



INSTITUTO DE
FORMACIÓN
SUPERIOR

UNIDAD N°4

Mecánica de los Fluidos

TECNICATURA SUPERIOR EN PETRÓLEO 2022



INDICE

1

UNIDAD IV.....	4
ENERGÍA INTERNA, TEMPERATURA Y CALOR.....	4
1. TEMPERATURA Y EQUILIBRIO TÉRMICO	4
1.1. Ley cero de la termodinámica	5
2. TERMÓMETROS Y ESCALAS DE TEMPERATURA	6
3. TERMÓMETROS DE GAS Y LA ESCALA KELVIN.....	7
3.1. La escala Kelvin y temperatura absoluta.....	8
4. EXPANSIÓN O DILATACIÓN TÉRMICA.....	9
4.1. Expansión lineal.....	9
4.2. Expansión de volumen	11
4.3. Expansión térmica del agua	12
4.4. Esfuerzo térmico	13
5. CANTIDAD DE CALOR.....	14
5.1. Calor específico	15
5.2. Capacidad calorífica molar	16
6. CALORIMETRÍA Y CAMBIOS DE FASE.....	17
6.1. Cambios de fase	17
7. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	19
Conducción.....	19
Convección	19
Radiación	19
8. MODELO CINÉTICO-MOLECULAR DEL GAS IDEAL	20
8.1. Modelo Molecular de la presión de un Gas Ideal	20
8.2. Interpretación Molecular de la Temperatura	20
9. CAPACIDADES CALORÍFICAS DE LOS GASES	21



OBJETIVOS

2

Comprender el concepto de energía interna, temperatura y calor.

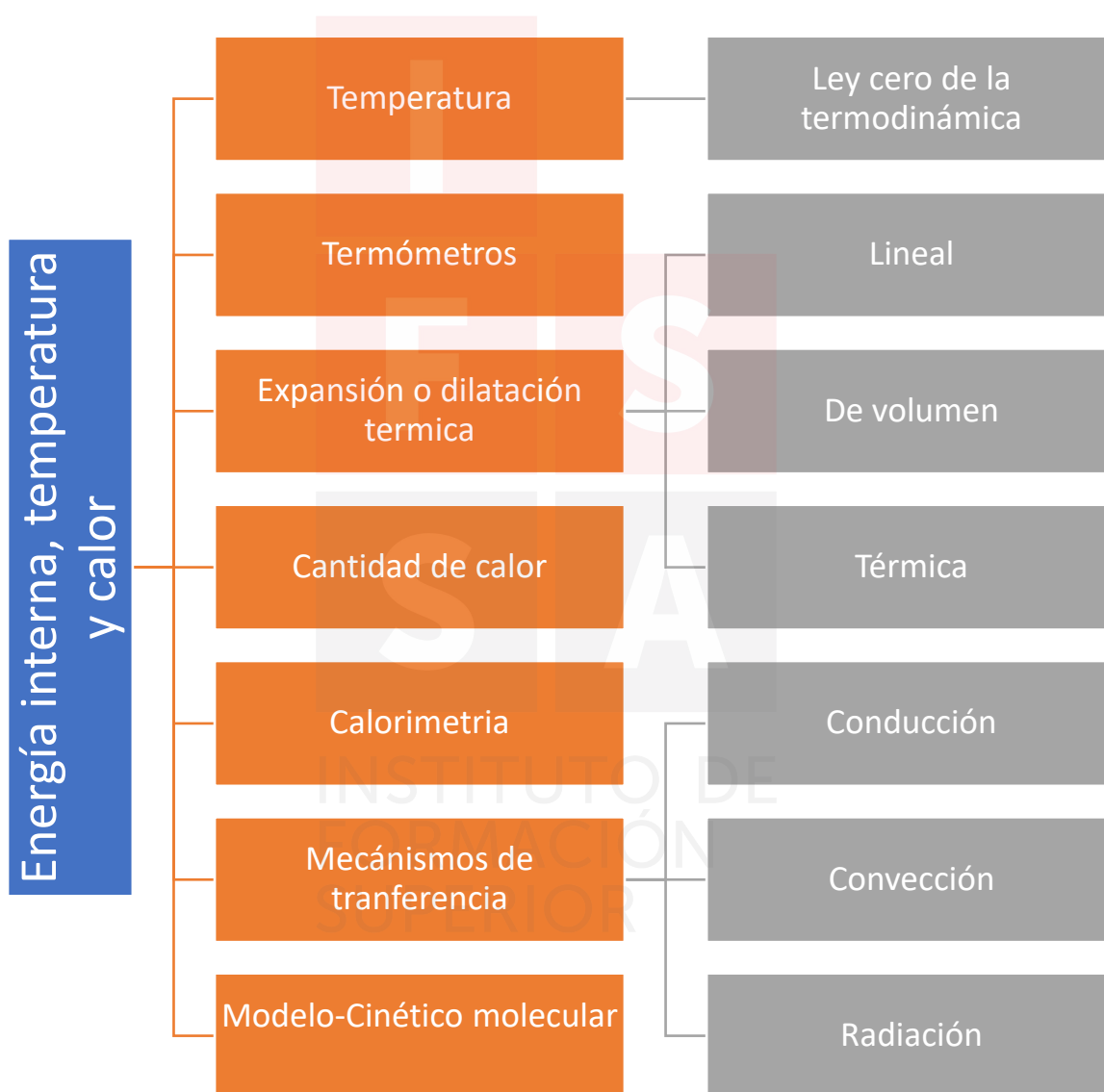
OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Entender la Ley cero de la termodinámica. Analizar los diferentes instrumentos de medición de la temperatura.
- Comprender los fenómenos de expansión lineal, de volumen y térmico.
- Analizar los cambio de fase de un material teniendo el cuenta el fenómeno de calorimetría.
- Diferenciar los diferentes mecanismos de tranferencia de calor en un cuerpo.

