

# Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

## Primer Principio de la Termodinámica

4<sup>o</sup> Año

**Física IV**

Evangelista, Ignacio  
Duri, Lisandro  
Cadierno, Matías  
Rodríguez, Iván  
Roldán, Gabriel

Cód. 7406-26



Dpto. de Física

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS



## Capítulo 4

# Primer Principio de la Termodinámica

### 4.1. La Conservación de la Energía

En el curso de Mecánica se vio que la energía de un sistema se puede expresar como:

$$E_M = E_c + E_p$$

donde  $E_c$  es la energía cinética del sistema debida a su estado de movimiento y  $E_p$  es la energía potencial correspondiente a las fuerzas conservativas que existan en el sistema, se vio además que si sobre este sistema no se ejerce algún trabajo externo (no conservativo), la energía permanece constante. El principio de conservación de la energía establece que la variación de energía de un sistema es igual al trabajo externo realizado sobre el mismo:

$$\Delta E = W_{FNC} \quad (4.1)$$

Así, la única forma en que los sistemas intercambian energía hasta ahora es mediante trabajo de fuerzas no conservativas.

Estos tipos de sistemas

En el curso de Mecánica estos tipos de sistemas eran macroscópicos sin indagar en las energías

no se consideró como contribución a la energía del sistema a aquella proporcionada por los movimientos de las moléculas que integran el sistema. Las traslaciones, vibraciones, rotaciones, fuerzas de enlace, etc. constituyen una energía no visible por su carácter microscópico pero que se encuentra en el sistema, por otra parte, cualquier variación en este tipo de energía contribuye a la variación de la energía total del sistema. Esta forma de energía originada por la contribución del estado de agitación de las partículas que constituyen el sistema se llama **energía interna** y obliga a modificar la expresión de la energía total del sistema incorporando un término  $U$  que la representa.

$$E = E_c + E_p + U$$

Los términos de energía cinética ( $E_c$ ) y energía potencial ( $E_p$ ) son originados por el movimiento o la posición que ocupa el sistema y por lo tanto son de carácter macroscópico y sus cambios son, en principio, observables a simple vista. El término

### Física IV

debido a la energía interna  $U$  representa a la energía potencial interna y la energía cinética interna asociadas a la fase del sistema y a la temperatura del mismo, ambas de carácter microscópico. El hecho de que estas componentes de la energía no sean apreciables en términos de movimiento no quiere decir que no sean perceptibles en otros términos, por ejemplo: si con un martillo se golpea reiteradamente a un bloque de hierro que se encuentra unido rígidamente al piso, este no se mueve, y en consecuencia no varía su energía cinética ni potencial, pero al bloque de hierro se le ha entregado energía. Basta tocar con la mano la zona del bloque donde se ha golpeado para apreciar la elevación de temperatura. Esto significa que la energía entregada al bloque por el martillo en este caso no modificó la energía cinética ni la energía potencial del bloque, pero la elevación de temperatura indica que se ha incrementado la energía cinética de las partículas del sistema.

Otro ejemplo para considerar es el siguiente: un bloque que desliza sobre una superficie horizontal rugosa, inicialmente el bloque tiene una cierta velocidad y al final del recorrido la velocidad es cero. La energía cinética a pasado de un valor inicial a un valor cero cuando el bloque se detiene, pero si el bloque se ha deslizado sobre una superficie horizontal la energía potencial permaneció constante. Toda la energía cinética inicial del bloque se ha transformado en otra forma de energía.

Los ejemplos anteriores son dos de los muchos que permiten apreciar cómo se puede incrementar la energía de un sistema sin que este modifique su posición, debido a la contribución exclusiva de la energía interna en el incremento de energía total.

Nos preguntamos ahora: ¿Cómo intercambian energía los sistemas entre ellos o con el medio? ¿Las cantidades de energía transferidas, dependen del modo en que se realice dicha transferencia, o da igual por cualquier camino? ¿Cómo interpretamos microscópicamente a la energía interna?

Para responder estas cuestiones estableceremos primeramente que las únicas modalidades de **transferencia de energía**, es decir de energía que que no pertenece a los cuerpos, son las que llamamos: **trabajo** y **calor**. Así, ampliaremos la Ecuación (4.1), que tomará la forma:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q + W \quad (4.2)$$

#### 4.1.1. Descripción de la Transmisión de Energía en Forma de Trabajo

Como ya se dijo, desde el punto de vista macroscópico la única forma de variar la energía de un sistema es por medio de trabajo mecánico. Este trabajo puede ser realizado por el sistema sobre el medio o recibido por él a través de fuerzas externas. Desde el punto de vista microscópico, aunque no es el único método, también el trabajo es una forma de intercambio de energía.

Es posible imaginar un ejemplo para mostrar la entrega de energía a un sistema efectuando trabajo directamente sobre sus partículas: si a un recipiente que contiene un fluido se le coloca un sistema de paletas conectado con el exterior (Figura 4.1),



cuando se hacen rotar las paletas efectuando un trabajo mecánico macroscópico, estas actúan directamente sobre las partículas del fluido incrementando la energía de las mismas directamente por colisiones. Si para realizar el análisis consideramos como sistema el fluido contenido en el recipiente es posible observar que el sistema permanece en reposo respecto de cualquier sistema de referencia externo por lo que no variará ni su energía potencial ni su energía cinética. En consecuencia, todo el trabajo efectuado desde el exterior sobre el sistema se convierte en un incremento de su energía interna.

El método recién descrito no constituye la única manera para incrementar la energía interna de un sistema. Otro modo de proveer energía por medio de trabajo a un sistema es modificando los límites del sistema. Esto ocurre cuando un agente externo entrega energía en forma de trabajo a las partículas microscópicas que integran el interior del sistema a través de la alteración de los límites del sistema modificando en consecuencia su volumen.

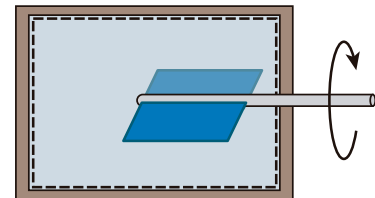
Un ejemplo cotidiano de esto lo tenemos cuando se comprime el aire contenido en el interior de un inflador mientras se mantiene su pico tapado. El brazo de un agente externo (un ente que no pertenece al sistema) ejerce una fuerza  $F$  sobre el pistón del inflador y recorre una distancia  $\Delta x$ . Si se considera como sistema el aire contenido en el interior del cilindro del inflador, mientras se realiza el proceso el centro de masa del sistema no se mueve por lo que no modifica ni su energía cinética ni su energía potencial. Pero sobre el sistema se está ejerciendo un trabajo dado por  $F\Delta x$  que va a incrementar la energía interna del sistema  $U$ . Mientras se realizó este proceso nuestro sistema, el aire contenido en el interior del inflador, ha reducido su volumen.

Este trabajo realizado por el agente externo sobre el sistema ha incrementado su energía aumentando el estado de agitación de las moléculas que lo integran. Si luego de hacer esto se libera la fuerza que se está haciendo sobre el inflador y se permite que el aire que se encuentra comprimido en el interior del inflador se expanda, es ahora el sistema el que realiza un trabajo sobre el medio y para efectuar este trabajo el sistema pierde energía. Pero esta energía no es ni cinética ni potencial ya que el centro de masa del sistema no se mueve, en consecuencia sólo puede hacer este trabajo a costa de su energía interna que debe disminuir en la misma cantidad que el trabajo que entrega al medio. Matemáticamente esto se puede expresar recordando que

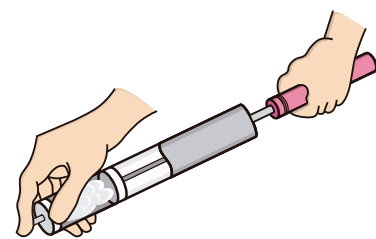
$$\Delta E = W$$

$$\text{Pero como } \Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U$$

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = W$$



**Figura 4.1:** Las paletas agitan el fluido dentro del recipiente y aumentan su energía interna. La línea de trazos indica los límites del sistema.



**Figura 4.2:** El pistón del inflador comprime el aire en el interior; el trabajo que realiza incrementa la energía interna del aire.

y como  $\Delta E_c = 0$  y  $\Delta E_p = 0$

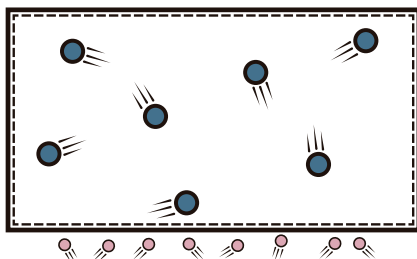
$$\Delta E = \Delta U = W$$

Esto indica que si el sistema permanece en reposo ( $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ ) todo intercambio de trabajo sufrido por el mismo es a costa o en beneficio de su energía interna.

Los anteriores no son las únicas alternativas de intercambio de energía por medio de trabajo entre un sistema y el medio, hay otros modos de intercambio que incluyen la participación de trabajo de origen eléctrico y magnético que por el momento no serán considerados.

### 4.1.2. Descripción de la Transmisión de Energía en Forma de Calor

Desde el punto de vista microscópico existe una forma de intercambio de energía entre un sistema y el medio. Esto ocurre cuando la agitación de las partículas del medio interactúa con los límites del sistema y le transmite energía. En la transferencia de energía mediante calor, las partículas no tienen ninguna dirección privilegiada, sino aleatoria y el intercambio se produce a raíz de los choques que se producen entre partículas del medio con el sistema.



**Figura 4.3:** La agitación de las partículas que se encuentran en el exterior del recipiente se transmite a las partículas que están en el interior. Este mecanismo de transmisión de energía se llama calor. La línea de trazos indica los límites del sistema.

Un ejemplo cotidiano se tiene cuando se pone un recipiente con agua sobre un mechero; la reacción de oxidación del combustible libera energía en forma de agitación de las moléculas del medio (la llama) que colisionan contra las paredes del recipiente transmitiendo energía al sistema que en consecuencia eleva su temperatura. El sistema también puede entregar energía al medio en forma de calor, esto ocurre cuando tiene un nivel energético, indicado por su temperatura, superior a la del medio y le transmite agitación molecular y en consecuencia disminuye su

temperatura.

