante) es una isobárica; y una curva de temperatura constante es una isoterma.

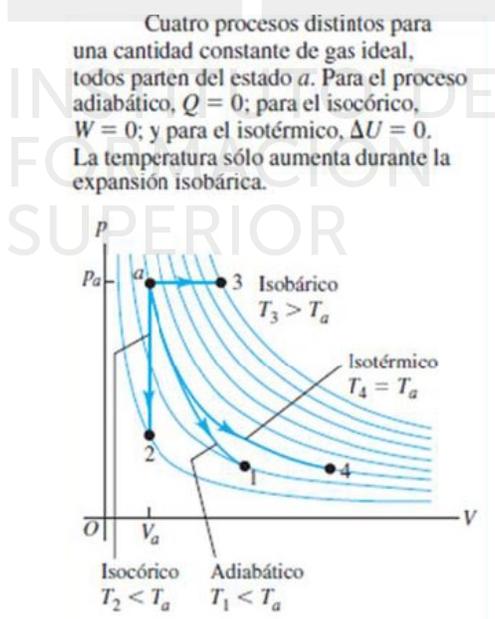


Figura 66

6. ENERGÍA INTERNA DE UN GAS IDEAL

Ahora demostraremos que, para un gas ideal, la energía interna U depende sólo de la temperatura, no de la presión ni del volumen. Consideremos de nuevo el experimento de expansión libre.

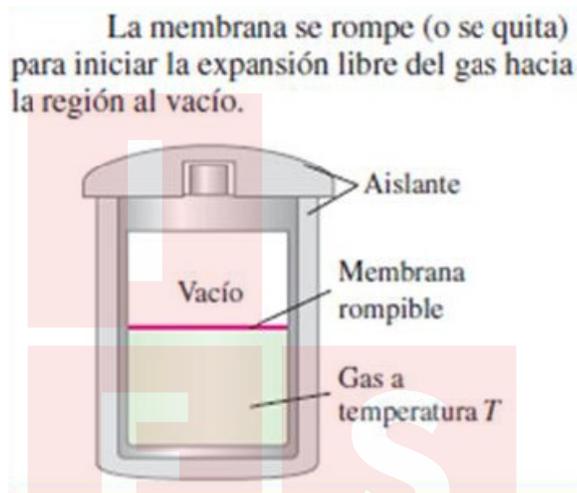


Figura 67

Un recipiente térmicamente aislado con paredes rígidas se divide en dos compartimentos usando una membrana. Un compartimiento tiene una cantidad de gas ideal; el otro está al vacío. Si la membrana se rompe o se elimina, el gas se expande para llenar ambas partes del recipiente. El gas no efectúa trabajo sobre su entorno porque las paredes del recipiente no se mueven, y no fluye calor a través del aislante. Por lo tanto, Q y W son cero, y la energía interna U es constante. Esto se cumple para cualquier sustancia, se trate de un gas ideal o no.

¿Cambia la temperatura durante una expansión libre? Supongamos que sí cambia, aunque la energía interna no lo hace. En tal caso, debemos concluir que la energía interna depende de la temperatura y el volumen, o bien de la temperatura y la presión, aunque ciertamente no sólo de la temperatura. En cambio, si T es constante durante una expansión libre, para la cual sabemos que U es constante a pesar de que tanto p como V cambian, tendremos que concluir que U depende sólo de T , no de p ni de V .

Muchos experimentos han demostrado que, cuando un gas de baja densidad sufre una expansión libre, su temperatura no cambia. Tal gas es en esencia el gas ideal.

La conclusión es que: la energía interna de un gas ideal depende sólo de su temperatura, no de su presión ni de su volumen.

En el caso de los gases que no se comportan como el gas ideal, hay cambios de temperatura durante las expansiones libres, aunque la energía interna sea constante.

