



Unidad 3

Calor – Intercambio de Calor

Temperatura:

Definición genérica:

“Del latín *temperatura*, la temperatura es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura).”

La temperatura está relacionada con la energía interior de los sistemas termodinámicos, de acuerdo al movimiento de sus partículas, y cuantifica la actividad de las moléculas de la materia: a mayor energía sensible, más temperatura.”

Definición RAE:

1. Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad de medida del sistema internacional es el kelvin (K).
2. Estado de calor del cuerpo humano o de los seres vivos.

Calor:

Definición genérica:

“El calor es aquello que siente un ser vivo ante una temperatura elevada. La física entiende el calor como la energía que se traspa de un sistema a otro o de un cuerpo a otro, una transferencia vinculada al movimiento de moléculas, átomos y otras partículas.”

En este sentido, el calor puede generarse a partir de una reacción química (como la combustión), una reacción nuclear (como aquellas que se desarrollan dentro del Sol) o una disipación (ya sea mecánica, fricción, o electromagnética, microondas).

Es importante tener en cuenta que los cuerpos no tienen calor, sino energía interna. Cuando una parte de esta energía se transfiere de un sistema o cuerpo hacia otro que se halla a distinta temperatura, se habla de calor. El traspa de calor se producirá hasta que los dos sistemas se sitúen a idéntica temperatura y se alcance el denominado equilibrio térmico.”

Definición RAE:

1. Sensación que se experimenta ante una elevada temperatura. En And. y algunos lugares de América
2. Temperatura alta. Una ola de calor sahariano.
3. Ardimiento, actividad, ligereza.
4. Favor, buena acogida.
5. Entusiasmo, vehemencia, cariño. Se crio falto de calor.
6. Lo más fuerte y vivo de una acción.
7. Fís. Energía que pasa de un cuerpo a otro y que causa la dilatación y los cambios de estado de estos.



Transferencia de calor

Es obvio que si querés hacer un café vas a necesitar agua caliente y que si te compras un helado es porque querés comer algo frío. Es habitual decir que en invierno hace frío y en verano calor, pero ¿Cuál es el significado de los términos “caliente” o “frío”? ¿Qué quiere decir “hace frío” o “Hace calor”? Los términos “calor” y “frío” o expresiones como “hace calor” o “hace frío” se pueden asociar a las diferencias de temperatura y a la manera en que nuestro cuerpo percibe la temperatura.

En líneas generales, se puede decir que la sensación de “frío” se percibe cuando nuestro cuerpo entrega energía al medio, haciendo transferencia de calor, de la misma manera, cuando nuestro cuerpo recibe transferencia de calor del ambiente (un día de sol y elevada temperatura) la sensación que tenemos es de “calor”.

En el siglo XVIII el calor era concebido como un tipo de fluido invisible que pasa de los cuerpos calientes a los fríos. En el presente sabemos que el calor es una forma de energía que pase de un cuerpo a otro, más precisamente del cuerpo de mayor temperatura al de menor.

La temperatura en principio se podría definir como un indicador de cuán frío o caliente está un cuerpo. Para explicar el significado de este indicador, consideremos que la materia se compone de moléculas que vibran, rotan o se desplazan. Desde esta perspectiva, la temperatura de un cuerpo es la medida de su agitación molecular.

En nuestra vida cotidiana, para medir la temperatura se usa la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), en la que se considera 0°C a la temperatura de fusión del agua y 100°C a la de ebullición.

Conversiones de temperatura.

El grado Celsius, más propiamente Celsius,¹ (históricamente conocido como centígrado; símbolo $^{\circ}\text{C}$) es la unidad termométrica cuyo 0 se ubica 0,01 grados por debajo del punto triple del agua y su intensidad calórica equivale a la del kelvin.

Anders Celsius definió su escala en 1742 considerando las temperaturas de ebullición y de congelación del agua, asignándoles originalmente los valores 0°C y 100°C , respectivamente (de manera que más caliente resultaba en una menor temperatura); fueron Jean-Pierre Christin (1743) y Carlos Linneo (1745) quienes invirtieron ambos puntos más tarde. Nota 1 El método propuesto, al igual que el utilizado en 1724 para el grado Fahrenheit, tenía la ventaja de basarse en las propiedades físicas de los materiales. Los intervalos de temperatura expresados en $^{\circ}\text{C}$ y en Kelvins tienen el mismo valor.

La escala de Celsius es muy utilizada para expresar las temperaturas de uso cotidiano, desde la temperatura del aire a la de un sinnúmero de dispositivos domésticos (hornos, freidoras, agua caliente, refrigeración, etc.). También se emplea en trabajos científicos y tecnológicos, aunque en muchos casos resulta obligado el uso de la escala de Kelvin.

William Thomson Kelvin (Lord Kelvin), a sus 24 años introdujo la escala de temperatura termodinámica, y la unidad fue nombrada en su honor. El kelvin (K), es la unidad de temperatura creada sobre la base del grado Celsius, estableciendo el punto cero en el cero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$) y conservando la misma dimensión.

Coincidiendo el incremento en un grado Celsius con el de un kelvin, su importancia radica en la temperatura de 0 K denominada 'cero absoluto' y corresponde al punto en el que las moléculas y átomos de un sistema tienen la mínima energía térmica posible. Ningún sistema macroscópico puede tener una temperatura inferior. A la temperatura medida en kelvin se le llama

"temperatura absoluta", y es la escala de temperaturas que se usa en ciencia, especialmente en trabajos de física o química.