Aceptando que las únicas formas de modificar la energía total del sistema son **calor** y **trabajo**, y dado que en este caso  $W = 0$  ya que se realiza a volumen constante, si se indica con  $Q$  la energía intercambiada en forma de calor, la Ecuación (4.2) se puede escribir:

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q$$

La unidad de  $[Q]$  es el J (Joule).

Con la palabra *calor* nos encontramos otra vez frente al mismo tipo de problemas que nos encontramos con otras palabras en cursos de física como las expresiones *masa* o *trabajo*, ya que se trata de palabras polisémicas. Con el término *calor*, por ejemplo, es frecuente que en verano se diga "hoy es un día de mucho calor" cuando lo



que técnicamente se quiere decir es “*hoy es un día de alta temperatura*”. En el lenguaje cotidiano *calor* está, en general, asociado a alta temperatura.

En Física este término calor queda restringido a los casos de transferencia de energía que no puede ser expresado como trabajo de la forma  $F\Delta x$ . Es decir:

El **calor** es el *proceso* mediante el cual los sistemas intercambian energía de forma microscópica.

Por otra parte si de lo que se trata es de transferencia de energía, la expresión *trabajo almacenado en el cuerpo* carece de sentido, ya que el trabajo es una forma de transferencia de energía; tampoco tiene sentido la expresión *calor del cuerpo* ya que el calor es también una forma de transferencia de energía.

Es pertinente aclarar que los términos *caliente* y *frío* se reservan en Física para referirse a estados relativos de temperatura de los sistemas.

### 4.1.3. Descripción de la Energía Interna

La **energía interna** ( $U$ ) de un sistema se define de modo que intenta ser un reflejo de la energía observable a escala macroscópica. Concretamente, es la suma de la energía cinética interna y de la energía potencial interna. Es decir que resulta de la suma de las energías cinéticas de las partículas respecto al centro de masas del sistema y de la energía potencial asociada a las interacciones entre las mismas.

Si pensamos en constituyentes atómicos o moleculares, el término  $U$  será el resultado de la suma de la energía interna de las moléculas o átomos que constituyen el sistema (de sus energías de traslación, rotación y vibración), de la energía potencial intermolecular (debida a las fuerzas intermoleculares) y la de energía potencial intramolecular (en los enlaces moleculares).

- En un gas ideal monoatómico bastará con considerar la energía cinética de traslación de sus átomos, como representativa de la energía interna.
- En un gas ideal poliatómico, deberíamos considerar además la energía vibracional y rotacional de las mismas.
- En un líquido o sólido deberíamos añadir la energía potencial que representa las interacciones moleculares.

Estas cuestiones se describirán oportunamente.

Se comprueba experimentalmente que la energía interna es una función de estado; lo cual significa que su variación entre dos estados y consecuentemente el cálculo experimentado entre ambos, es independiente de la transformación que los conecte.

En la Figura 4.4, en la representación en el diagrama presión-volumen; se marcan los estados termodinámicos  $A$  y  $B$  y dos trayectorias que los conectan. La variación de la energía interna del sistema a través de ambas trayectorias es la misma.

Es decir, es válido escribir:

$$\Delta U = U_{\text{final}} - U_{\text{inicial}}$$

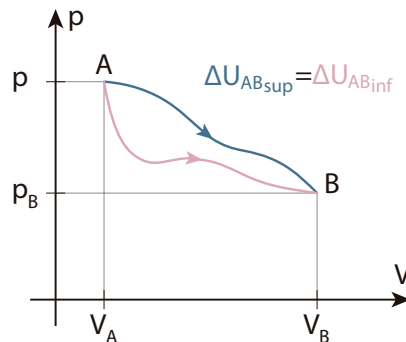


Figura 4.4: La energía interna solo depende del estado inicial y del estado final.

Deducimos inmediatamente que, como consecuencia de ello, la variación de la energía interna de un ciclo será nula, ya que coinciden los estados final e inicial.

$$\Delta U_{\text{ciclo}} = 0$$

Cabe mencionar que los únicos procesos que se pueden representar gráficamente son los que ocurren de manera muy lenta (“cuasi-estáticos”). Así, una gráfica estaría mostrando siempre una sucesión de estados de equilibrio.

## 4.2. El Primer Principio de la Termodinámica

Si el sistema permanece en reposo  $\Delta E_c = 0$  y  $\Delta E_p = 0$  resultando:

$$\Delta E = \Delta U = W + Q$$

La expresión

$$\Delta U = W + Q \tag{4.3}$$

es el enunciado matemático del Primer Principio de la Termodinámica que, como se ve, no es más que una ampliación del principio de conservación de la energía y que indica que la energía intercambiada por un sistema ya sea en forma de trabajo o en forma de calor se realiza aumentando o disminuyendo su energía interna.

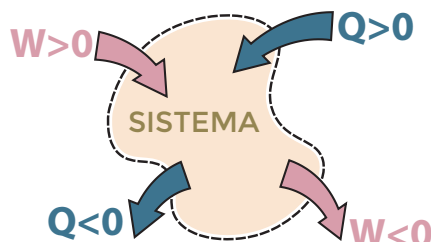
Cuando el sistema entrega energía en forma de trabajo o en forma de calor, disminuye su energía interna y cuando recibe energía, de cualquiera de las dos formas, aumenta su energía interna.

### 4.2.1. Convenio de Signos

La forma en que trabajamos con el Primer Principio de la Termodinámica según la Ecuación (4.3) implica un convenio de signos para las cantidades de calor que ingresan y salen de un sistema. La convención utilizada se resume en la Figura 4.5: a la



energía que **ingresa** al sistema le corresponderá un signo **positivo**, mientras que a la energía que **sale** del sistema (o que el sistema entrega) le corresponderá un signo **negativo**.



**Figura 4.5:** Convenio de signos para cantidades de energía que un sistema intercambia con el medio

De esta manera, observando la Ecuación (4.3) podemos observar que la energía que ingresa al sistema (positiva), generará un aumento de la energía interna, ya que  $\Delta U > 0$ .

#### 4.2.2. Equivalente Mecánico del Calor

A la idea que tanto el trabajo como el calor no son más que dos procesos de transmisión de energía, y en tal sentido, equivalentes no se llegó por un camino sencillo, demoró mucho tiempo para que los físicos identificaran estos fenómenos y aún hoy no son muy familiares al común de la gente.

Por esta razón durante mucho tiempo se estudiaron estos fenómenos por separado y fue necesario establecer una unidad de medida para el calor se definió la caloría como la cantidad de calor (hoy decimos energía) necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de  $14,5^{\circ}\text{C}$  a  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Con esta definición la capacidad calorífica del agua resulta  $1 \frac{\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$ .

Así, la caloría se convirtió en una una unidad de tipo práctica. Durante mucho tiempo existieron dos unidades para medir una misma magnitud: la energía. Por un lado y desde la vertiente de la Mecánica se disponía del Joule mientras que desde los estudios de la transmisión del calor se contaba con la caloría. Fue James Prescott Joule quien, en la década de 1840, realizó un conjunto de experimentos que permitieron determinar un coeficiente establecer la equivalencia entre ambos sistemas de unidades.

Para ello recurrió a un dispositivo de paletas con el que agitó una cierta cantidad de agua para lograr que eleve su temperatura (Figura ??). Midiendo el trabajo mecánico entregado al sistema por un lado y la elevación de temperatura por el otro logró la relación entre ambas unidades.

Así quedó establecido la relación entre la caloría y el Joule

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

A pesar de que el Sistema Internacional no acepta la caloría y de que en el área tecnológica el avance de criterios de normalización internacional (Normas ISO) la hacen inviable, aún se conserva en al área médica esta unidad tradicional.

### Física IV

Desde nuestro punto de vista, el experimento de Joule es un procedimiento para establecer una equivalencia de unidades pero históricamente tuvo una gran importancia dado que fue la culminación de una larga serie de evidencias que vincularon claramente dos aspectos de la Física: la Mecánica, que ya estaba bien establecida con doscientos años de historia, y los estudios sobre el calor que pronto darían lugar a la Termodinámica con sus principios claramente establecidos.



## 4.3. Calorimetría

Llamaremos **calorimetría** al método que se utiliza para calcular y/o medir la cantidad de energía en forma de calor que se intercambian en los procesos biológicos, físicos o químicos, en relación a un material de referencia.

Mediante la calorimetría se puede medir el calor en una reacción química o un cambio físico usando un dispositivo llamado calorímetro.

Para utilizar este método definiremos y analizaremos algunos conceptos fundamentales. Primeramente nos dedicaremos a las transferencias de calor en sólidos y líquidos. Algunas de las propiedades relacionadas con dicho proceso son: la **capacidad calorífica**, el **calor específico** y el **calor latente**.

### 4.3.1. Capacidad Calorífica y Calor Específico de Sólidos y Líquidos

En condiciones próximas a la ambiente cuando se entrega energía en forma de calor a un sistema constituido por un sólido o un líquido en general se lo hace a presión constante y, como ya se vio, la dilatación de sólidos o líquidos no origina cambios de volumen significativos por lo que el trabajo que éstos realizan es despreciable. Esto mientras el sistema no cambie de fase o las presiones a que se encuentre sometido no sean tales que modifiquen significativamente su volumen.

Según lo visto hasta ahora, este incremento de energía interna del sistema que microscópicamente se manifiesta como un mayor estado de agitación de los átomos y moléculas que lo componen, macroscópicamente se manifiesta en una elevación de la temperatura.

A la energía en forma de calor que el cuerpo utiliza para modificar su temperatura se la llama calor sensible

Imaginemos un bloque de un material homogéneo de masa constante al que se le entrega una cantidad de calor  $Q_1$  y se mide una elevación de temperatura  $\Delta T_1$ . Cuando al mismo bloque se le entrega una cantidad de calor  $Q_2$  y se mide la nueva variación de temperatura se registra  $\Delta T_2$  y así sucesivamente con distintas cantidades de calor. Si se relacionan los valores medidos de calor y las variaciones de temperatura mediante cocientes se obtiene un valor constante:

$$\frac{Q_1}{\Delta T_1} = \frac{Q_2}{\Delta T_2} = \dots = \frac{Q_n}{\Delta T_n} = C$$

Esto ocurre mientras las variaciones de temperatura sean tales que no se produzca un cambio de fase.