Ello indica que la energía interna no puede depender sólo de la temperatura; debe depender también de la presión. Desde la perspectiva microscópica, en la que U es la suma de las energías cinéticas y potenciales de todas las partículas que constituyen el sistema, esto no es sorprendente. Los gases de comportamiento no ideal suelen tener fuerzas de atracción intermoleculares y, cuando sus moléculas se separan, aumentan las energías potenciales correspondientes. Si la energía interna total es constante, las energías cinéticas deben disminuir. La temperatura está relacionada directamente con la energía cinética molecular; por lo tanto, en un gas así, una expansión libre usualmente va acompañada de una caída en la temperatura.

7. CAPACIDAD CALORÍFICA DEL GAS IDEAL

Suele ser más fácil medir la capacidad calorífica de un gas en un recipiente cerrado en condiciones de volumen constante. La cantidad correspondiente es la capacidad calorífica molar a volumen constante, que se denota con C_V . En el caso de sólidos y líquidos, tales mediciones generalmente se realizan en la atmósfera a presión atmosférica constante, y llamamos a la cantidad correspondiente capacidad calorífica molar a presión constante, C_P . Si p y V no son constantes, tenemos un número infinito de capacidades caloríficas posibles.

Consideremos la C_V y C_P del gas ideal. Para medir C_V , elevamos la temperatura del gas ideal en un recipiente rígido de volumen constante (imagen a) de la Figura 68). Para medir C_P , dejamos que el gas se expanda apenas lo suficiente como para mantener la presión constante al aumentar la temperatura (Imagen b) de la Figura 68).