INSTITUTO DE
FORMACIÓN
SUPERIOR



ESQUEMA DE CONTENIDOS





CONTENIDOS

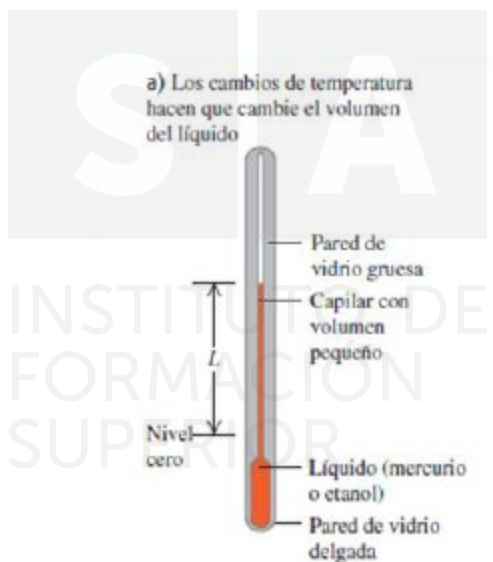
UNIDAD IV

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.



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.

Los cambios de temperatura hacen que cambie la presión del gas



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 , p , 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.

6

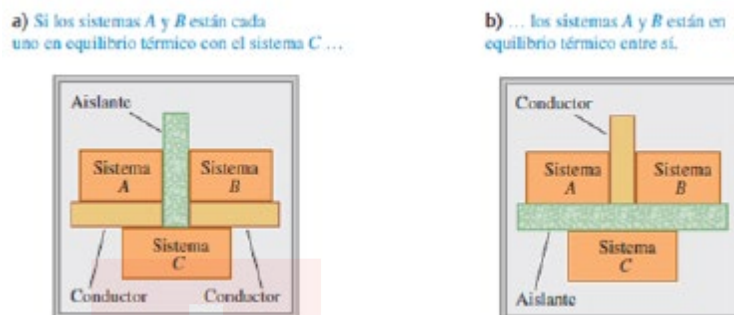


Figura 34

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.

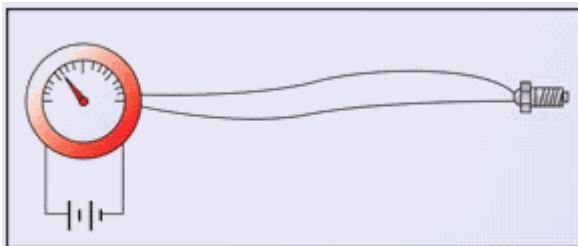


Figura 36: Termómetro de Resistencia.