El grado Fahrenheit (°F) es una escala de temperatura propuesta por Daniel Gabriel Fahrenheit en 1724. La escala establece como las temperaturas de congelación y ebullición del agua, 32 °F y 212 °F, respectivamente. El método de definición es similar al utilizado para el grado Celsius (°C).

Se denomina Rankine (símbolo R) a la escala de temperatura que se define midiendo en grados Fahrenheit sobre el cero absoluto, por lo que carece de valores negativos. Esta escala fue propuesta por el físico e ingeniero escocés William Rankine en 1859.

De	a	Fórmula
Fahrenheit	Celsius	$C = \frac{(F - 32)}{1,8}$
Celsius	Fahrenheit	$F = 1,8C + 32$
Fahrenheit	Kelvin	$K = \left[\frac{(F - 32)}{1,8} \right] + 273,15 = \frac{(F + 459,67)}{1,8}$
Kelvin	Fahrenheit	$F = 1,8.(K - 273,15) + 32 = \frac{9}{5}.K - 459,67$
Fahrenheit	Rankine	$Ra = F + 459,67$
Rankine	Fahrenheit	$F = Ra - 459,67$
Kelvin	Celsius	$C = K - 273,15$

13.2 Transmisión del calor

❖ **Conducción.** Suponga que una persona sostiene uno de los extremos de una barra metálica, y que el otro extremo se pone en contacto con una flama (Fig. 13-3a). Los átomos o moléculas del extremo calentado por la flama, adquieren una mayor energía de agitación. Parte de esta energía se transfiere a las partículas de la región más próxima a dicho extremo, y entonces la temperatura de esta región también aumenta. Este proceso continúa a lo largo de la barra (Fig. 13-3b), y después de cierto tiempo, la persona que sostiene el otro extremo percibirá una elevación de temperatura en ese lugar.

Por tanto, hubo una transmisión de calor a lo largo de la barra, que continuará mientras exista una diferencia de temperatura entre ambos extremos. Observemos que esta transmisión se debe a la agitación de los átomos de la barra, transferida sucesivamente de uno a otro átomo, sin que estas partículas sufran ninguna traslación en el interior del cuerpo. Este proceso de transmisión de calor se denomina *conducción térmica*.

La mayor parte del calor que se transfiere a través de los cuerpos sólidos, es transmitida de un punto a otro por conducción.

Dependiendo de la constitución atómica de una sustancia, la agitación térmica podrá transmitirse de uno a otro átomo con mayor o menor

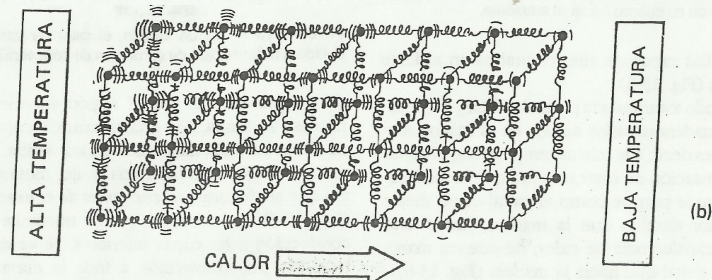
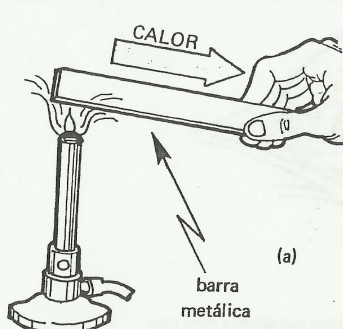


FIGURA 13-3 El calor se transmite por conducción a lo largo de un sólido, debido a la agitación de los átomos y las moléculas del sólido.

facilidad, haciendo que tal sustancia sea buena o mala conductora del calor. Así, por ejemplo, los metales son *conductores térmicos*, mientras que otras sustancias, como unicel, corcho, porcelana, madera, aire, hielo, lana, papel, etc., son aislantes térmicos, es decir, malos conductores de calor.

❖ **Comentarios.** Como se sabe, la temperatura del cuerpo humano normalmente se mantiene en unos 36°C , mientras que la del ambiente es, en general, menor que el valor. Por este motivo, hay una continua transmisión de calor de nuestro cuerpo hacia el medio circundante. Si la temperatura de éste se mantiene baja, dicha transmisión se efectúa con mayor rapidez, y esto nos provoca la sensación de frío. Las prendas de abrigo atenúan esta sensación porque están hechas de materiales aislantes térmicos (por ejemplo, la lana), y reducen así la



FIGURA 13-5 Un pájaro eriza sus plumas para mantener aire entre ellas, con lo cual evita la transferencia de calor de su cuerpo hacia el ambiente.

entre ellas capas de aire, el cual es un aislante térmico (Fig. 13-5).

Cuando tocamos una pieza de metal y un pedazo de madera situados ambos en el mismo ambiente, es decir, a la misma temperatura, el metal da la sensación de estar más frío que la madera. Esto sucede porque como el metal es un mejor conductor térmico que la madera, habrá una mayor transferencia de calor, de nuestra mano hacia el metal que hacia la madera (Fig. 13-6).