Este valor constante  $C$ , llamado **coeficiente de capacidad calorífica** o simplemente **capacidad calorífica** es característico de cada cuerpo por lo que el incremento de temperatura queda:

$$Q = C\Delta T$$

Ahora bien, este valor  $C$  no solo depende del material, sino también de la masa de material. Si tenemos el doble de masa necesitaremos introducir el doble de energía

Física IV

en forma de calor para producir la misma variación de temperatura.

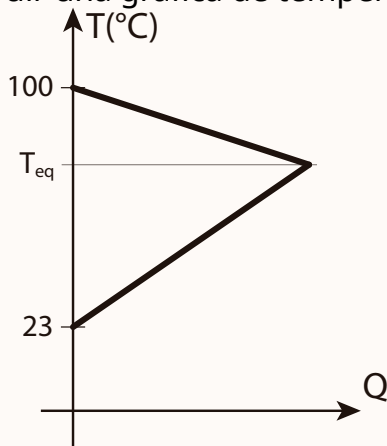
Es por eso que, para independizar este valor  $C$  de la cantidad de materia, se define la **capacidad calorífica específica** o simplemente **calor específico** propio de cada sustancia como  $c = C/m$  con lo que la relación entre la cantidad de energía en forma de calor intercambiada por el sistema y la variación de temperatura queda:

$$Q = mc\Delta T \tag{4.4}$$

**Ejemplo: Intercambio de Calor**

Un termo contiene 700 g de agua a 100 °C. Si se agregan 200 g de agua de la canilla a 23 °C, ¿cuál es la temperatura final del agua en el termo?

El agua caliente cederá calor a expensas de una disminución de su temperatura. El agua fría absorberá calor y aumentará su temperatura. Una vez que ambas masas de agua tengan la misma temperatura, cesará el intercambio de calor. La temperatura de equilibrio estará entre 23 °C y 100 °C, aunque, por ser mayor la masa caliente, la temperatura final estará más cerca de 100 °C. Es posible construir una gráfica de temperatura en función del calor intercambiado.



Si consideramos el termo como un recipiente ideal, podemos pensar que no hay intercambio de calor con él ni con el medio exterior. Luego, todo el calor cedido por el agua caliente será absorbido por el agua fría:

$$Q_{total} = Q_{ced} + Q_{abs} = 0 \Rightarrow Q_{ced} = -Q_{abs} \tag{1}$$

O bien, podemos plantear:

$$|Q_{ced}| = |Q_{abs}| \tag{2}$$

Si elegimos trabajar según (1) tendremos que utilizar la Ecuación (4.4) con  $\Delta T = T_f - T_i$ :

$$\left. \begin{aligned} Q_{ced} &= m_{caliente} c_a (T_{eq} - 100 \text{ }^\circ\text{C}) \\ Q_{abs} &= m_{fría} c_a (T_{eq} - 23 \text{ }^\circ\text{C}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow m_{caliente} c_a (T_{eq} - 100 \text{ }^\circ\text{C}) = -m_{fría} c_a (T_{eq} - 23 \text{ }^\circ\text{C})$$

De donde se puede despejar  $T_{eq}$  utilizando  $c_{agua}$  de la Tabla 4.1:

$$T_{eq} = 82,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Si elegimos trabajar según (2) tendremos que utilizar la Ecuación (4.4) con las diferencias de temperatura como  $\Delta T = T_{caliente} - T_{fría}$  (es decir, siempre la



resta de la mayor temperatura involucrada menos la menor, para trabajar con valores positivos):

$$\left. \begin{aligned} Q_{ced} &= m_{caliente} c_a (100^\circ\text{C} - T_{eq}) \\ Q_{abs} &= m_{fria} c_a (T_{eq} - 23^\circ\text{C}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow m_{caliente} c_a (100^\circ\text{C} - T_{eq}) = m_{fria} c_a (T_{eq} - 23^\circ\text{C})$$

De donde se puede despejar  $T_{eq}$  utilizando  $c_{agua}$  de la Tabla 4.1:

$$T_{eq} = 82,9^\circ\text{C}$$

Si el sistema está constituido por una sustancia homogénea, por ejemplo un trozo de hierro, los valores de  $c$  se encuentran tabulados y es posible calcular la variación de temperatura para una cantidad de energía intercambiada.

La Tabla 4.1 presenta los calores específicos de sustancias en estado líquido y la Tabla B, los calores específicos de sustancias en estado sólido.

Material	$c$ (kJ/kgK)	$c$ (kcal/kg°C)
Agua	4,186	1,000
Mercurio	0,138	0,033
Alcohol etílico	2,512	0,600
Nitrógeno (-20 °C)	1,98	0,474
Acetona	2,2	0,53
Amoníaco concentrado	4,71	1,13
Oxígeno (-20 °C)	1,65	0,394
Ácido sulfúrico	1,4	0,34

**Tabla 4.1:** Calores específicos medios de sustancias líquidas

Material	c (kJ/kgK)	c (kcal/kg°C)
Aluminio	0,908	0,217
Cobre	0,389	0,093
Hierro	0,473	0,113
Latón	0,393	0,094
Plata	0,234	0,056
Plomo	0,129	0,031
Oro	0,13	0,031
Hielo	2,093	0,500
Vidrio	0,84	0,2
Arcilla (seca)	0,92	0,22
Cuerpo humano (promedio)	3,47	0,83
Poliamidas (nylon)	1,7	0,4
Polietilenos	2,3	0,55
Politetrafluoroetileno (teflón)	1,0	0,25
Mármol	0,86	0,21
Acero inoxidable 304	0,5	0,12
Platino	0,14	0,032
Proteína	1,7	0,4
Madera	1,48	0,42

Tabla 4.2: Calores específicos medios de sustancias sólidas

### Equivalente en Agua de un Calorímetro

Aún cuando el calorímetro sea tan bueno que pueda considerársele adiabático porque no deja salir energía al medio, en la medida que se va calentando acompañando a la masa de agua o cuando esta eleva su temperatura, absorbe energía en forma de calor que cede el cuerpo más caliente. Para tener en cuenta esta energía absorbida por el calorímetro se modifica la ecuación anterior contemplando esta energía:

$$Q_{agua} + Q_{cal} = -Q_x$$

donde  $Q_{agua} = m_{agua}c_{agua}(T_f - T_i)$  y  $Q_{cal} = m_{cal}c_{cal}(T_f - T_i)$ , porque la temperatura inicial del interior del calorímetro siempre será igual a la del agua que hay contenida en él y su temperatura final será también igual a la de la mezcla cuando llegue al equilibrio. El calor cedido por la muestra es, al igual que en el caso anterior,  $Q_x = m_x c_x (T_f - T_x)$ .

Igualando ambos términos queda

$$m_{agua}c_{agua}(T_f - T_i) + m_{cal}c_{cal}(T_f - T_i) = m_x c_x (T_f - T_x)$$

despejando,

$$(m_{agua}c_{agua} + m_{cal}c_{cal})(T_f - T_i) = m_x c_x (T_f - T_x)$$

El término  $m_{cal}c_{cal}$ , se puede reemplazar por un equivalente  $E_a c_{agua}$ , o sea por el producto de una cantidad  $E_a$  llamada **equivalente en agua del calorímetro** multiplicado por el calor específico del agua. La unidad en que se expresa  $E_a$  es el kilogramo y su valor lo indica el fabricante del calorímetro o se mide en el laboratorio.



Realizando este reemplazo la ecuación queda

$$(m_{\text{agua}} + E)c_{\text{agua}}(T_f - T_i) = m_x c_x (T_f - T_x)$$

y despejando,

$$c_x = \frac{(m_{\text{agua}} + E_a)c_{\text{agua}}(T_f - T_i)}{m_x(T_x - T_f)}$$

Se llama entonces **equivalente en agua de un calorímetro** a una masa hipotética de agua que absorbe o cede la misma cantidad de energía en forma de calor que el calorímetro. De acuerdo a lo visto hasta ahora, la cantidad  $m_{\text{cal}}c_{\text{cal}}$  puede aparecer dada por la capacidad calorífica  $C_{\text{cal}}$  o a través del equivalente en agua:  $E_a c_{\text{agua}}$

### 4.3.2. Calor de Combustión

El proceso químico que ocurre cuando una sustancia se quema es una oxidación rápida, este tipo de reacción química que ocurre con un fuerte desprendimiento de calor, son reacciones exotérmicas.

Todos estamos familiarizados con este fenómeno, el gas de un mechero y el carbón ardiendo son ejemplos cotidianos, pero lo que interesa es conocer la energía que se libera cuando una cierta cantidad de alguna sustancia se quema totalmente, para ello se define el **calor de combustión** o **poder calorífico**  $p_{\text{comb}}$  como la cantidad de energía que se libera en forma de calor por unidad de masa cuando el material se quema completamente.

Así la cantidad de calor  $Q_{\text{comb}}$  liberada por una masa de combustible  $m_{\text{comb}}$  cuyo calor de combustión es  $p_{\text{comb}}$

$$Q_{\text{comb}} = p_{\text{comb}} m_{\text{comb}}$$

Para medir el calor de combustión existen las bombas calorimétricas que son dispositivos donde se coloca una muestra del combustible.

La Tabla C presenta algunos valores de calores de combustión.

Material combustible	Calor de combustión $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$
Hidrógeno	142
Gas metano	55
Gasolina	47
Petróleo crudo	47
Querosén	46
Carbón bituminoso	36
Carbón (valor típico)	35
Antracita	35
Coque	34
Alcohol etílico	30
Carbón vegetal	30
Alcohol metílico	22
Madera de pino	21
Gas de hulla	20
Gas de alumbrado	20
Cascarón de coco	20
Turba seca	20
Leña seca	18
Turba húmeda	16
Aserrín seco	15
Cáscara de arroz	15
Lignito	13
Bagazo de caña seca	9
Leña verde	9
Planta de maíz seca	9
Aserrín húmedo	8

**Tabla 4.3:** Calores de combustión para distintos materiales

## Rendimiento

Cuando se quema un combustible no se aprovecha todo el calor que se libera en la combustión. Un concepto que refleja esto es el de **rendimiento**.

En general, llamamos rendimiento  $\eta$  de un proceso (en términos de energía) a la relación entre la energía útil o aprovechable en relación a la energía total:

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}}$$

Los términos de energía pueden corresponder a trabajo o a calor, siendo este último el caso de la combustión.