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:

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

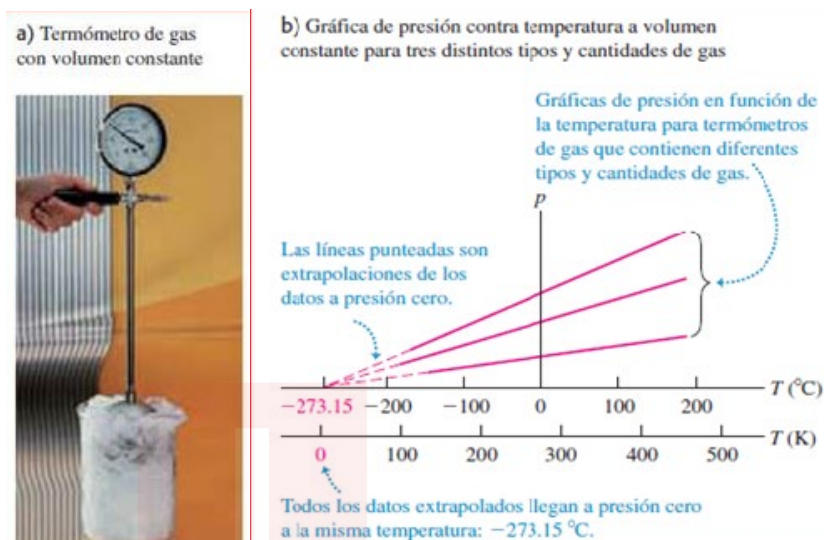


Figura 37: Termómetro de gas con volumen constante y gráficas de Presión en función de la Temperatura

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

Resolución:

Primero convertiremos las temperaturas Fahrenheit a Celsius:

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

$$T_2 = \frac{5}{9} \cdot (98.6^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}) = 37^{\circ}\text{C}$$

Ahora obtenemos las temperaturas en Kelvin:

$$T_1 = 0^{\circ}\text{C} + 273.15 = 273.15 \text{ K}$$

$$T_2 = 37^{\circ}\text{C} + 273.15 = 310.15 \text{ K}$$

La diferencia de temperatura es:

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

$$\Delta T = T_2 - T_1 = 310.15 \text{ K} - 273.15 \text{ K} = 37 \text{ K}$$

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 T_1 y T_2 en la escala Kelvin, como el cociente de las presiones correspondientes de termómetro de gas p_1 y p_2 :

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

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.

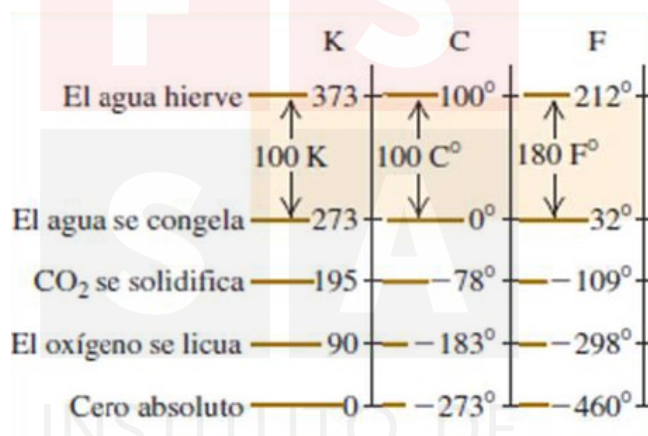


Figura 38: Relación entre las tres escalas.

La escala Kelvin se denomina **escala de temperatura absoluta** y su cero [$T = 0\text{ K} = -273.15^\circ\text{C}$, 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°C), ΔL es directamente proporcional a ΔT .

10

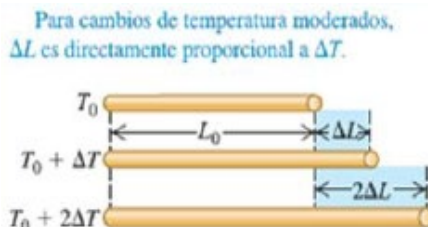


Figura 39: Expansión térmica en una barra.

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 .

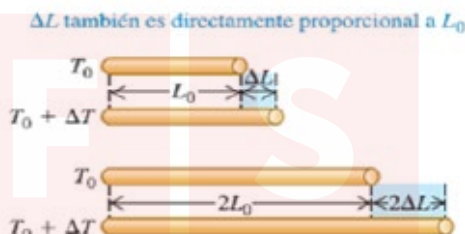


Figura 40: Expansión térmica en 2 barras del mismo material y distinta longitud.