❖ **Convección.** Cuando un recipiente con agua es colocado sobre una flama, la capa de agua del fondo recibe calor por conducción. Por consiguiente, el volumen de esta capa aumenta, y por tanto su densidad disminuye, haciendo que se desplace hacia la parte superior del recipiente para ser reemplazada por agua más fría y más



FIGURA 13-6 Aun cuando un trozo de metal y uno de madera se encuentren a la misma temperatura, la pieza metálica parece estar más fría.

cantidad de calor que se transmite de nuestro cuerpo al exterior (Fig. 13-4). A ello se debe que para obtener este mismo efecto, las aves erizan sus plumas en los días de frío, a fin de mantener

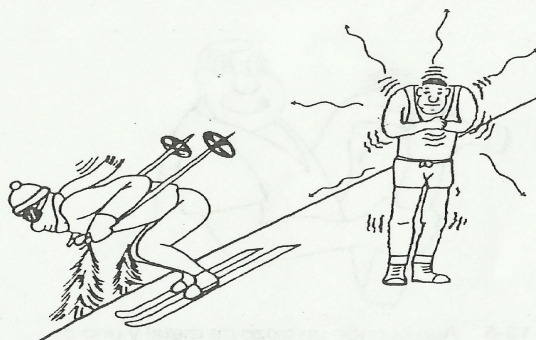


FIGURA 13-4 Las personas sienten frío cuando ceden rápidamente calor hacia el ambiente.

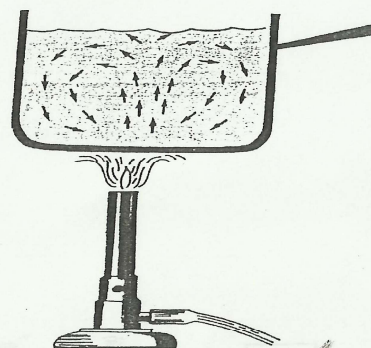


FIGURA 13-7 En un líquido, el calor se transmite debido a la formación de corrientes de convección.

densa, proveniente de tal región superior. El proceso continúa, con una circulación continua de masas de agua más caliente hacia arriba, y de masas de agua más fría hacia abajo, movimientos que se denominan *corrientes de convección* (Fig. 13-7). Así, el calor que se transmite por conducción a las capas inferiores, se va distribuyendo por convección a toda la masa del líquido, mediante el movimiento de traslación del propio líquido.

La transferencia de calor en los líquidos y gases puede efectuarse por conducción, pero el proceso de convección es el responsable de la mayor parte del calor que se transmite a través de los fluidos.

❖ **Comentarios.** En nuestra vida diaria podemos encontrar casos en los que las corrientes de convección desempeñan un papel importante. La formación de los vientos que, como vimos en el estudio de la dilatación, se debe a variaciones en la densidad del aire, no es más que el resultado de las corrientes de convección que se producen en la atmósfera.

En los refrigeradores también se observa la formación de corrientes de convección. En la parte superior, las capas de aire que se encuentran en contacto con el congelador, le ceden calor por conducción. Debido a esto, el aire de esta región se vuelve más denso y se dirige hacia la parte inferior del refrigerador, mientras las capas de aire que ahí se encuentran se desplazan hacia

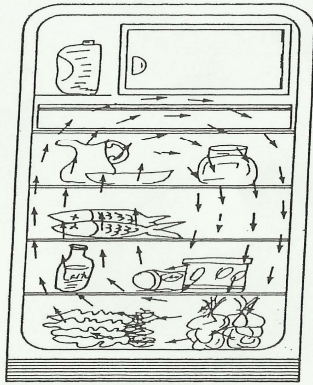


FIGURA 13-8 En el interior de los refrigeradores se forman corrientes de convección.

arriba (Fig. 13-8). Esta circulación de aire causada por la convección, hace que la temperatura sea aproximadamente igual en todos los puntos del interior del refrigerador.

En algunos casos, el calentamiento del agua para uso doméstico se efectúa en estufas de leña, donde se aprovecha el fenómeno de la convección. El agua fría, proveniente de un depósito elevado circula a través de un serpentín colocado en el interior de un fogón (Fig. 13-9). Al recibir calor, el agua caliente se vuelve menos densa y asciende al depósito por otro tubo, como se observa en la Figura 13-9. Por ejemplo, este proceso todavía se emplea en casas antiguas o fincas rurales.

❖ **Radiación.** Suponga que un cuerpo caliente (por ejemplo, una lámpara eléctrica) se coloca en el interior de una campana de vidrio, donde se hace el vacío (Fig. 13-10). Un termómetro, situado en el exterior de la campana, indicará una elevación de temperatura, mostrando que existe transmisión de calor a través de vacío que hay entre el cuerpo caliente y el exterior. Evidentemente, esta transmisión no pudo haberse efectuado por conducción ni por convección, pues estos procesos sólo pueden ocurrir cuando hay un medio material a través

algún otro cuerpo, provocan en él un aumento de temperatura. Estas radiaciones, así como las ondas de radio, la luz, los rayos X, etc., son ondas electromagnéticas capaces de propagarse en el vacío, y las cuales estudiaremos más adelante.

De manera general, el calor que recibe una persona cuando está cerca de un cuerpo caliente, llega hasta ella por los tres procesos: conducción, convección y radiación. Cuanto mayor sea la temperatura del cuerpo caliente, tanto mayor será la cantidad de calor transmitida por radiación, como sucede cuando uno se halla cerca de un horno o una fogata.

❖ **Comentarios.** Cuando la radiación incide en un cuerpo, parte de ella se absorbe y parte se refleja. Los cuerpos oscuros absorben la mayor parte de la radiación que incide en ellos. Es por esto que en un objeto negro puesto al Sol, su temperatura es considerablemente más elevada. Por otra parte, los cuerpos claros reflejan casi en su totalidad la radiación térmica incidente, y por ello, en los climas calurosos las personas suelen usar ropa blanca (Fig. 13-11).