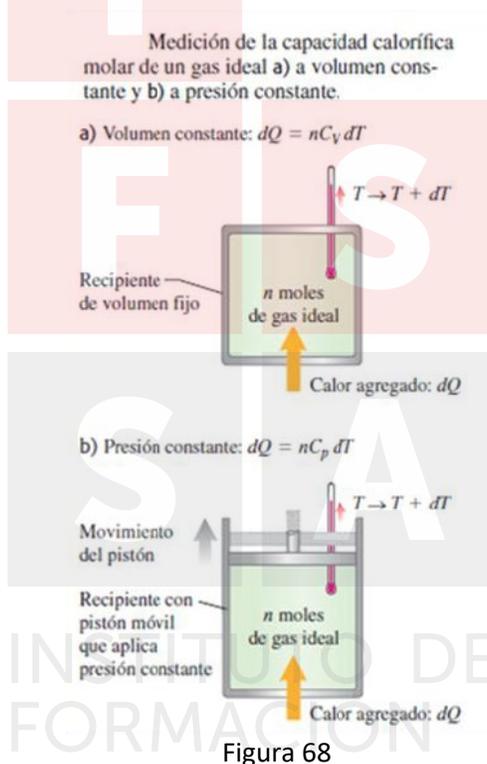


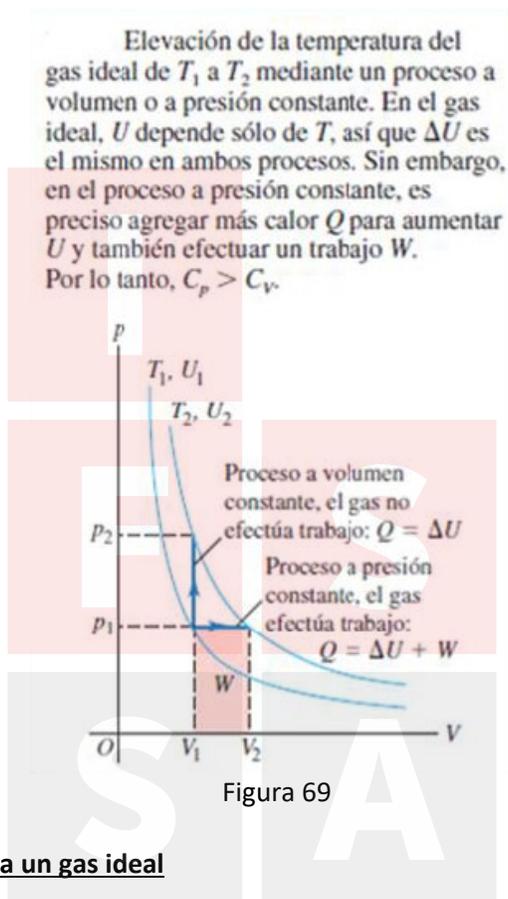
Figura 68

¿Por qué son diferentes estas dos capacidades caloríficas molares? La respuesta está en la primera ley de la termodinámica. En un aumento de temperatura con volumen constante, el sistema no efectúa trabajo y el cambio de energía interna ΔU es igual al calor agregado Q . En un aumento de temperatura a presión constante, en cambio, el volumen debe aumentar; si no, la presión (dada por la ecuación de estado del gas ideal, $p = nRT/V$) no se podría permanecer constante. Al expandirse el material, realiza un trabajo W . Según la primera ley:

$$Q = \Delta U + W \quad (Ec. 101)$$

Para un aumento de temperatura dado, el cambio de energía interna ΔU de un gas con comportamiento ideal tiene el mismo valor sin importar el proceso (recuerde que la energía interna del gas ideal sólo depende de la temperatura, no de la presión ni del volumen). La ecuación $Q = \Delta U + W$ indica entonces que el

suministro de calor en un proceso a presión constante debe ser mayor que en uno a volumen constante, porque se requiere energía adicional para el trabajo W realizado durante la expansión. Así, C_p del gas ideal es mayor que C_v . La gráfica pV de la Figura 69 muestra esta relación.



7.1. Relación entre C_p y C_v para un gas ideal

$$C_p = C_v + R \text{ (Ec. 102)}$$

Como lo anticipamos, la capacidad calorífica molar del gas ideal a presión constante es mayor que a volumen constante; la diferencia es la constante de los gases R . (Desde luego, R debe expresarse en las mismas unidades que C_p y C_v , como $J/(\text{mol} \cdot K)$).

Se usa el modelo del gas ideal para deducir la ecuación $C_p = C_v + R$, pero resulta que muchos gases reales a presiones moderadas se ajustan a él con muy poco error. En la tabla que sigue se dan valores medidos de C_p y C_v para varios gases reales a baja presión; la diferencia en casi todos los casos es aproximadamente el valor de R .

Capacidades caloríficas molares de gases a baja presión

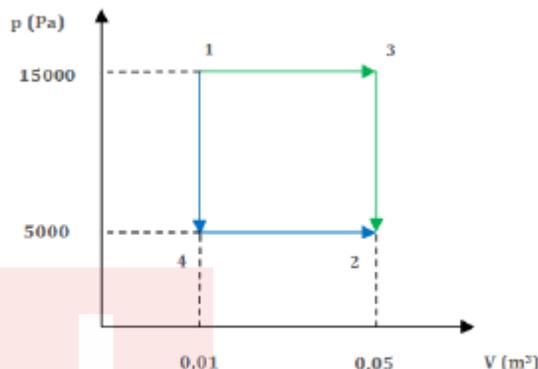
Tipo de gas	Gas	C_V (J/mol·K)	C_p (J/mol·K)	$C_p - C_V$ (J/mol·K)	$\gamma = C_p/C_V$
Monoatómico	He	12.47	20.78	8.31	1.67
	Ar	12.47	20.78	8.31	1.67
Diatómico	H ₂	20.42	28.74	8.32	1.41
	N ₂	20.76	29.07	8.31	1.40
	O ₂	20.85	29.17	8.31	1.40
	CO	20.85	29.16	8.31	1.40
Poliatómico	CO ₂	28.46	36.94	8.48	1.30
	SO ₂	31.39	40.37	8.98	1.29
	H ₂ S	25.95	34.60	8.65	1.33