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

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

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

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

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	$\alpha \text{ [K}^{-1} \text{ o } (^\circ\text{C})^{-1}]$
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:

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

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

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

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 cm³ 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 x 10⁻⁵ 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 β_{mercurio} = 18 x 10⁻⁵ K⁻¹ (tomado de la tabla) y el valor de β para este tipo de vidrio lo obtenemos con la ecuación con la ecuación β = 3α.

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 Vf 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:

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

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.

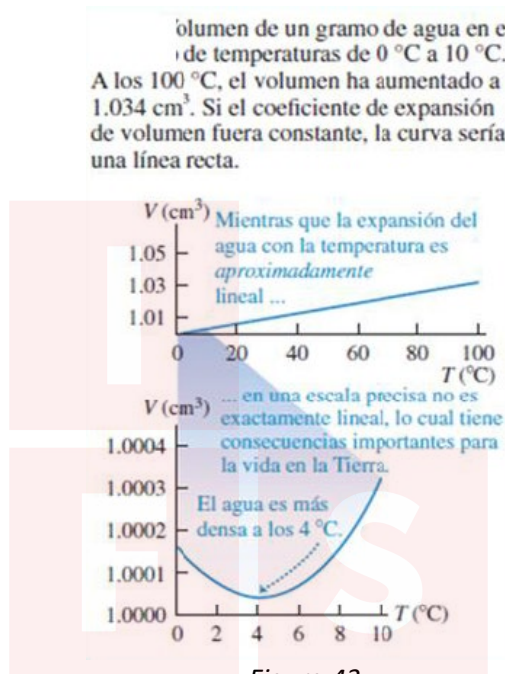


Figura 43

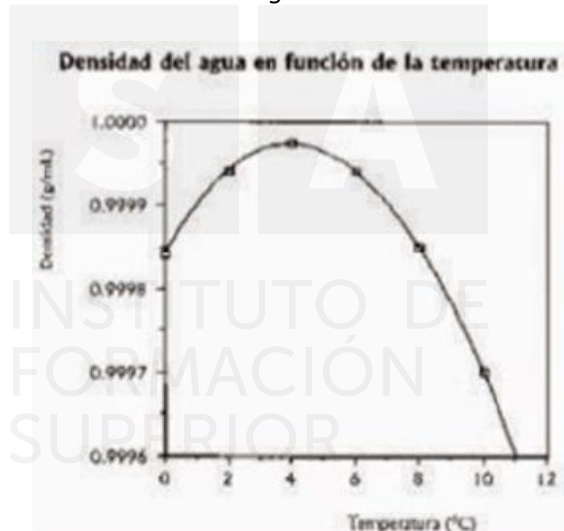


Figura 44

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:

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

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 $17,2^\circ\text{C}$, el cilindro apenas se desliza entre las paredes. Si se calienta a $22,3^\circ\text{C}$, ¿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 $\Delta T = 22,3^\circ\text{C} - 17,2^\circ\text{C} = 5,1^\circ\text{C} = 5,1 \text{ K}$. 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.

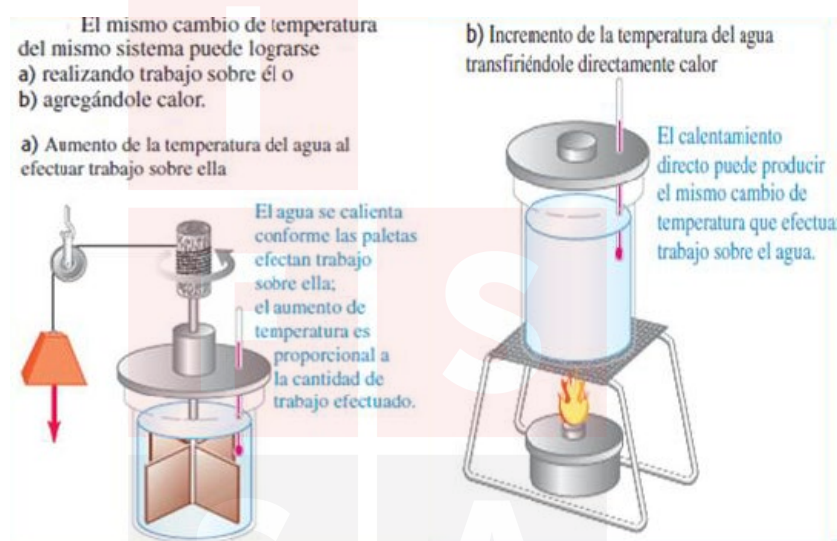


Figura 46

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 T1 a T2 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:

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

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.