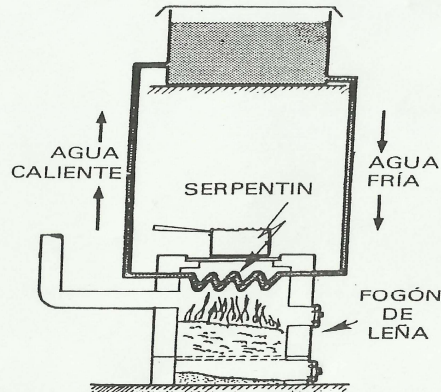


FIGURA 13-9 En casas donde hay estufas de leña, el calentamiento del agua se hace en serpentines, donde circula por convección.

del cual se pueda transferir el calor. En este caso, la transmisión de calor se lleva a cabo mediante otro proceso, denominado *radiación térmica*. El calor que nos llega del Sol se debe a este mismo proceso, ya que entre el Sol y la Tierra existe un vacío.

Todos los cuerpos calientes emiten radiaciones térmicas que cuando son absorbidas por

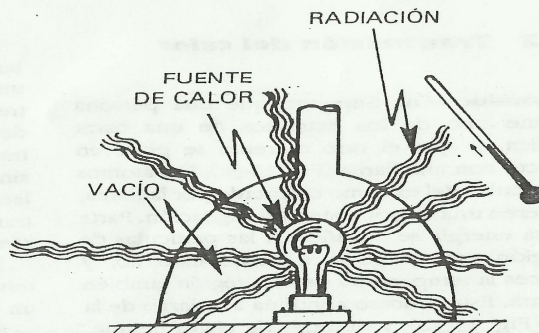


FIGURA 13-10 El calor se propaga en el vacío por radiación.



FIGURA 13-11 Un cuerpo oscuro absorbe mayor cantidad de radiación térmica que un cuerpo claro.

C.1 Transferencia de calor estudio cuantitativo

En la Sección 13.2 se realizó un estudio cualitativo de la transferencia de calor de un cuerpo, a cierta temperatura, hacia otro en una temperatura inferior que el primero. Hemos visto que esa transferencia puede hacerse por *conducción*, *convección* y *radiación* y no nos preocupamos, en aquella sección, por determinar el valor de la cantidad de calor transferida en cada caso. Aquí vamos a mostrar cómo ese valor puede calcularse para los casos de *conducción* y de *radiación*.

Consideremos dos cuerpos mantenidos a temperaturas fijas T_1 y T_2 , tales que $T_2 > T_1$. Si se unen estos cuerpos mediante una barra de sección uniforme de área A y de longitud L (Fig. C-1), habrá conducción de calor a través de la barra, del cuerpo más caliente hacia el más frío, como podíamos prever. Sea ΔQ la cantidad de calor que pasa por una sección cualquiera de la barra, durante un intervalo Δt . El cociente $\Delta Q/\Delta t$ se denomina *flujo de calor* a través de dicha sección, magnitud que vamos a representar con la letra griega ϕ (fi), es decir,

$$\phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Si la barra de a Figura C-1 estuviera envuelta por un aislante térmico, se comprobaría que después de cierto tiempo alcanza una situación denominada *régimen estacionario*, que se ca-



FIGURA C-1 En una barra aislada, el calor se transfiere por conducción.

razaría por tener un flujo de calor del mismo valor en cualquier sección de la barra. En consecuencia, la temperatura de un punto cualquiera de la barra alcanza un valor que no se altera a través del tiempo. En nuestro estudio vamos a trabajar siempre con barras que conducen calor en régimen estacionario.

Se comprueba experimentalmente que el flujo de calor ϕ es:

1. Directamente proporcional al área A de la sección recta de la barra, es decir, $\phi \propto A$.
 2. Directamente proporcional, a diferencia de la temperatura entre los extremos de la barra, es decir, $\phi \propto (T_2 - T_1)$.
 3. Inversamente proporcional a la longitud de la barra, es decir, $\phi \propto 1/L$.
- Podemos escribir entonces:

$$\phi \propto A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Introduciendo la constante de proporcionalidad K , se obtiene

$$\phi = K A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

La constante K es característica del material de que está hecha la barra y se denomina *conductividad térmica* de la sustancia. En la Tabla C-1 se representan los valores de conductividad térmica de algunas materiales. Cuanto mayor sea el valor de K , mayor es el flujo de calor que la barra conduce y, por tanto, mejor conductora

de calor será la sustancia de que está hecha la barra.

TABLA C-1

Sustancia	Conductividad térmica K , $\text{cal/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
Aluminio	4.9×10^{-2}
Cobre	9.2×10^{-2}
Plomo	8.3×10^{-3}
Plata	9.9×10^{-2}
Acero	1.1×10^{-2}
Aire	5.7×10^{-6}
Hidrógeno	3.3×10^{-6}
Asbesto	2.0×10^{-5}
Vidrio	2.0×10^{-4}
Concreto	2.0×10^{-4}
Madera	2.0×10^{-5}
Corcho	1.0×10^{-5}

Observación: Los gases están en condiciones normales de temperatura y presión.

◊ EJEMPLO 1

Una barra de aluminio de longitud $L = 80$ cm y de sección recta $A = 200$ cm², entre uno de sus extremos introduciendo en un recipiente con agua hirviendo (ver Fig. C-2). El otro extremo de la barra está, en el aire ambiente, a 20°C.

a) Determine el flujo de calor (ϕ) que se transfiere a través de la barra para el aire ambiente. Suponiendo el régimen estacionario, sabemos que el flujo de calor por conducción está dado por la ecuación

$$\phi = K A \frac{T_2 - T_1}{L}$$

En la Tabla C-1 encontramos la conductividad térmica del aluminio:

$$K = 4.9 \times 10^{-2} \text{ kcal/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

Observese que el valor de K está expresado utilizando el metro como unidad de longitud. Por tanto, los valores de A y L deben expresarse en esta unidad, es decir:

$$L = 80 \text{ cm} = 80 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A = 200 \text{ cm}^2 = 200 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

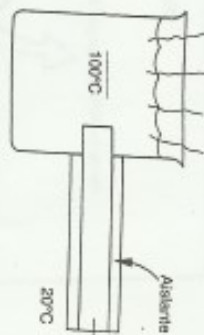


FIGURA C-2 Para el Ejemplo 1.