Figura 70

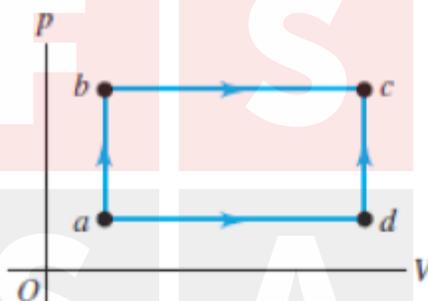


8. EJERCICIOS PROPUESTOS

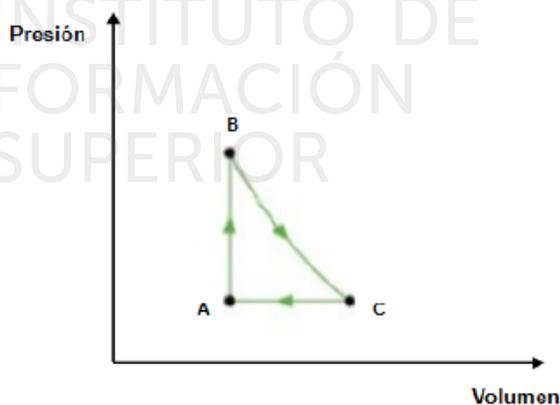
- ¿Cuál es el incremento en la energía interna de un sistema si se le suministran 700 calorías de calor y se le aplica un trabajo de 900 Joule?
- Un gas contenido en un cilindro provisto de un pistón, se comprime en un proceso en el que se mantiene la presión constante, cuyo valor es 80000 Pa y se produce una disminución de 0,02 m³ en el volumen. Si la energía interna del gas aumenta en 400 J, determinar:
 - El trabajo que se realiza sobre el gas.
 - El calor cedido o absorbido por el gas.
- Un gas se comprime a una presión constante de 0,8 atm de 0,009 m³. En el proceso, 400 J de energía salen del gas por calor. Dato: 1 atm=101325 Pa.
 - ¿Cuál es el trabajo realizado sobre e gas?
 - ¿Cuál es el cambio en la energía interna?
- En un proceso se hacen 220 J de trabajo sobre un sistema durante el cual se extraen 70 cal de calor. Calcule en Joule: W, Q y ΔU.
- En la siguiente figura se muestra un diagrama pV para dos proceso diferentes a los que se somete un gas contenido dentro de un cilindro para llevarlo del estado 1 al estado 2. Si en ambos casos la energía interna aumenta en 200 J, determinar el calor absorbido por el sistema en cada proceso.



6. Un sistema termodinámico se lleva del estado a al estado c de la siguiente figura siguiendo la trayectoria abc, o bien, la trayectoria adc. Por la trayectoria abc, el trabajo W efectuado por el sistema es de 450 J. Por la trayectoria adc, W es de 120 J. Las energías internas de los cuatro estados mostrados en la figura son: $U_a=150\text{J}$, $U_b=240\text{J}$, $U_c=680\text{J}$ y $U_d=330\text{J}$. Calcule el flujo de calor Q para cada uno de los procesos: ab, bc, ad y dc. En cada proceso ¿el sistema absorbe o desprende calor?

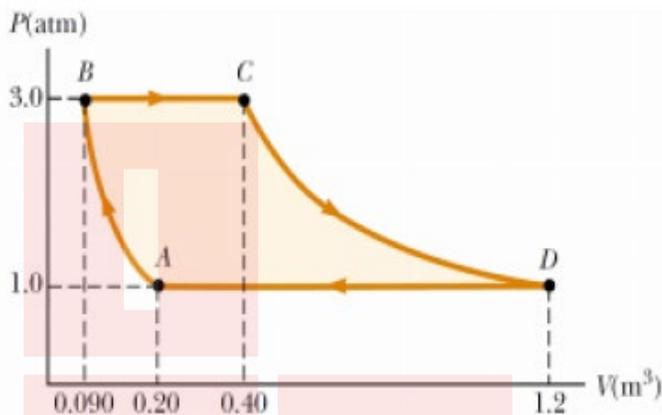


7. Un gas pasa por el proceso ABC como semuestra en la figura. Determinar el calor transferido durante el proceso CA si el calor añadido durante AB es 20 Joule, no se transfiere calor durante BC y el trabajo neto durante el ciclo es 15 Joule.



8. Un gas es comprimido a una presión constante de 810600 Pa. De 0,009 m³ a 0,002 m³. En el proceso, 400 Joule de energía térmica salen del gas.
- ¿Cuál es el trabajo efectuado por el gas?
 - ¿Cuál es el cambio en su energía interna?