### 4.3.3. Calores Latentes de Cambio de Fase

Cuando se entrega energía en forma de calor a un sólido a presión y volumen relativamente constante, como se observó este aumenta su temperatura ya que toda esta energía se aplica al aumento de la energía interna. Si se mantiene el flujo de energía hay un momento en que se comienza a producir la fusión del sólido. A partir de este punto todo incremento de energía se utiliza en modificar la estructura con que están organizadas las moléculas, que se liberan de la estructura cristalina de fase sólida y pasan a formar una nueva fase, la fase líquida. Mientras se realiza este proceso la temperatura del sistema permanece constante.

La energía que se entrega en forma de calor para realizar este proceso se llama **calor de fusión**. Tiene un valor que depende de cada sustancia y relaciona la energía entregada durante la fusión  $Q_f$  con la masa del cuerpo  $m$  según:

$$L_f = \frac{Q_f}{m} \quad (4.5)$$

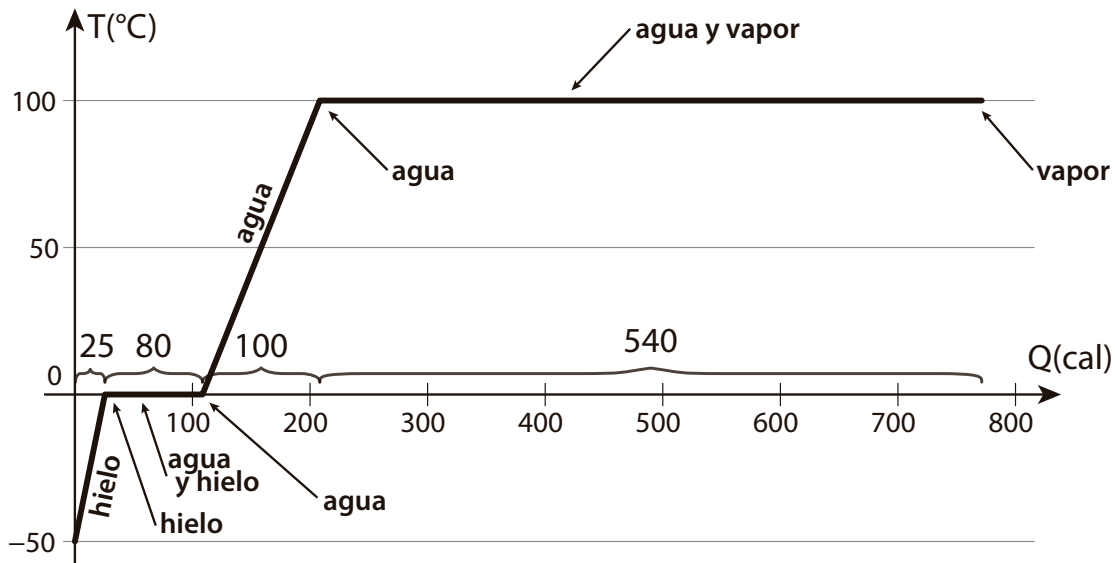
cuyas unidades son  $[L_f] = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  o  $[L_f] = \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

Si este proceso de entrega de energía continúa, la temperatura de la sustancia, ahora en fase líquida, se elevará proporcionalmente a la capacidad calorífica de la misma hasta llegar a la temperatura de cambio de fase. En este punto se inicia nuevamente un proceso de absorción de energía en forma de calor a temperatura constante mientras toda la masa líquida cambia de fase. Este calor que se entrega al sistema se llama **calor de vaporización** y está definida por

$$L_v = \frac{Q_v}{m} \quad (4.6)$$

cuyas unidades son  $[L_v] = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$  o  $[L_v] = \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$

En el gráfico de la Figura 4.7 se indica la temperatura en función de la energía recibida por una muestra de un gramo de hielo de 1 g que se calienta desde  $-50^\circ\text{C}$  hasta su vaporización a  $100^\circ\text{C}$  proceso que se ha realizado a presión atmosférica.



**Figura 4.7:** En el gráfico se indican los valores de energía absorbida por una muestra de 1 g que inicialmente se encuentra en estado sólido a  $-50^{\circ}\text{C}$ .

A las cantidades de calor por unidad de masa utilizadas durante cualquier cambio de fase se las denomina **calores latentes**.

Material	Punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	Calor de fusión ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )	Punto de ebullición ( $^{\circ}\text{C}$ )	Calor de vaporización ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )
Antimonio	630,5	165	1380	561
Alcohol etílico	-114	104	78	854
Cobre	1083	205	2336	5069
Oro	1063	66,6	2600	1568
Helio			-268,93	21
Hidrógeno	-259,31	58,6	-252,89	452
Plomo	327,4	22,9	1620	871
Mercurio	-38,87	11,8	356,58	296
Nitrógeno	-209,96	25,5	-195,81	199
Oxígeno	-218,4	13,8	-182,86	213
Plata	960,8	109	1950	2336
Agua	0,0	333,7	100,0	2259

**Tabla 4.4:** Calores latentes de fusión y de vaporización

En todo este proceso se ha despreciado el trabajo realizado por cambio de volumen de la sustancia ya que los sólidos y líquidos son muy poco sensibles a pequeñas variaciones de presión por lo que se puede considerar que se opera a presión constante. Por otra parte, las variaciones de volumen sólo están originadas por la dilatación del sólido o del líquido que es muy pequeño. No ocurre lo mismo con los gases que son muy sensibles a pequeñas variaciones de presión por lo que se destinará el Capítulo 5 a su consideración.



Si en lugar de entregar energía a un sólido se realiza el proceso inverso extra-  
yendo energía de un gas, enfriándolo, se recorre el camino inverso y se observa que  
tanto las temperaturas de cambio de fase como las energías intercambiadas en los  
cambios de fase hasta que la sustancia llega nuevamente a fase sólida son las mis-  
mas. Es por esto que los calores de condensación y de solidificación son iguales en  
valor absoluto a los calores de vaporización y de fusión, respectivamente.

### Ejemplo: Cambio de Fase

¿Cuánto calor es necesario suministrar para calentar a presión atmosférica 1,2 kg  
de hielo a  $-20^{\circ}\text{C}$  hasta que todo el hielo se convierta en vapor?

El hielo está inicialmente a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Si se le entrega calor, dado que no se encuen-  
tra en el punto de fusión, no cambiará de estado sino que aumentará su tem-  
peratura (1). Una vez que la temperatura del hielo llegue a  $0^{\circ}\text{C}$ , se mantendrá  
constante mientras se derrite (2). Una vez que todo el hielo se haya converti-  
do en agua, la temperatura aumentará hasta llegar a  $100^{\circ}\text{C}$  (3). Finalmente se  
evaporará (4).

La cantidad de calor total será la suma de las cantidades de calor involucra-  
das en cada uno de estos procesos.

1. Calor necesario para aumentar la temperatura del hielo desde  $-20^{\circ}\text{C}$  a  
 $0^{\circ}\text{C}$ .

De la Tabla 4.1 obtenemos el calor específico del hielo  $c_h = 0,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$ , luego  
aplicamos la Ecuación (4.4) con  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_1 = mc_h\Delta T = 1,2 \text{ kg } 0,5 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} 20^{\circ}\text{C} = 12 \text{ kcal}$$

2. Calor necesario para fundir 1,2 kg de hielo.

De la Tabla D obtenemos el calor latente de fusión del agua,  $L_f = 80 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ , y  
aplicamos la Ecuación (4.5):

$$Q_2 = mL_f = 1,2 \text{ kg } 80 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 96 \text{ kcal}$$

3. Calor necesario para elevar la temperatura de 1,2 kg de agua de  $0^{\circ}\text{C}$  a  
 $100^{\circ}\text{C}$

De la Tabla 4.1 obtenemos el calor específico del agua  $c_a = 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$ , luego  
aplicamos la Ecuación (4.4) con  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_3 = mc_a\Delta T = 1,2 \text{ kg } 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} 100^{\circ}\text{C} = 120 \text{ kcal}$$

### Física IV

4. Finalmente, el calor necesario para vaporizar 1 kg de agua a 100 °C. Obtenemos el calor latente de vaporización del agua de la Tabla D,  $L_v = 540 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ , y aplicamos la Ecuación (4.6):

$$Q_4 = mL_v = 1,2 \text{ kg } 540 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 648 \text{ kcal}$$

Finalmente,

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 876 \text{ kcal}$$



## 4.4. Transmisión del Calor

El intercambio de energía en forma de calor es un aspecto importante en el diseño de toda suerte de equipos y sistemas, en invierno se está preocupado por limitar la transmisión del calor del cuerpo humano al exterior, por el contrario en verano la preocupación radica en facilitar lo más posible este fenómeno. Cuando se diseña una heladera se lo hace de modo de evitar la transmisión de calor del exterior al interior de la misma, pero cuando lo que se diseña es una estufa importa que la energía interna del interior del sistema se transmita rápido al exterior. Así aparecen los conceptos de medios aislantes y de medios conductores del calor.

Desde el punto de vista tecnológico es imposible lograr una pared perfectamente aislante o perfectamente conductora, lo que se tiene son paredes que comparativamente transmiten poco o mucho.

En general los procesos de transmisión de calor son muy complicados e involucran simultáneamente fenómenos de distinta naturaleza. Con el objeto de facilitar su estudio y comprensión se analizan por separado tres modos básicos de transmisión, **conducción**, **convección** y **radiación**, pero se debe tener en cuenta que en la gran mayoría de los casos concretos los tres intervienen simultáneamente.

La **conducción** en un sólido opaco es un modo de transmisión de calor por diferencias de temperatura entre las dos caras del sólido que se produce sin movimiento apreciable de materia. La conducción implica la transferencia de energía cinética de agitación de una partícula a la adyacente sin desplazamiento de estas que permanecen oscilando alrededor de una posición de equilibrio. Este fenómeno es apreciable cuando se toca la superficie exterior de una olla o las paredes de un horno. La transmisión de energía por **convección** se produce cuando se mezcla una parte de fluido a una temperatura con otra a una temperatura menor. El movimiento del fluido se produce por diferencia de densidades causadas por las diferencias de temperatura en la llamada convección natural, si el movimiento es forzado por medios mecánicos, como los ventiladores, se llama convección forzada. Se puede ver este fenómeno si se ilumina con luz rasante un recipiente donde se caliente agua, hay movimientos de masa de agua caliente de menor densidad que ascienden y masa de agua a menor temperatura que descienden, estos movimientos de masas de agua dan lugar a la transmisión de calor por convección entre las capas inferiores de líquido que están más calientes por estar en contacto con la superficie del recipiente y las superiores más frías.