En consecuencia

$$\phi = 4.9 \times 10^{-2} \times 200 \times 10^{-4} \times \frac{(100 - 20)}{80 \times 10^{-2}}$$

donde $\phi = 9.8 \times 10^{-2}$ kcal/s

La unidad obtenida en esa respuesta resulta de la combinación de unidades de cada magnitud presente en la ecuación que proporciona ϕ :

$$\frac{\text{kcal}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \times \text{m}^2 \times \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}} = \frac{\text{kcal}}{\text{s}}$$

Como 1 kcal = 1 kilocaloría = 10^3 cal, se obtiene

$$\phi = 9.8 \times 10^{-2} \times 10^3 \text{ cal/s} = 98 \text{ cal/s}$$

b) ¿Cuál es en watts la potencia térmica P que está siendo transferida a través de la barra hacia el aire? Evidentemente, el flujo ϕ es la propia potencia transferida, expresada en cal/s. Suponiendo que 1 cal = 4.2 J, tenemos:

$$\phi = P = 98 \times 4.2 \text{ J/s}$$

donde $P = 411 \text{ J/s} = 411 \text{ W}$

Observe, sólo con fines de comparación, que esta potencia equivale aproximadamente a la potencia emitida por 4 focos de 100 W.

c) Suponiendo que la situación descrita en la pregunta (a) se mantenga invariable durante 10 minutos, calcule, en calorías, la cantidad total de calor transfiriendo al aire durante ese tiempo.

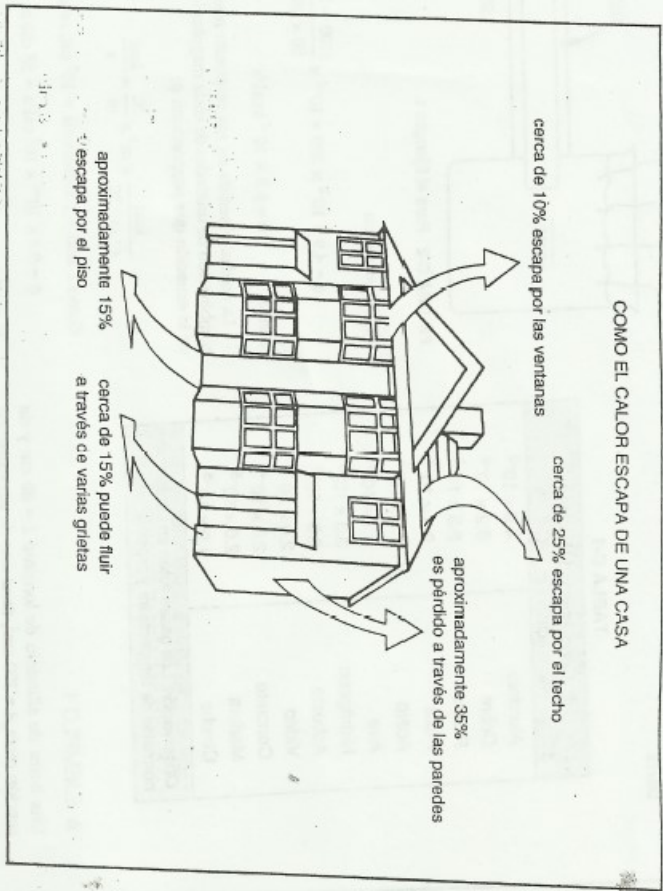
De $\phi = \Delta Q/\Delta t$, obtenemos $\Delta Q = \phi \cdot \Delta t$. Tenemos:

$$\Delta t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$$

Por tanto

$$\Delta Q = \phi \Delta t = 98 \frac{\text{cal}}{\text{s}} \times 600 \text{ s} = 58800 \text{ cal}$$

donde $\Delta Q = 5.9 \times 10^4 \text{ cal}$



❖ **Radiación.** Ya hemos visto que la transferencia de calor por conducción y por convección exigen la presencia de un medio material. La radiación, al contrario, puede efectuarse a través del espacio vacío y es por ello que la radiación emitida por el Sol llega a la Tierra. Sin embargo, se sabe que cualquier cuerpo puede emitir radiaciones térmicas, sin ser necesario que su temperatura sea tan alta como la del Sol. Por ejemplo, una plancha caliente emite una cantidad apreciable de radiación (Fig. C-3a), como es fácil comprobar si ponemos una mano a cierta distancia de su superficie (recuérdese que el aire es mal conductor de calor). El cuerpo humano mismo emite radiaciones que pueden detectarse con una cámara fotográfica provista de películas especiales sensibles a esas radiaciones (Fig. C-3b)

Cuando cierta cantidad de energía radiante incide en un cuerpo (Fig. C-4), parte de ella es absorbida por el cuerpo, otra parte es transmitida a través de él y la parte restante se refleja. En la Figura C-4 esas partes están representadas por las flechas a , b y r . Como se mencionó en la Sección 13.2, los cuerpos oscuros absorben una porción mayor de la radiación que incide en ellos, mientras que los cuerpos claros y lisos reflejan la mayor parte de la radiación incidente. Además, se comprobó experimentalmente que los cuerpos que presentan gran poder de absorción son también buenos emisores y viceversa. Por esta razón, un cuerpo ideal, capaz de absorber toda la radiación que incide en él, sería también un emisor de eficiencia máxima. En otras palabras, el absorbente ideal sería el cuerpo que a una temperatura dada emitiera una tasa de radiación (por unidad de área) mayor que la de cualquier otro cuerpo. Todo emisor o absorbente ideal se denomina *cuerpo negro*. Esa denominación se debe al hecho de que (como