16

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 $18,0 \text{ g/mol} = 18,0 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$; un mol de agua tiene una masa de $18,0 \text{ g} = 0,0180 \text{ kg}$. 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 x 10⁵ 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 flama 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.

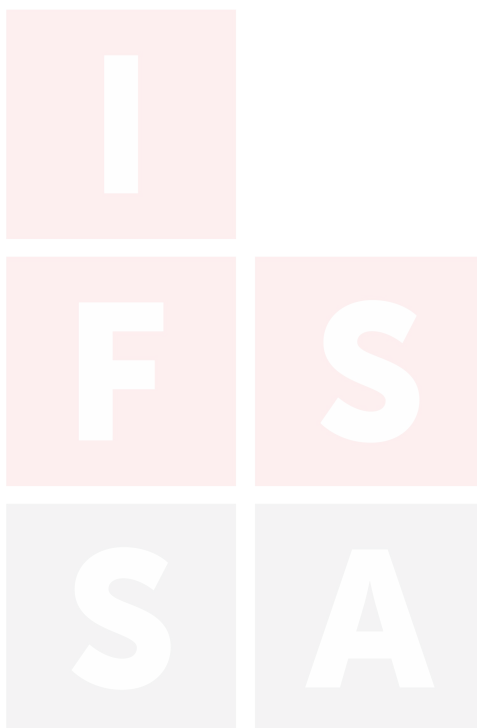
Esto simplemente significa que diferentes gases a la misma temperatura tendrán igual energía cinética media por molécula.

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:

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

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



INSTITUTO DE
FORMACIÓN
SUPERIOR



AUTOEVALUACION

- 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 gr de agua, ambos a 25°C. ¿qué cantidad de calor se requiere para elevar la temperatura hasta 80°C?. Datos : $c_{\text{hierro}} = 470 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}$ y $c_{\text{H}_2\text{O}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}$
- 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: $L_{\text{fusión hielo}} = 80 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$; $L_{\text{vap agua}} = 540 \frac{\text{cal}}{\text{g}}$; $c_{\text{hielo}} = 2114 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}$; $c_{\text{agua}} = 4181 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}}$
- ¿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:

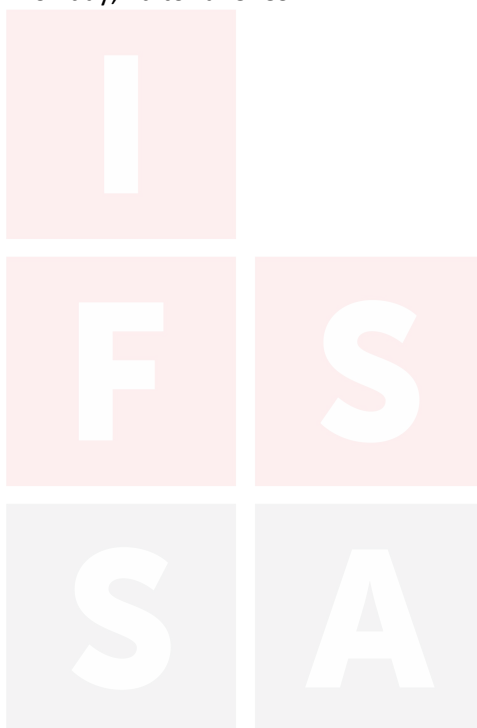
- Convertir las siguientes temperaturas en escala Kelvin a °C y °F:
 - 400 K

- b. 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?



BIBLIOGRAFIA

- Física Universitaria, volumen 1, Sears-Zemansky, Editorial Addison Wesley Iberoamericana.
- Física, tomo I, Tipler, editorial Reverté.
- Física 1 y 2, Resnick-Holliday, Editorial CECSA.



INSTITUTO DE
FORMACIÓN
SUPERIOR

RESPUESTA DE LA AUTOEVALUACION

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. $Q_v = 162000 \text{ cal}$

