

**TERMODINÁMICA  
MÓDULO 2**

**EL CALOR ES UNA FORMA DE ENERGÍA**

En general, cuando pensamos en calentar algo, concebimos la idea de colocarlo en interacción con un foco de mayor temperatura; pero esa no es la única forma de calentar un cuerpo. Por ejemplo: supongamos que nos encontramos en un lugar frío y sentimos que nuestras manos están heladas, para calentarlas podríamos acercarnos a una chimenea con leños prendidos o también frotarlas una con la otra con fuerza, en ambos casos experimentaríamos una sensación de calor.

Antiguamente se creía que el calor era un fluido invisible e imponderable llamado calórico que se producía cuando una sustancia se quemaba y que podía transmitirse de un cuerpo a otro cuando existía una diferencia de temperatura.

El primero en darse cuenta que el calor era otra forma de energía fue el Conde Rumford cuando fue comisionado por el gobierno de Baviera para dirigir el taladrado de cañones. Para evitar el calentamiento excesivo, el taladro del cañón se mantenía lleno de agua, y como ésta hervía durante el proceso del taladrado, el depósito tenía que rellenarse continuamente. Se admitía que para hervir el agua había que suministrarle calórico, y la producción continua de calórico se explicaba por la hipótesis de que cuando la materia se dividía finamente (como sucedía en el proceso del taladrado) disminuía su capacidad para retener el calórico, el cual, desprendido de esta forma hacía hervir el agua.

Rumford observó, sin embargo, que el agua de refrigeración continuaba hirviendo cuando la herramienta se ponía tan roma que no cortaba. Esto es, la herramienta roma constituía todavía aparentemente un depósito inextinguible de calórico mientras se realizara trabajo para hacer girar la herramienta. Aseguró que lo que se había interpretado anteriormente como una entidad distinta, esto es, el calórico, era en realidad simplemente energía en otra forma. El proceso no era la desaparición continua de una cosa y la aparición de otra, sino, sencillamente, la transformación de la energía de una forma a otra. Como diríamos hoy, la energía mecánica se transformaba continuamente en calor, y el proceso constituía un ejemplo del principio de conservación de la energía.

Hay naturalmente, procesos termodinámicos para cuya interpretación es enteramente satisfactoria la teoría del calórico, por ejemplo cuando el calor

pasa de un cuerpo a otro o cuando se mezclan sustancia a distintas temperaturas.

Veamos ahora un experimento que nos muestra como podemos calentar agua sin colocarla en contacto con una fuente de calor.

El experimento se denomina de Joule y usa un pequeño tambor lleno de agua que se encuentra rodeado por una cinta de la cual cuelga una pesa. En el tambor se encuentra insertado un termómetro que está en contacto con el agua. Al dar vuelta la manilla y deslizar la cinta sobre la superficie del tambor vemos que el termómetro marca una elevación de temperatura.

¿Qué ha sucedido en este caso? Simplemente el trabajo realizado al dar vuelta la manilla se ha convertido en calor, con lo cual tenemos que el calor es una forma de energía.

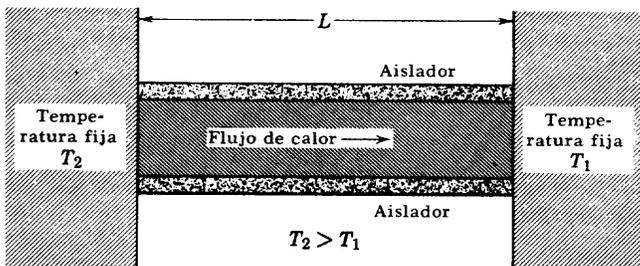
## PROPAGACIÓN DEL CALOR

Veamos ahora las distintas formas que tiene el calor de propagarse o transmitirse de un cuerpo a otro.

### **Conducción**

Si un extremo de una barra metálica se coloca en una llama mientras el otro se sostiene con la mano, se observará que esta parte de la barra se va calentando cada vez más, aunque no está en contacto con la llama. Decimos que el calor alcanza el extremo frío de la barra por conducción a lo largo o a través de la sustancia que la forma.

Los metales son buenos conductores de la electricidad y así mismo buenos conductores del calor.



La conducción de calor puede tener lugar únicamente cuando las distintas partes del cuerpo se encuentran a temperaturas diferentes. La dirección del flujo calórico es siempre de los puntos de mayor a menor temperatura.

Experimentalmente se encuentra que la cantidad de calor que atraviesa la lámina por unidad de tiempo, en el estado estacionario es directamente proporcional a la superficie  $A$  y a la diferencia de temperaturas  $T_2 - T_1$ , e

inversamente proporcional al espesor  $L$ . La cantidad de calor que pasa a través de la lámina por unidad de tiempo, esta dada por

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \propto \frac{A(T_2 - T_1)}{L} \quad (9T)$$

En el límite de una losa de espesor infinitesimal  $dx$  entre cuyas caras hay una diferencia de temperatura  $dT$ , obtenemos la ley fundamental de la conducción del calor

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (10T)$$

$\frac{dQ}{dt}$  es la rapidez de transmisión del calor a través del área  $A$

$\frac{dT}{dx}$  se llama gradiente de temperatura

$k$  se denomina coeficiente de conductibilidad térmica.