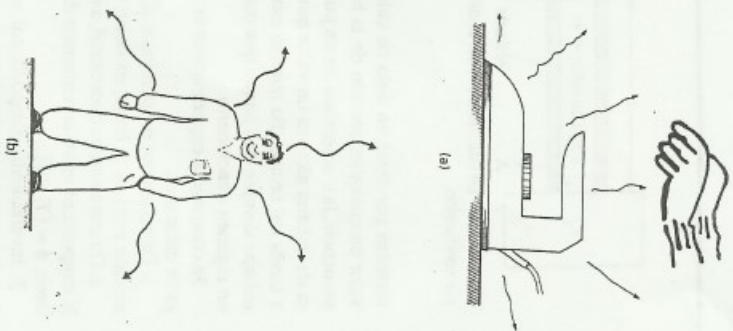


FIGURA C-3 Cualquier cuerpo emite radiaciones térmicas (infrarrojo).

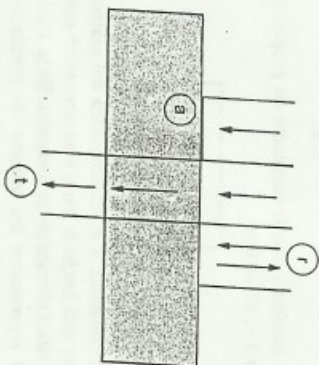


FIGURA C-4 Cuando un cuerpo recibe energía radiante, ésta puede ser reflejada, absorbida o transmitida por él.

veremos al estudiar Óptica) aparecería negro: observado, ya que no refleja radiación alguna. No obstante, debe señalarse que este cuerpo negro parecería negro si estuviera en una temperatura tal que se volviera emisor de radiaciones visibles.

❖ **Ley de Stefan-Boltzmann.** Consideremos un cuerpo cuya superficie externa tenga un área A , que emite a través de ella una radiación total de potencia P (energía irradiada por unidad de tiempo, por toda la superficie). Se denomina *radiación* o *poder emisor* R del cuerpo, a la relación

$$R = \frac{P}{A}$$

Evidentemente, la unidad de medida de esta magnitud en el SI es 1 W/m^2 . Vemos entonces, que el valor de R en el SI, representa la cantidad de energía en joules, emitida por segundo, en cada metro cuadrado de la superficie del cuerpo.

En la segunda mitad del siglo XIX, los científicos austriacos J. Stefan y L. Boltzmann obtuvieron (el primero experimentalmente y el segundo de manera teórica) un resultado referente a los cuerpos negros, denominado *ley de Stefan-Boltzmann*, cuyo enunciado es el siguiente:

$$R_{\text{em}} \propto T^4 \quad \text{o} \quad R_{\text{em}} = \sigma T^4$$

La constante de proporcionalidad σ (letra griega "sigma") se denomina constante de Stefan-Boltzmann y su valor en el SI es

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Cualquier emisor no ideal, es decir, un cuerpo real cualquiera, tendrá a una temperatura dada una radiación R menor que la del cuerpo negro.

Josef Stefan (1835-1893). Físico austriaco cuyo trabajo más importante se refiere al comportamiento de los cuerpos negros, llegó a la conclusión de que la energía irradiada por ellos es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura Kelvin. Fue profesor de física en la Universidad de Viena y más tarde ocupó la dirección del Instituto de Física de esa universidad. Cinco años después de haber llegado en forma empírica a la ley de la radiación del cuerpo negro, ésta fue deducida teóricamente por su colega L. Boltzmann, otro destacado físico austriaco. Por ese motivo, la ley mencionada recibió el nombre de ley de Stefan-Boltzmann.

O sea, $R < R_K$. Se define, entonces, *emisividad*, e , de un cuerpo cualquiera, de la siguiente manera:

$$e = \frac{R}{R_K} \quad \text{donde } R = eR_K$$

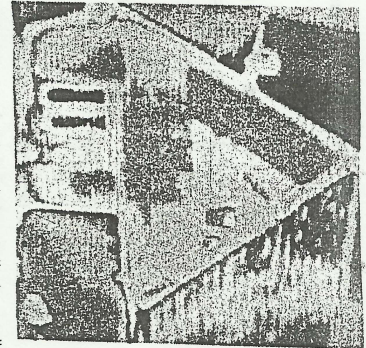
donde

$$R_K = e \sigma T^4$$

Con esta ecuación podemos calcular la radiación de un cuerpo cualquiera cuando conocemos su temperatura y su emisividad.

Evidentemente, para un cuerpo negro tenemos $e = 1$ y para un reflector ideal, o sea, un cuerpo que no emite radiación alguna, tenemos $e = 0$. Otros cuerpos tendrán emisividad comprendida entre esos límites. Por ejemplo: para el acero pulido se tiene $e = 0,07$, para el cobre pulido, $e = 0,3$; para una pintura metálica negra, $e = 0,97$, etcétera.