9. Una muestra de gas ideal lleva a cabo el proceso mostrado en la figura siguiente. De A hasta B el proceso es adiabático; de B a C este isobárico y fluyen 100000 Joule de calor hacia el sistema. De C a D, el proceso es isotérmico y de D hasta A es isobárico con 150000 Joule de energía transferida fuera del sistema en forma de calor. Determine la diferencia de energía interna del sistema entre B y A ($U_A - U_B$).



9. RESULTADOS

1. $\Delta U = 3830,2 \text{ J}$
2. a) $W = -1600 \text{ J}$; b) $Q = -1200 \text{ J}$
3. a) $W = -729,54 \text{ J}$; b) $\Delta U = 329,54 \text{ J}$
4. $\Delta U = 52,56 \text{ J}$
5. $Q_{132} = 700 \text{ J}$; $Q_{142} = 400 \text{ J}$
6. $Q_{ab} = 540 \text{ J}$; $Q_{bc} = 440 \text{ J}$; $Q_{ad} = 300 \text{ J}$; $Q_{dc} = 350 \text{ J}$
7. $Q_{ca} = -5 \text{ J}$
8. a) $W_{12} = 5674,2 \text{ J}$; $\Delta U_{12} = -6074,2 \text{ J}$
9. $U_a - U_b = -48675 \text{ J}$

ANEXO



GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD I

1. ¿Qué estudia la estática?
2. ¿Cuándo una partícula se encuentra en equilibrio estático?
3. ¿Qué estudia la cinemática?
4. Nombre los 3 movimientos posibles. Expresar sus ecuaciones y la gráfica que representa su movimiento.
5. ¿Qué estudia la dinámica?
6. Enuncie las 3 Leyes de Newton.
7. Enuncie el Teorema del Trabajo y la Energía.

GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD II

1. ¿Cómo calcularía la densidad de un fluido? Indique unidades.
2. Defina densidad relativa.
3. ¿Qué es el peso específico de un fluido?
4. Defina presión de un fluido. Indique unidades.
5. Enuncie el Principio de Pascal. Escriba su ecuación.
6. ¿Cómo calcularía la presión en un elevador hidráulica?
7. Indique la diferencia entre presión absoluta, manométrica y atmosférica.
8. Describa los instrumentos de medición de presión.
9. Enuncie el Principio de Arquímedes.
10. Indique la expresión para calcular el empuje aplicado a un cuerpo sumergido en un fluido.
11. ¿Qué es la tensión superficial?
12. ¿Qué es el menisco?
13. Indique diferencia entre cohesión y adhesión.
14. Defina capilaridad.

GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD III

1. Defina fluido ideal.
2. Enuncie la Ley de continuidad. Indique su ecuación
3. ¿Qué es el caudal?
4. Enuncie la ecuación de Bernoulli. Indique el significado de cada incógnita.
5. ¿Cuándo es válida la ecuación de Bernoulli?
6. ¿Qué es el Tubo Venturi?
7. Indique como se calcula la velocidad a la entrada del Tubo Venturi.
8. Defina flujo laminar y turbulento.
9. ¿Qué es el número de Reynolds? Indique su expresión.
10. ¿Qué valor del número de Reynolds limita los diferentes tipos de flujos?
11. Define viscosidad de un fluido.
12. Defina flujo viscoso.

13. Exprese la Ecuación de la Energía para un fluido real.
14. Indique la Ecuación para calcular las pérdidas de carga por viscosidad.
15. ¿Cómo calcularía las perdidas localizadas en una tubería?
16. Defina flujo compresible.

GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD IV

1. Expansión volumétrica:
 - a. ¿Cómo varia el volumen de un material en función al cambio de temperatura?
 - b. ¿Qué es la constante β ? Indique unidades.
 - c. Si el material es sólido, ¿cómo puede calcularse β ? Indique que representa cada variable.
 - d. Exprese la ecuación que determina el cambio de volumen en función del cambio de temperatura. Nombre cada variable e indique sus unidades.
3. Explique cómo varia el volumen del agua en función de la temperatura. ¿Qué sucede con la densidad de la misma?
4. Esfuerzo térmico:
 - a. ¿Cuándo se manifiestan los esfuerzos térmicos?
 - b. ¿Cuál es la ecuación que define el esfuerzo térmico producido en un material? Nombre sus variables e indique sus unidades.
 - c. ¿qué es el módulo de Young?
5. Cantidad de calor
 - a. ¿Qué diferencia hay entre flujo de calor y calor?
 - b. ¿Qué observó James Joules al calentar el agua por medio de agitación vigorosa?
 - c. ¿Cómo define caloría? ¿cuánto equivale 1 cal en Joules?
 - d. ¿De qué depende la cantidad de calor adicionada o emitida?
 - e. Exprese la ecuación del calor requerido para cambiarla temperatura de una masa m . Indique nombre de las variables y sus unidades.
 - f. ¿Qué es la capacidad calórica molar? Exprese su ecuación indicando nombres de las variables y sus unidades.
 - g. Reescriba la ecuación de calor requerido en función a la capacidad molar.
6. Calorimetría y cambio de fase
 - a. ¿Qué significa calorimetría?
 - b. ¿Qué es la fase de una materia? ¿Cuáles son?
 - c. ¿Qué es el cambio de fase de una materia? ¿Bajo qué condiciones se produce? ¿Qué cambios tiene la materia durante un cambio de fase?
 - d. ¿Qué es el calor latente? ¿De qué depende? Indique su unidad.
 - e. Exprese la ecuación del calor de fusión. Indique nombre de las variables, sus unidades y cuando se debe considerar positivo y cuando negativo.
 - f. ¿Qué es el calor de vaporización? ¿Cuándo es positivo y negativo?
7. Mecanismos de transferencia de calor
 - a. Indique y explique los diferentes mecanismos de transferencia de calor.
 - b. De 2 ejemplos (no usar los del cuadernillo)
8. Modelo cinético- molecular del gas ideal
 - a. Enumere los supuesto del modelo cinético- molecular del gas ideal
 - b. Según el modelo Cinético-Molecular, ¿ a qué se debe la presión ejercida por un gas?

- c. ¿Cuál es la ecuación que representa la energía cinética media y la presión debido a n moléculas? Indique nombre de las variables y sus unidades.
- d. Según el modelo Cinético-Molecular, ¿a qué se debe la temperatura de un gas?
- e. ¿Cuál es la ecuación que representa la temperatura? Indique nombre de las variables y sus unidades.
- f. Expresé las ecuaciones de la capacidad calórica molar de un gas ideal monoatómico y diatómico.

GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD V

1. ¿A qué se denomina Gas?
2. Enuncie la Ley de Boyle. Explique que se sucede con la presión si aumenta o disminuye el volumen del gas. Grafique P en función a V .
3. Enuncie la Ley de Charles y Gay-Lussac. Explique que se sucede con la presión si aumenta o disminuye la temperatura del gas. Grafique P en función a T .
4. Enuncie la Ley de Avogadro. Explique que se sucede con el volumen de un gas si aumenta o disminuye el número de moles. Grafique P en función a T .
5. Expresé la ecuación de los gases ideales, indique nombre de las variables y sus unidades. ¿De dónde proviene dicha ecuación?
6. ¿Qué establece la Ley de Dalton de las presiones Parciales?
7. ¿Qué es el factor de compresibilidad?
8. ¿Qué es la ecuación de Van Der Waals? Expresé su ecuación.

GUÍA DE ESTUDIO UNIDAD VI

1. ¿Qué es un sistema termodinámico?
2. Indicar cuando es considerado el trabajo (W) y el calor (Q) positivo y negativo en un sistema termodinámico.
3. ¿Qué sucede con el trabajo (W) y el calor (Q) si se cambia la trayectoria usada para ir del estado inicial al final?
4. Enunciar la primera Ley de la Termodinámica.
5. ¿Qué diferencia hay entre un proceso aislado y uno cíclico?
6. ¿Cuáles son los diferentes procesos termodinámicos? Explíquelos.
7. ¿Qué sucede con la energía interna de un gas ideal?