Finalmente la transmisión de calor por **radiación** se debe a que todos los cuerpos que se encuentran a cualquier temperatura por sobre el cero absoluto emiten energía en forma de radiación electromagnética. Esta energía se transmite en todas direcciones tanto en el vacío como a través de medios materiales. Cuando esta radiación llega a los cuerpos materiales parte de ella puede ser reflejada, parte transmitida y el resto absorbido en forma de calor. El ejemplo más significativo que tenemos de este modo de transmisión es el Sol, la energía radiada por él llega a la superficie de la Tierra luego de recorrer el espacio casi vacío que hay hasta las capas superiores de la atmósfera; en la atmósfera parte de la energía es reflejada, parte es absorbida elevando la temperatura de la misma y la porción que es transmitida es la que llega a la superficie terrestre y provee de la energía necesaria para el mantenimiento de

Física IV

la vida en la Tierra.

Aunque presentamos estos fenómenos por separado es raro el caso donde no aparecen juntos. Cuando se tiene una estufa encendida hay transmisión de calor por conducción a través de las paredes, hay transmisión por convección cuando el aire a su alrededor se calienta y se desplaza por diferencia de densidades y hay transmisión por radiación porque su temperatura es más alta que la del ambiente. En este último caso si partes de la estufa alcanzan temperaturas bastante altas (cómo algunas estufas eléctricas) la radiación emitida es luminosa y es posible verla a simple vista.

4.4.1. Conducción

Si se analiza una pared de material homogéneo que se encuentra entre dos temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  con  $T_1 > T_2$  hay una transmisión de calor desde el lado 1 al lado 2 a través de la pared.

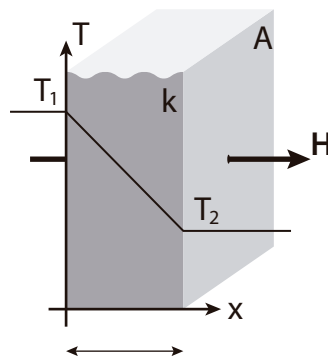


Figura 4.8: Esquema de transmisión de calor por conducción en una pared de espesor  $L$ , conductividad térmica  $k$  y área  $A$ .

Interesa medir la cantidad de calor que pasa por la pared por unidad de tiempo. Esta magnitud se **denomina flujo de calor**  $H$  y sus unidades son  $\frac{J}{s} = W$  o  $\frac{cal}{s}$ :

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

Experimentalmente se encuentra que, para el caso de la pared plana, el flujo de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas ( $T_1 - T_2$ ), al área  $A$  de la pared e inversamente proporcional al espesor  $L$  de la pared.<sup>1</sup>

$$H = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \tag{4.7}$$

El coeficiente  $k$  que establece la proporcionalidad mencionada se llama **coeficiente de conductividad térmica** y sus unidades son  $\frac{W}{m \cdot K}$  o  $\frac{cal}{s \cdot m \cdot K}$  y sus valores se

<sup>1</sup>Esta relación se conoce como **Ley de Fourier de la conducción del calor**.



encuentran tabulados para la mayoría de los materiales. Cuanto mayor sea el valor de  $k$  mejor conductor será el material, recíprocamente más aislador será cuánto más chico sea  $k$ . No existe ningún material que sea aislador perfecto ( $k = 0$ ) o conductor perfecto ( $k = \infty$ )

Material	$k \left( \frac{W}{mK} \right)$
Aluminio	238
Latón	120
Cobre	400
Plata	418
Plomo	35
Hierro	82
Acero	50
Titanio	20
Vidrio (pyrex)	1,0
Asbesto	0,09
Ladrillo	0,04
Corcho	0,03
Revoque	0,67
Hielo	1,67
Aire	0,024
Espuma de poliestireno	0,01
Madera	0,04 - 0,12

**Tabla 4.5:** Conductividades térmicas de distintos materiales

### Ejemplo: Conducción

¿Cuál es el flujo de calor a través de una ventana de 2,8 mm de espesor y de dimensiones 1,5 m × 1,8 m un día en que la temperatura exterior es 15 °C y la interior, 20 °C?

El flujo de calor se da desde el interior al exterior (del lugar de mayor temperatura al de menor). Buscamos la conductividad del vidrio en la Tabla E y aplicamos la Ecuación (4.7):

$$H = \frac{kA(T_{int} - T_{ext})}{L} = \frac{1 \frac{W}{m^{\circ}C} 1,5 m 1,8 m (20^{\circ}C - 15^{\circ}C)}{0,0028 m} = 4821,43 W$$

Microscópicamente, la conducción ocurre porque las partículas de las zonas más calientes poseen mayor energía interna y la transfieren a las partículas vecinas mediante colisiones e interacciones electromagnéticas. En los metales, además, los electrones libres transportan energía de manera muy eficiente, razón por la cual suelen ser buenos conductores térmicos.

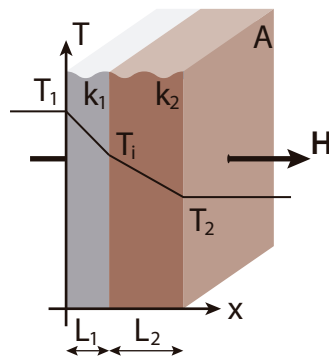
También es importante notar que la ecuación anterior es válida en régimen estacionario, es decir, cuando las temperaturas en cada punto del material no cambian

Física IV

con el tiempo.

**Pared compuesta**

Muchas veces en aplicaciones técnicas se hace necesario colocar paredes compuestas por varias capas de distintos materiales. Se analiza el caso de una pared compuesta por dos materiales homogéneos que tienen espesores distintos ( $L_1$  y  $L_2$ ) y distintos coeficientes de conductividad ( $k_1$  y  $k_2$ ) sometida a una diferencia de temperatura  $T_1$  y  $T_2$  con  $T_1 > T_2$ .



**Figura 4.9:** Esquema de flujo de calor para una pared compuesta por dos capas de materiales distintos de espesor  $L_1$  y  $L_2$  y coeficientes de conductividad  $k_1$  y  $k_2$ .

Si el sistema se encuentra en régimen estacionario en la capa límite entre las dos paredes habrá una temperatura intermedia,  $T_i$  de valor desconocido pero igualmente es posible escribir la ecuación

$$H_1 = \frac{k_1 A (T_1 - T_i)}{L_1}$$

que indica el flujo de calor a través de la primer pared sometida a la diferencia de temperatura entre  $T_1$  y  $T_i$ .

Por otra parte, el flujo en la segunda pared se puede expresar como:

$$H_2 = \frac{k_2 A (T_i - T_2)}{L_2}$$

Pero el flujo es el mismo en ambas paredes por lo que  $H_1 = H_2 = H$ . así queda un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas,  $T_i$  y  $H$ . Ambas ecuaciones se pueden igualar y despejar el valor de  $T_i$

$$\frac{k_1 A (T_1 - T_i)}{L_1} = \frac{k_2 A (T_i - T_2)}{L_2}$$

Sustituyendo el valor de  $T_i$  en cualquiera de las dos primeras, y despejando  $H$ , resulta

$$H = \frac{A (T_1 - T_2)}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}}$$



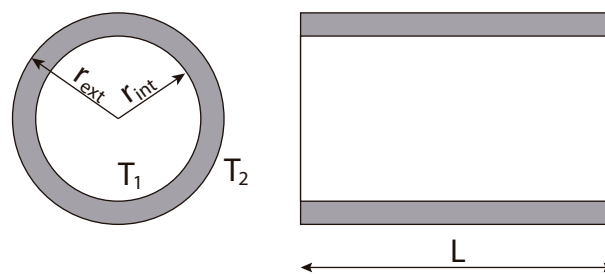
En un caso más general donde existan más de dos capas, el flujo de calor quedará:

$$H = \frac{A(T_1 - T_2)}{\sum \frac{L_i}{k_i}} \quad (4.8)$$

## Flujo Radial en un Cilindro

Existen gran cantidad de dispositivo técnicos, desde calderas hasta las tuberías de calefacción de los hogares o las cañerías que conducen agua caliente que tienen una sección circular, tiene gran importancia saber cuanta energía se pierde por conducción a través de las paredes de las tuberías, en particular si se trata de tramos largos y aunque los cálculos matemáticas para hallar esa expresión se encuentran más allá del alcance de este curso expresaremos su valor para que se pueda aplicar en la resolución de problemas concretos.

$$H = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}$$



**Figura 4.10:** Diagrama de una tubería circular de longitud  $L$  desde la que hay un flujo de calor desde el interior de radio  $r_{int}$  y temperatura  $T_1$  hacia el exterior de radio  $r_{ext}$  y temperatura  $T_2$ .

## Resistencia térmica

La ecuación (4.7) puede escribirse de una forma muy útil para resolver problemas de paredes compuestas. Reordenando la expresión:

$$H = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA}}$$

Se define entonces la **resistencia térmica** de una pared como:

$$R_T = \frac{L}{kA}$$

De esta manera, el flujo de calor puede escribirse como:

$$H = \frac{T_1 - T_2}{R_T}$$

La resistencia térmica mide qué tan difícil resulta el paso del calor a través de un material y sus unidades son  $\frac{K}{W}$ . De la ecuación anterior se observa que:

- cuanto mayor sea el espesor  $L$ , mayor será la resistencia térmica;
- cuanto mayor sea la conductividad térmica  $k$ , menor será la resistencia;
- cuanto mayor sea el área  $A$ , más fácil será el paso del calor.

**Pared Compuesta:** Este concepto resulta especialmente útil para paredes compuestas. En efecto, para una pared formada por varias capas en **serie**, las resistencias térmicas se suman de manera análoga a las resistencias eléctricas:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Por lo tanto, el flujo de calor total puede calcularse mediante:

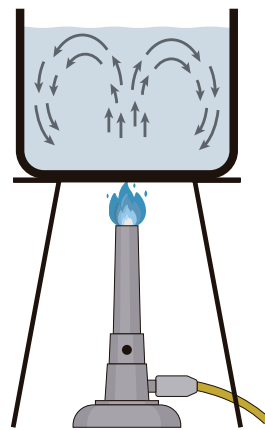
$$H = \frac{T_1 - T_2}{R_{eq}}$$

Comparando esta última expresión con la ecuación 4.8 obtenida para paredes compuestas, puede verse que cada término  $\frac{L_i}{k_i A}$  representa la resistencia térmica de cada capa individual.