❖ **Comentario.** La ecuación $R = e\sigma T^4$ nos muestra que la cantidad de radiación emitida por un cuerpo aumenta muy rápidamente a medida que su temperatura se eleva. Se comprueba, además, que el tipo de radiación también se altera: a temperaturas más bajas, hasta las proximidades de 1 000 K, la mayor parte de las radiaciones emitidas son invisibles; cuando la temperatura del cuerpo alcanza cerca de 2 000 K, gran parte de ellas es visible y la tonalidad del emisor se vuelve anaranjada; en las proximidades de 3 000 K (temperatura del filamento



Fotografía de una casa, tomada con película sensible a la radiación infrarroja. Las partes que aparecen en colores amarillo, rojo y rosa son las que están emitiendo este tipo de radiación con mayor intensidad.

de una lámpara incandescente) el cuerpo adquiere tonalidad amarillenta; a 6 500 K (temperatura de la superficie del Sol), el cuerpo emite luz con tonalidad blanca intensa; finalmente, arriba de 10 000 K (temperatura de algunas estrellas muy calientes), el color del cuerpo emisor se vuelve azul.

◆ EJEMPLO 2

a) Un objeto a una temperatura T_1 está en un ambiente a temperatura T_2 . El objeto emite radiaciones al ambiente y absorbe radiaciones por éste. Siendo e la emisividad y A el área del objeto, determine la potencia térmica líquida (diferencia entre el flujo emitido y el flujo absorbido) irradiada por él.

De la expresión $R = \frac{P}{A}$ se obtiene

$$P = R \cdot A \quad \text{o bien} \quad P = e \sigma AT^4$$

Entonces, el objeto emite una potencia

$$P_1 = e \sigma AT_1^4$$

Como hemos visto, la capacidad de absorción de un cuerpo es igual a su capacidad de emisión. Esto significa que el coeficiente e que caracteriza la emisividad de un determinado cuerpo es el mismo coeficiente e que caracteriza su absorción. Por tanto, la potencia absorbida por el objeto estará dada por

$$P_2 = e \sigma AT_2^4$$

Por consiguiente, la potencia líquida irradiada por el objeto es

$$P = P_1 - P_2 \quad \text{o bien} \quad P = e \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

b) Una persona, sin ropa, está de pie en una sala cuyas paredes se hallan a una temperatura de 15°C. Se sabe que el área de la superficie de su cuerpo es $A = 1,5 \text{ m}^2$ y que la temperatura de su piel es de 34°C (la piel presenta siempre una temperatura un poco inferior que la del interior del cuerpo). Considerando la emisividad de la piel $e = 0,70$, determine la potencia líquida irradiada por la persona.

$$\text{Tenemos } T_1 = 273 + 34 = 307 \text{ K} \\ T_2 = 273 + 15 = 288 \text{ K}$$

Entonces, utilizando el resultado obtenido en la pregunta (a), se obtiene:

$$P = 0,70 \times 5,67 \times 10^{-8} \times 1,5 (307^4 - 288^4)$$

donde

$$P = 120 \text{ W}$$

De modo general, una persona en reposo produce calor, por el metabolismo, con una potencia inferior a 120 W. Por tanto, en las condiciones del ejemplo, la temperatura de la persona, en virtud de la irradiación y de otras pérdidas de calor, tenderá a bajar, lo que le causará considerables molestias. Su organismo reacciona a estas molestias y empieza a temblar, lo que ocasiona un aumento en la tasa metabólica para compensar la pérdida y mantener estable la temperatura de su cuerpo. Evidentemente, el uso de ropa o abrigo, al disminuir las pérdidas de calor, puede evitar dicho malestar.

NOTA CONVECCIÓN

El fenómeno de las corrientes de convección también puede ser usado por algunas aves (cómo los Códorres) para volar planeando y por quienes practican aladeltismo, parapente, planeadores, etc. El físico inglés Isaac Newton (1642 – 1727) estudió las formas en que se produce la propagación del calor y, a partir de sus experiencias, determinó una ley experimental que las explica. Se conoce como la ley de enfriamiento de Newton. Esta ley establece que: El flujo de calor (por cualquier forma de propagación) es proporcional, en forma aproximada, a la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el medio externo, siempre y cuando la diferencia de temperaturas no sea demasiado grande. La expresión matemática de la ley de enfriamiento de Newton en una propagación por convección es:



$$\frac{Q}{t} = \alpha \cdot A \cdot (T - T_0)$$

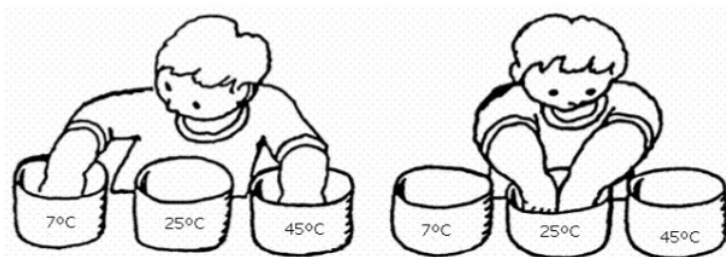
donde T es la temperatura de la fuente de calor, T₀ la temperatura inicial del fluido, A es el área de contacto entre la fuente y el fluido, y α es el coeficiente de convección de calor, característico de cada sustancia.

Esta ley es válida tanto para el calentamiento de un líquido como para su enfriamiento al dejarlo, por ejemplo, a temperatura ambiente.



Ejercitación

- 1) Los conceptos subjetivos de frío y caliente. Por tres recipientes con agua, uno debe ser agua caliente (cuidado de no quemarse), otro con agua enfriada (con hielo o dejándola en el freezer un tiempo) y una a temperatura intermedia entre ambas.
Coloca ambas manos a la vez en dos de los recipientes (el de menor y el de mayor temperatura) y permanezca en esta posición por 3 minutos. Luego introduzca ambas manos en el recipiente de agua de temperatura intermedia.
A) ¿Qué sensación tiene al colocar las manos en el recipiente intermedio?
B) ¿Podría explicar esto en conceptos de transferencia de calor? Ágalo.