Este método no introduce nueva física, pero simplifica notablemente los cálculos cuando intervienen muchas capas o materiales distintos.

#### 4.4.2. Convección

La convección es una transferencia de calor por movimiento de fluidos, a diferencia de los sólidos donde lo que aumenta es el estado de agitación térmica sin desplazamiento de materia, en los fluidos es la masa la que se desplaza. Cuando un objeto tiene una temperatura mayor que el fluido que lo circunda éste gana energía y, en la mayoría de los casos, se dilata. Esta dilatación lo hace menos denso que el fluido más frío que lo rodea, en consecuencia, asciende, debido a las fuerzas de empuje que actúan sobre él y su lugar lo ocupa el fluido más frío. A su vez este fluido más frío ahora en contacto con el objeto caliente ganará energía, ascenderá de la misma forma manteniendo el ciclo.



**Figura 4.11:** Se pueden observar las corrientes convectivas en un líquido contenido en un recipiente, el cual se encuentra sometido a un calentamiento en uno de sus lados.

Este mismo fenómeno ocurre a la inversa cuando el fluido más caliente se pone en contacto con un objeto frío, pierde energía, se hace más denso y desciende. El efecto neto es un flujo continuo del fluido caliente hacia el objeto frío. Estos procesos son los responsables de la variabilidad de nuestro clima, ya que los vientos no son más que corrientes convectivas originadas por diferencia de temperaturas en distintas regiones del planeta. Las corrientes marinas tienen el mismo origen e involucran la transmisión de grandes cantidades de energía en los océanos. Aún el flujo de los materiales semifluidos del centro de la Tierra tiene origen en corrientes convectivas.

El tipo de convección descrito, es la convección libre o natural, pero con frecuencia en los dispositivos tecnológicos la convección puede ser forzada, como para facilitar el intercambio de energía, las bombas de agua de los automotores están para producir una convección forzada, los secadores de pelo y los caloductos (ventiladores que tiene resistencias eléctricas para calentar el aire) son otro ejemplo de dispositivos con convección forzada.

La teoría matemática de la convección del calor es muy complicada dado que el calor ganado o perdido por una superficie depende de las diversas circunstancias como el tipo de superficie, la posición, velocidad del fluido, etc. La corriente calorífica de convección se determina por medio de la ecuación:

$$H = h_c A \Delta T$$

donde  $h_c$  se denomina coeficiente de convección y sus unidades, en el SI, son  $\frac{W}{m^2 K}$ . La determinación de  $h_c$  se realiza en parte a través de un método de razonamiento denominado "análisis dimensional" y en parte sobre la base de datos experimentales. Como ejemplo daremos las ecuaciones para calcular  $h_c$  para el aire a la presión atmosférica.

#### 4.4.3. Radiación

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos cuya temperatura sea mayor que el cero absoluto. Esta energía se denomina energía radiante y es transportada en forma de ondas electromagnéticas. Como la radiación electromagnética puede transmitirse en el vacío, la radiación no necesita un medio material para transferir energía. De esta manera, la energía puede transmitirse desde el Sol hasta la Tierra por radiación, aunque el espacio entre ambos es prácticamente vacío.

En este curso analizaremos principalmente la radiación emitida por sólidos y líquidos, ya que la radiación emitida por gases presenta características más complejas.

En general, cuando a un cuerpo llega energía radiante emitida por otro cuerpo, una parte es absorbida, otra reflejada y otra transmitida. Si el cuerpo receptor no es transparente ni traslúcido a la radiación incidente, la energía será en parte absorbida y en parte reflejada.

#### Ley de Stefan-Boltzmann

Josef Stefan (1835–1893) dedujo experimentalmente, y Ludwig Boltzmann demostró teóricamente, que la potencia radiante emitida por unidad de tiempo y por unidad de superficie por un cuerpo puede expresarse mediante la relación

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

donde  $R$  se expresa en  $\frac{W}{m^2}$ .

En esta expresión:

- $e$  es un coeficiente denominado **poder emisivo** o **emisividad** del cuerpo. Sus valores varían entre 0 y 1 ( $0 < e < 1$ ) y dependen principalmente de las características superficiales del cuerpo (rugosidad, color, brillo, etc.);
- $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4};$$

- $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo que emite radiación.

Importante: en todas las expresiones de radiación la temperatura debe expresarse en kelvin.

La radiación térmica aumenta muy rápidamente con la temperatura, ya que depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

Si un cuerpo se encuentra a una temperatura  $T_1$  y está rodeado por paredes a temperatura  $T_2$ , la cantidad neta de energía radiada por unidad de tiempo y de superficie viene dada por:

$$R_{neta} = e\sigma (T_1^4 - T_2^4)$$



Si  $T_1 > T_2$ , el cuerpo pierde energía por radiación; mientras que si  $T_1 < T_2$ , el cuerpo gana energía.

## Emisor ideal

Puede ocurrir que un cuerpo, al recibir energía radiante, la refleje parcialmente o la absorba. Un cuerpo que absorbe eficientemente la radiación también emite radiación eficientemente.

En consecuencia, un buen absorbedor es también un buen emisor. Las superficies que reflejan poca radiación absorben gran parte de la energía incidente y, por ello, suelen presentar aspecto oscuro. A una superficie de este tipo se la denomina **superficie negra ideal**, y al cuerpo que la posee, **cuerpo negro ideal**.

En la práctica no existen cuerpos negros perfectos. Una de las superficies que más se aproxima es la del negro de humo u hollín, que refleja aproximadamente solo el 1 % de la energía radiante incidente.

Superficie	$e$	Superficie	$e$
Cuerpo negro ideal	1	Plomo pulido	0,40
Negro de humo	0,97	Bronce pulido	0,30
Papel de asbesto	0,93	Estaño pulido	0,20
Pintura negra	0,91	Hierro brillante	0,15
Lona blanca	0,88	Cobre pulido	0,07
Vidrio de ventana	0,88	Papel de aluminio	0,06

**Tabla 4.6:** Poderes emisivos de algunas superficies

La absorción y la emisión de energía radiante dependen no solo de la temperatura de los cuerpos, sino también de las características de sus superficies. Las superficies oscuras y rugosas absorben y emiten más energía radiante que las superficies claras y pulidas.

Por este motivo, es adecuado pintar con pinturas brillantes y claras los depósitos de almacenamiento de combustibles, ya que así disminuyen el intercambio de energía por radiación. En cambio, los radiadores de vapor o de agua caliente aumentan su capacidad de emitir radiación cuando poseen superficies oscuras y rugosas. Los satélites artificiales suelen recubrirse con capas reflectantes de oro o plata para reducir el intercambio de energía radiante con el entorno.

## Problemas y Cuestiones

### Primer Principio de la Termodinámica

#### Problemas

1. Cierta cantidad de aire se comprime dentro de un cilindro. El cambio de la energía interna del aire es 16 kJ, mientras que el trabajo necesario para la compresión es de 300 kJ. ¿Cuánto vale la cantidad de calor transferida durante el proceso?

R)  $Q = -284 \text{ kJ}$

2. Cierta cantidad de vapor de agua efectúa un cambio de estado dentro de un cilindro provisto de un pistón. La energía interna del vapor aumenta en 900 kJ. Si durante el proceso se agregan 950 kJ de calor ¿Cuál es la cantidad de trabajo involucrada?

R)  $W = -50 \text{ kJ}$

3. Un sistema cerrado efectúa tres transformaciones. En la primera cede una cantidad de calor de 10 kcal y recibe un trabajo equivalente a 13 kcal; en la segunda aumenta su energía interna en 7 kcal y recibe una cantidad de calor de 17 kcal del medio; en el tercer proceso disminuye su energía interna en 10 kcal y recibe un trabajo de 5 kcal. Calcule:

- a) la variación de energía interna en la primera evolución,
- b) el trabajo en la segunda evolución,
- c) el calor intercambiado en la tercera evolución,
- d) los cambios de las tres energías al efectuar las tres evoluciones,
- e) ¿puede el sistema haber recorrido un ciclo? ¿por qué?

R) a)  $\Delta U = 3 \text{ kcal}$  b)  $W = -10 \text{ kcal}$  c)  $Q = -15 \text{ kcal}$   
d)  $\Delta U = 0 \text{ kcal}$   $\Sigma Q = -8 \text{ kcal}$   $\Sigma W = 8 \text{ kcal}$



## Calorimetría

### Problemas

- Halle la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 100 g de cobre desde  $10^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ .
  - Suponiendo que a 100 g de aluminio a  $10^{\circ}\text{C}$  se le suministra la cantidad de calor del apartado anterior, deduzca qué cuerpo (cobre o aluminio) alcanzará mayor temperatura.

R) a) 3503 J      b) cobre

- Un recipiente de aluminio de 500 g de masa contiene 115,5 g de agua a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . Se introduce en el recipiente un bloque de hierro de 200 g a la temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$ . Calcule la temperatura de equilibrio suponiendo que no hay pérdidas con el medio ambiente.

R)  $25^{\circ}\text{C}$

Un calefón eléctrico tiene una potencia de 3 kW. Suponga que toda esa energía se usa para calentar agua, sin pérdidas.

- ¿Cuánto calor se necesita para calentar 1 litro de agua desde  $5^{\circ}\text{C}$  hasta  $45^{\circ}\text{C}$ ? R) 40 kcal
  - Con esa potencia, ¿cuántos litros de agua por minuto puede calentar el calefón entre esas temperaturas? R) 1,08 L/min
- Un calefón eléctrico tiene una potencia de 3 kW. Suponga que toda esa energía se utiliza para calentar agua, sin pérdidas.
    - ¿Cuánto calor se necesita para calentar 1 L de agua desde  $5^{\circ}\text{C}$  hasta  $45^{\circ}\text{C}$ ?
    - Con esa potencia, ¿cuántos litros de agua por minuto puede calentar el calefón entre esas temperaturas?

R) a) 40 kcal      b)  $1,08 \frac{\text{L}}{\text{min}}$

- Determine qué masa de gas de hulla debe quemarse para elevar la temperatura de 200 L de agua desde  $10^{\circ}\text{C}$  hasta  $70^{\circ}\text{C}$ , si las pérdidas totales representan el 25%.

R) 10,0 kg

- El petróleo utilizado en un horno tiene un calor de combustión de  $5000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ . Suponiendo que solo se aprovecha el 55% del calor liberado en su combustión, calcule la cantidad de combustible necesaria para calentar 500 kg de agua desde  $10^{\circ}\text{C}$  hasta  $80^{\circ}\text{C}$ .

R) 12,73 kg

### Física IV

6. a) ¿Qué cantidad de calor, expresada en Joule, se requiere para elevar la temperatura de 150 L de agua contenida en un depósito desde 15 °C hasta 60 °C?
- b) Si esa cantidad de agua es calentada mediante la combustión de gas de alumbrado, ¿qué masa de gas deberá quemarse si las pérdidas totales representan el 20 %?
- c) Si el agua se calienta mediante un calentador eléctrico, ¿cuántos kWh serán necesarios? (Suponga un rendimiento del 100 %).
- R) a)  $2825,6 \times 10^4$  J    b) 1,77 kg    c) 7,85 kWh
7. En un calorímetro de cobre se queman exactamente 3 g de carbón, produciéndose  $\text{CO}_2$ . La masa del calorímetro es de 1,5 kg y la masa de agua contenida en él es de 2 kg. La temperatura inicial del sistema era de 20 °C y la final de 31 °C. Halle el calor de combustión del carbón.
- R)  $32,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
8. ¿Qué cantidad de calor se requiere para transformar 1 g de hielo a -10 °C en agua a 100 °C?
- R) 774,4 J
9. Un bloque de hierro de 2 kg se extrae de un horno a 650 °C y se coloca sobre un gran bloque de hielo a 0 °C. Suponiendo que todo el calor cedido por el hierro se utiliza para fundir hielo, determine cuánto hielo se fundirá.
- R) 1836 g
10. Un cubo de hielo de masa 50 g se extrae de un frigorífico a -65 °C y se deja caer dentro de un vaso con agua a 0 °C. Si no hay intercambio de calor con el exterior, ¿qué cantidad de agua se solidificará sobre el cubo?
- R) 20,31 g
11. Un vaso abierto contiene 500 g de hielo a -20 °C (puede despreciarse la capacidad calorífica del recipiente). Se suministra calor al vaso en forma constante a razón de  $1000 \frac{\text{cal}}{\text{min}}$  durante 100 min.
- a) Represente gráficamente la temperatura en función del tiempo.
- b) Calcule la cantidad de agua que se vaporiza.
- R) 9,26 g
12. En un calorímetro ideal que contiene agua a 65 °C se introducen 60 g de hielo a una temperatura de -15 °C. La temperatura de equilibrio es de 20 °C.
- a) Calcule la masa de agua contenida inicialmente en el calorímetro.
- b) Represente gráficamente la temperatura en función del calor intercambiado.



R) 143,33 g

13. Se mezclan 120 g de hielo a  $-20^{\circ}\text{C}$  con 6 g de vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$ . Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $0^{\circ}\text{C}$  – 87 g de hielo y 39 g de agua

14. Un calorímetro ideal contiene 1000 g de hielo a  $-30^{\circ}\text{C}$ . Se introducen en el calorímetro 23 g de vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$ . Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $0^{\circ}\text{C}$  – 1003,5 g de hielo y 19,5 g de agua

15. Dentro de un calorímetro que contiene 1000 g de agua a  $20^{\circ}\text{C}$  se introducen 500 g de hielo a  $-16^{\circ}\text{C}$ . El recipiente calorimétrico es de cobre ( $c_{Cu} = 0,093 \frac{\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$ ) y tiene una masa de 278 g. Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $0^{\circ}\text{C}$  – 1206,5 g de agua y 293,5 g de hielo

16. Un recipiente calorimétrico de cobre, cuya capacidad calorífica es de  $30 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C}}$ , contiene 50 g de hielo. El sistema se encuentra inicialmente a  $0^{\circ}\text{C}$ . Se introducen en el calorímetro 12 g de vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$  y presión atmosférica. Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $40^{\circ}\text{C}$  – 62 g de agua

17. Se tiene una mezcla de 500 g de agua y 100 g de hielo en equilibrio térmico a  $0^{\circ}\text{C}$ . Se introducen en el sistema 200 g de vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$ . Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $100^{\circ}\text{C}$  – 726 g de agua y 74 g de vapor

18. En un calorímetro ideal hay 100 g de hielo y 36 g de agua en equilibrio térmico. Se introducen 36 g de vapor de agua a  $100^{\circ}\text{C}$ . Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R) 172 g de agua a  $87,4^{\circ}\text{C}$

19. Un calorímetro de cobre de 42,88 g contiene 58,71 g de agua a  $10^{\circ}\text{C}$ . Se introducen perdigones de plomo calentados en una estufa de vapor de agua. Si la masa total del calorímetro, el agua y los perdigones es de 252,39 g, calcule:

a) la temperatura de la mezcla;

b) el equivalente en agua del calorímetro.

R) a)  $16,21^{\circ}\text{C}$       b) 3,93 g

20. Un calorímetro de equivalente en agua de 30 g contiene 200 g de agua y 20 g de hielo en equilibrio térmico. Se introducen en dicho calorímetro 100 g de vapor a  $100^{\circ}\text{C}$ . Determine la temperatura final y la composición de la mezcla.

R)  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 269 g de agua y 51 g de vapor

21. Un calorímetro contiene 500 g de agua y 300 g de hielo, todo el sistema a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se introduce rápidamente un bloque metálico de 1000 g extraído de un horno a  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , produciéndose la fusión completa de todo el hielo y alcanzándose una temperatura final de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Calcule el calor específico del metal.
  - Si en lugar del bloque anterior se introdujera otro bloque del mismo metal, también a  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero de masa 2000 g, ¿cuál sería la temperatura final del sistema?

R) a)  $0,435\frac{\text{cal}}{\text{g}^{\circ}\text{C}}$       b)  $23,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Cuestiones

- Si varios cuerpos de distintos materiales, con igual masa e inicialmente a la misma temperatura, se colocan sucesivamente en contacto con un foco calorífico, ¿cuál de ellos alcanzará antes una determinada temperatura?
- ¿Por qué los cambios de temperatura son menos bruscos en los climas marítimos?
- ¿Por qué, en los días lluviosos, los cambios de temperatura suelen ser menos intensos y las temperaturas menos frías?
- Durante la Edad Media, los defensores de los castillos arrojaban aceite hirviendo sobre los atacantes en lugar de agua hirviendo, mucho más económica. ¿Por qué, si el calor específico del aceite es menor que el del agua?
- El cuerpo A tiene doble masa y doble calor específico que el cuerpo B. Si ambos reciben la misma cantidad de calor, ¿cómo se relacionan sus variaciones de temperatura?
- ¿Qué cambio de fase tiene lugar en los siguientes procesos?
  - el secado de ropa húmeda;
  - la formación de humo a la salida de una chimenea;
  - la soldadura de dos cables.
- Si un combustible pudiera presentarse en los tres estados de la materia, ¿en cuál de ellos resultaría más eficaz?
- ¿Qué tipos de metales son adecuados para fabricar piezas moldeadas?
- ¿Es posible acuñar monedas de oro únicamente mediante la solidificación del metal en un molde?

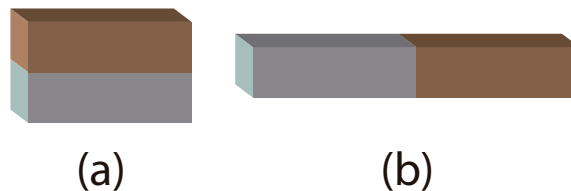


- J. ¿Por qué la mano puede quedar adherida al tomar un recipiente metálico con hielo del congelador?
- K. ¿Por qué en verano se riegan las calles y los patios?
- L. Dos objetos de masas  $m_a$  y  $m_b$  están hechos de materiales distintos,  $a$  y  $b$ . Cuando ambos absorben cantidades iguales de energía térmica, sus temperaturas aumentan en la misma proporción. ¿Cómo se relacionan los calores específicos de los materiales  $a$  y  $b$ ?
- a)  $c_a = c_b$
  - b)  $c_a = \frac{m_a}{m_b} c_b$
  - c)  $c_a = \frac{m_b}{m_a} c_b$
  - d) ninguna de las anteriores
- M. Un recipiente térmicamente aislado contiene 200 g de agua a 20 °C. Se introducen cubos de hielo a 0 °C. Si la masa total de hielo agregada es  $m_h$ , no quedará hielo en el recipiente si (seleccione la opción correcta):
- a)  $20 \text{ g} < m_h < 50 \text{ g}$
  - b)  $50 \text{ g} < m_h < 80 \text{ g}$
  - c)  $80 \text{ g} < m_h < 160 \text{ g}$
  - d) tanto (b) como (c) son correctas
  - e) tanto (a) como (b) y (c) son correctas

### Propagación del calor

#### Problemas

- Una lámina de un aislante térmico tiene una sección transversal de  $100 \text{ cm}^2$  y un espesor de  $2 \text{ cm}$ . Su conductividad térmica es de  $8,372 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$ . Si la diferencia de temperatura entre las caras opuestas de la lámina es de  $100^\circ\text{C}$ , ¿cuántas calorías atravesarán la lámina en un día?  
R) 864 kcal
- Uno de los extremos de una barra de cobre de  $18 \text{ cm}$  de longitud y  $4 \text{ cm}^2$  de sección está introducido en un baño de vapor y el otro en una mezcla de hielo fundente y agua. Pueden despreciarse las pérdidas de calor a través de la superficie lateral.
  - ¿Cuál es la corriente calorífica en la barra?
  - ¿Cuál es la temperatura en un punto situado a  $4 \text{ cm}$  del extremo más frío?R) a) 88,9 W    b)  $22,2^\circ\text{C}$
- Dos varillas cuadradas de metal idénticas se encuentran soldadas lado a lado, como se muestra en la Figura (a). Suponga que en  $2 \text{ min}$  fluyen  $41,86 \text{ J}$  de calor a través de las varillas cuando se someten a una diferencia de temperatura de  $100^\circ\text{C}$ . ¿Cuánto tiempo tardarán  $41,86 \text{ J}$  en fluir a través de las varillas si se sueldan extremo con extremo, como se muestra en la Figura (b), y se las somete a la misma diferencia de temperatura?