- 2) Tomar dos recipientes de cocina iguales y llenarlos con agua hasta el borde. Tapar uno con un nylon negro y otro con nylon transparente y colócalos al sol. Luego de un par de horas, medir la temperatura del agua en cada uno. Explique este fenómeno.
- 3) ¿Cómo están conectadas las luces en una guirnalda para el arbolito de navidad? ¿Y como están conectados los artefactos eléctricos en las casas de cada uno de nosotros? ¿Son en serie, son en paralelo, hay diferencias entre la guirnalda y la red eléctrica de una casa?
- 4) ¿Por qué los esquimales construyen sus viviendas en forma de iglú y con hielo en lugar de usar otros materiales y diseños? Investiga acerca de las propiedades térmicas del hielo para justificar tu respuesta.

Antes de pasar al estudio de la próxima sección, resuelva las preguntas siguientes, consultando el texto siempre que sea necesario.

5. Considere dos barras idénticas, una de metal y otra de madera, y que uno de los extremos de cada barra es introducido en una flama.
 - a) ¿Podría usted seguir haciendo por mucho tiempo el extremo libre de la barra de metal? Explique.
 - b) ¿Por qué se podría sostener el extremo libre de la barra de madera durante un tiempo mayor?
6.
 - a) Una persona afirma que su abrigo es de buena calidad porque impide que el frío pase a través de él. ¿Esta afirmación es correcta? Explique.
 - b) Un niño descalzo y en una habitación con suelo de cemento, coloca su pie izquierdo directamente sobre el piso, y su pie derecho sobre un tapete que se encuentra ahí. El tapete y el suelo están a la misma temperatura. ¿En cuál de los pies tendrá el niño mayor sensación de frío? Explique.
7.
 - a) ¿Por qué en un refrigerador las capas de aire cercanas al congelador, luego de hacer contacto con él, se dirigen hacia abajo?
 - b) Si el congelador se colocara en la parte inferior de un refrigerador, ¿se formarían las corrientes de convección? Explique.
8. Recordando los comentarios hechos en relación con el mecanismo de enfriamiento en el interior de un refrigerador, responda:
 - a) ¿Por qué los entrepaños de un refrigerador no se deben fabricar con placas de una sola pieza?
 - b) ¿Por qué no es conveniente llenar demasiado un refrigerador?
9.
 - a) Cuando estamos cerca de un horno muy caliente, la cantidad de calor que recibimos por conducción y por convección es relativamente pequeña. Pero aun así sentimos que estamos recibiendo una gran cantidad de calor. ¿Por qué?
 - b) Dos autos, uno de color claro y otro de color oscuro, permanecen estacionados al Sol durante cierto tiempo. ¿Cuál cree usted que se calentará más? Explique.



- 10) Una casa tiene paredes de 25 cm de espesor. 400 m^2 de superficie y una conductividad térmica de $1,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$. Si la temperatura exterior es de 10°C , ¿Cuánto calor se pierde en un minuto por las paredes, si la temperatura interior es de 25°C ?
- 11) Una chapa de aluminio tiene 0.5 cm de espesor y 1 m^2 de superficie. Si a través de ella se conducen 960kJ por minuto. ¿Cuál es la diferencia de temperatura entre las caras de la chapa?

Antes de pasar al estudio de la próxima sección, resuelva las preguntas siguientes, consultando el texto siempre que sea necesario.

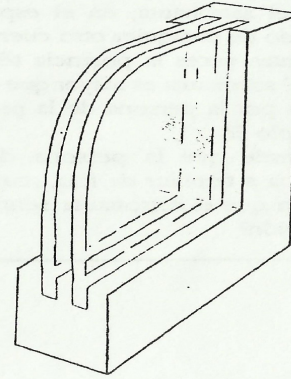
- a) Suponga que en la ecuación $\phi = KA (T_2 - T_1)/L$, la cantidad de calor se mida en kcal (1 kcal = 10^3 cal), el tiempo en segundos, L en metros, A en m^2 y las temperaturas en $^\circ\text{C}$. ¿Cuál sería, en este caso, la unidad de la conductividad térmica K ?

b) Consulte la Tabla C-1 y verifique si la unidad allí utilizada para K coincide con su respuesta de la pregunta anterior.
- Consulte la Tabla C-1 e identifique, entre las sustancias allí presentadas:

 - Aquella que es el mejor aislante térmico.
 - Aquella que es la mejor conductora de calor.
- Teniendo en cuenta la respuesta del ejercicio anterior, explique por qué en países de clima frío se suelen usar las ventanas de vidrio doble, como se muestra en la figura de este ejercicio (este tipo de ventanas llega a reducir hasta 50% las pérdidas de calor).
- a) Calcule el flujo, ϕ , de calor, a través del vidrio de una ventana, de área $A = 3.0 \text{ m}^2$ y de grosor $L = 4.0 \text{ mm}$, sabiendo que las temperaturas de las superficies interna y externa del vidrio son 15.0°C y 14.0°C , respectivamente.

b) Determine, aproximadamente, cuántos focos de 100 W podrían mantenerse encendidos con el flujo de calor perdido a través de esa ventana (considere $1 \text{ cal} = 4.2 \text{ J}$).
- Una pared de concreto tiene un grosor de 20 cm. Se quiere sustituirla por otra de la misma área, con la misma capacidad de aislamiento térmico: ¿Cuál debería ser el grosor de la nueva pared suponiendo que fuera de:

 - Asbesto?
 - Acero?



Ejercicio 3