R) 8 min

- Una barra de  $2 \text{ m}$  de longitud está formada por un núcleo macizo de acero de  $1 \text{ cm}$  de diámetro rodeado por una envoltura de cobre cuyo diámetro exterior es de  $2 \text{ cm}$ . La superficie exterior de la barra está aislada térmicamente. Uno de sus extremos se mantiene a  $100^\circ\text{C}$  y el otro a  $0^\circ\text{C}$ .
  - Calcule la corriente calorífica total de la barra.
  - ¿Qué porcentaje del flujo de calor es transportado por cada material?

R) a) 4,91 W    b) 4 % a través del acero y 96 % a través del cobre



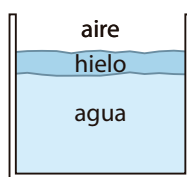
5. Suponga que la conductividad térmica del cobre es el doble de la del aluminio y cuatro veces la del latón. Tres varillas de igual longitud y diámetro, hechas respectivamente de cobre, aluminio y latón, están colocadas extremo con extremo, quedando la de aluminio entre las otras dos. Los extremos libres de las varillas de cobre y latón se mantienen a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Determine las temperaturas de equilibrio en las uniones.

R)  $85,71\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre cobre y aluminio       $57,14\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre aluminio y latón

6. Calcule la corriente calorífica por unidad de área que se transmite a través de un muro compuesto por una capa de revoque de 2 cm de espesor, una capa de ladrillo común de 30 cm y una plancha de corcho de 4 cm. La temperatura interior es de  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la exterior de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

R)  $3,40\text{ } \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

7. Un tanque de agua se encuentra en el exterior, en un temporal frío, hasta que se forma una capa de hielo de 5 cm de espesor sobre su superficie. El aire sobre el hielo se encuentra a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Calcule la velocidad con que se forma el hielo en la superficie inferior de la capa de hielo. Considere que la densidad y el calor de fusión del hielo son  $0,92\text{ } \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  y  $80\text{ } \frac{\text{cal}}{\text{g}}$ , respectivamente. Suponga que el agua no gana ni pierde calor a través de las paredes del tanque.



Pista: En un intervalo de tiempo  $\Delta t$  se forma una capa adicional de espesor  $\Delta x$ . El calor liberado al solidificarse esa capa debe ser igual al calor conducido a través del hielo ya formado.

R)  $0,39\text{ } \frac{\text{cm}}{\text{h}}$

8. Halle qué cantidad de calor pasa por conducción durante 10 h a través de la pared de un tubo de acero de 50 mm de diámetro interior, 3 mm de espesor y 6 m de longitud. Por el interior circula vapor a  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura exterior es de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

R)  $5,99 \times 10^{10}\text{ J}$

### Física IV

9. Una pared plana se mantiene a la temperatura constante de  $100^{\circ}\text{C}$  y el aire a ambos lados se encuentra a presión atmosférica y a  $20^{\circ}\text{C}$ . Calcule el calor perdido por convección natural por  $1\text{ m}^2$  de pared (considerando ambas caras) en una hora:
- a) si la pared es vertical;  
b) si la pared es horizontal.
- R) a) 3064 kJ      b) 3265 kJ
10. Un tubo vertical de vapor, de diámetro exterior 7,5 cm y altura 4 m, tiene una superficie exterior a temperatura constante de  $95^{\circ}\text{C}$ . El aire circundante se encuentra a presión atmosférica y a  $20^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuánto calor cede al aire, en una hora, por convección natural?
- R) 1900 kJ
11. Un cuerpo esférico de 2 cm de radio se encuentra a  $600^{\circ}\text{C}$ . Suponiendo que radia como un cuerpo negro, determine la energía emitida por unidad de tiempo.
- R) 165,6 W
12. Una esfera maciza de cobre ennegrecida, de 2 cm de radio, se coloca dentro de una cavidad evacuada cuyas paredes se mantienen a  $100^{\circ}\text{C}$ . ¿Qué energía debe suministrarse por segundo para mantener la esfera a temperatura constante de  $127^{\circ}\text{C}$ ?
- R) 1,77 W
13. En una lámpara incandescente, la temperatura de trabajo del filamento de wolframio es 2450 K y su emisividad es 0,3. Calcule el área superficial del filamento de una lámpara de 25 W.
- R) 0,41  $\text{cm}^2$
14. Una tubería que conduce vapor tiene un diámetro exterior de 38 mm y una longitud de 3 m. Contiene vapor a  $100^{\circ}\text{C}$  y pierde  $1151 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$  cuando se encuentra en una habitación a  $27^{\circ}\text{C}$ . ¿Qué fracción de la pérdida de calor se debe a la radiación? (Suponga un poder emisivo de 0,5).
- R) 36 %

### Cuestiones

- A. ¿De qué depende el tiro de una chimenea? ¿Influye su longitud?
- B. ¿Por qué en los ventanales de los países fríos se emplean vidrios dobles?
- C. Al acercar la mano a un radiador, ¿en qué caso nos parece más caliente: acercándola por encima o lateralmente?



- D. ¿Por qué se forman las brisas?
- E. ¿Por qué sobre los terrenos recientemente arados se forman corrientes ascendentes de aire?
- F. Dos cilindros macizos de igual longitud están hechos con materiales de conductividades térmicas son  $k_A$  y  $k_B$ . Sus resistencias térmicas por unidad de área serán iguales si la relación de sus diámetros es:

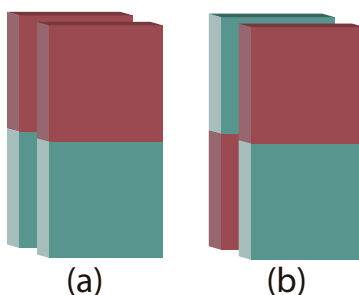
a)  $\frac{D_A}{D_B} = \left(\frac{k_A}{k_B}\right)^2$

b)  $\frac{D_A}{D_B} = \sqrt{\left(\frac{k_A}{k_B}\right)}$

c)  $\frac{D_A}{D_B} = \left(\frac{k_B}{k_A}\right)^2$

d) Ninguna de las anteriores

- G. Para cubrir una abertura que tiene área  $2A$  se cuenta con cuatro piezas cuadradas de aislamiento de dos materiales diferentes, todas del mismo espesor y área  $A$ . Esto se puede llevar a cabo en una de las dos formas mostradas en la Figura. ¿Qué arreglo dará el flujo de menor calor Si  $k_1 \neq k_2$ ?



**Tablas de coeficientes**

Material	c (kJ/kgK)	c (kcal/kg°C)
Agua	4,186	1,000
Mercurio	0,138	0,033
Alcohol etílico	2,512	0,600
Nitrógeno (-20 °C)	1,98	0,474
Acetona	2,2	0,53
Amoníaco concentrado	4,71	1,13
Oxígeno (-20 °C)	1,65	0,394
Ácido sulfúrico	1,4	0,34

**Tabla A:** Calores específicos medios de sustancias líquidas

Material	c (kJ/kgK)	c (kcal/kg°C)
Aluminio	0,908	0,217
Cobre	0,389	0,093
Hierro	0,473	0,113
Latón	0,393	0,094
Plata	0,234	0,056
Plomo	0,129	0,031
Oro	0,13	0,031
Hielo	2,093	0,500
Vidrio	0,84	0,2
Arcilla (seca)	0,92	0,22
Cuerpo humano (promedio)	3,47	0,83
Poliamidas (nylon)	1,7	0,4
Polietilenos	2,3	0,55
Politetrafluoroetileno (teflón)	1,0	0,25
Mármol	0,86	0,21
Acero inoxidable 304	0,5	0,12
Platino	0,14	0,032
Proteína	1,7	0,4
Madera	1,48	0,42

**Tabla B:** Calores específicos medios de sustancias sólidas



Material combustible	Calor de combustión $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$
Hidrógeno	142
Gas metano	55
Gasolina	47
Petróleo crudo	47
Querosén	46
Carbón bituminoso	36
Carbón (valor típico)	35
Antracita	35
Coque	34
Alcohol etílico	30
Carbón vegetal	30
Alcohol metílico	22
Madera de pino	21
Gas de hulla	20
Gas de alumbrado	20
Cascarón de coco	20
Turba seca	20
Leña seca	18
Turba húmeda	16
Aserrín seco	15
Cáscara de arroz	15
Lignito	13
Bagazo de caña seca	9
Leña verde	9
Planta de maíz seca	9
Aserrín húmedo	8

**Tabla C:** Calores de combustión para distintos materiales

Material	Punto de fusión (°C)	Calor de fusión $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$	Punto de ebullición (°C)	Calor de vaporización $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$
Antimonio	630,5	165	1380	561
Alcohol etílico	-114	104	78	854
Cobre	1083	205	2336	5069
Oro	1063	66,6	2600	1568
Helio			-268,93	21
Hidrógeno	-259,31	58,6	-252,89	452
Plomo	327,4	22,9	1620	871
Mercurio	-38,87	11,8	356,58	296
Nitrógeno	-209,96	25,5	-195,81	199
Oxígeno	-218,4	13,8	-182,86	213
Plata	960,8	109	1950	2336
Agua	0,0	333,7	100,0	2259

**Tabla D:** Calores latentes de fusión y de vaporización

Material	$k \left( \frac{W}{mK} \right)$
Alumino	238
Latón	120
Cobre	400
Plata	418
Plomo	35
Hierro	82
Acero	50
Titanio	20
Vidrio (pyrex)	1,0
Asbesto	0,09
Ladrillo	0,04
Corcho	0,03
Revoque	0,67
Hielo	1,67
Aire	0,024
Espuma de poliestireno	0,01
Madera	0,04 - 0,12

**Tabla E:** Conductividades térmicas de distintos materiales

Superficie	$e$	Superficie	$e$
Cuerpo negro ideal	1	Plomo pulido	0,40
Negro de humo	0,97	Bronce pulido	0,30
Papel de asbesto	0,93	Estaño pulido	0,20
Pintura negra	0,91	Hierro brillante	0,15
Lona blanca	0,88	Cobre pulido	0,07
Vidrio de ventana	0,88	Papel de aluminio	0,06

**Tabla F:** Poderes emisivos de algunas superficies