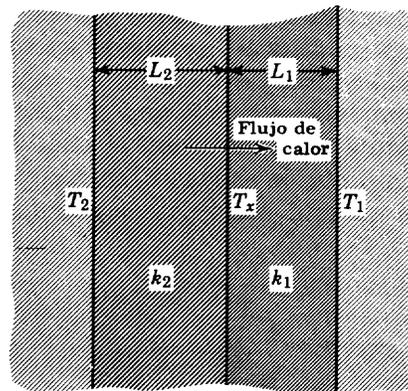
Si consideramos una varilla de longitud  $L$  y sección transversal  $A$  en la cual se ha llegado a un régimen estable o sea que la temperatura es constante en cada punto en el transcurso del tiempo. Obtenemos que la expresión (10T) tiene la forma

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad (11T)$$

Veamos que forma toma la expresión (11T) cuando existe conducción a través de dos capas de diferente conductividad térmica.

En las condiciones de régimen estable tenemos que

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$



Sea  $T_x$  la temperatura en la interfase entre los dos materiales.

Tenemos entonces

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = -\frac{k_2 A (T_x - T_2)}{L_2} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (12T)$$

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = -\frac{k_1 A (T_1 - T_x)}{L_1} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (13T)$$

De las ecuaciones (12T) y (13T) se obtiene

$$-k_2 A T_x + k_2 A T_2 = L_2 \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (14T)$$

$$-k_1 A T_1 + k_1 A T_x = L_1 \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (15T)$$

Eliminando  $T_x$  entre las ecuaciones (14T) y (15T) tenemos

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{(L_1 / k_1 + L_2 / k_2)} \quad (16T)$$

La generalización para un número cualesquiera de secciones en serie tiene la siguiente expresión.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum (L_i / k_i)} \quad (17T)$$

### **Convección**

El término convección se aplica a la propagación de calor de un lugar a otro por un movimiento real de la sustancia caliente. Son ejemplos de esto la estufa de aire caliente y el sistema de calefacción por agua caliente.

### **Radiación**

Cuando colocamos la mano en contacto con un radiador de calefacción de agua caliente o vapor, el calor alcanza la mano por una conducción a través de las paredes del radiador. Si la mano se mantiene encima del radiador pero no en contacto con él, el calor alcanza la mano por medio de un movimiento de convección hacia arriba de las corrientes de aire. Si se coloca la mano a un lado del radiador todavía se calienta, aunque la conducción a

través del aire es despreciable y la mano no está en la trayectoria de las corrientes de convección. La energía alcanza ahora la mano por radiación.

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos. Esta energía se transmite en forma de ondas electromagnéticas de idéntica naturaleza que las ondas luminosas, las ondas de radio o los rayos X, de los que difiere por la longitud de onda. Estas ondas se propagan con la velocidad de la luz y se transmiten a través del vacío lo mismo que a través del aire. Cuando inciden en un cuerpo no transparente a ellas, como en este caso la mano o las paredes de la habitación, son absorbidas y su energía transformada en calor.

La energía radiante emitida por una superficie, por unidad de tiempo y unidad de área, depende de la naturaleza de la superficie y de su temperatura

$$W \propto T^4$$

Si un cuerpo está a diferente temperatura al medio ambiente que lo rodea, la cantidad de calor que absorbe es diferente a la que emite. Si esta más caliente la cantidad de energía que emite es mayor que la que absorbe y si está más frío la cantidad de energía que emite es menor que la que absorbe para así poder llegar a una temperatura de equilibrio con el medio ambiente.

En equilibrio térmico con su medio ambiente absorbe y emite la misma cantidad de energía y de esa manera su temperatura no varía.

Por lo tanto un cuerpo que es un buen absorbente de la energía calórica es a la vez un buen emisor, por ejemplo un cuerpo negro. En cambio un cuerpo plateado que es un buen reflector y por lo tanto un mal absorbente será en consecuencia un mal emisor.

Un termo es un dispositivo que se utiliza para conservar el calor, evitando que existan pérdidas. Es un recipiente de doble pared de vidrio, entre las cuales se ha hecho el vacío de modo que elimina prácticamente la propagación de calor por conducción y convección. Para reducir la energía emitida hasta el valor mínimo posible, se recubren las paredes con una capa de plata que es muy reflectante y por lo tanto muy mal emisor.

### ***Cantidad de calor***

La cantidad de calor que interviene en un proceso se mide por algún cambio que acompaña a este proceso, una unidad de calor se define como el calor necesario para producir alguna transformación tipo convenida. Citaremos tres de estas unidades, la caloría-Kilogramo (kcal), la calorí-gramo (cal) y la unidad térmica británica (Btu).

La *caloría-kilogramo* es la cantidad de calor que ha de suministrarse a un kilogramo de agua para elevar su temperatura en un grado centígrado entre  $14.5^{\circ}\text{C}$  a  $15.5^{\circ}\text{C}$ .

La *caloría gramo* es la cantidad de calor que ha de suministrarse a un gramo de agua para elevar su temperatura en un grado centígrado  $14.5^{\circ}\text{C}$  a  $15.5^{\circ}\text{C}$ .

La *Btu* es la cantidad de calor que ha de suministrarse a una libra de agua para elevar su temperatura en un grado Fahrenheit entre  $63^{\circ}\text{F}$  a  $64^{\circ}\text{F}$ .

Las unidades de cantidad de calor tiene la siguiente relación

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 3.968 \text{ Btu}$$

Representaremos la cantidad de calor con la letra  $Q$ .

Es esencial que la distinción entre cantidad de calor y temperatura se interprete con toda claridad. Generalmente, estas expresiones suelen confundirse en la vida cotidiana.

Clarifiquemos la diferencia entre cantidad de calor y temperatura a través de un ejemplo.

Supongamos que se tienen dos recipientes idénticos, uno de los cuales contiene una pequeña cantidad de agua y el cual denominaremos  $R_p$  y otro que contiene una gran cantidad de agua y el cual denominaremos  $R_g$ ; si colocamos ambos recipientes sobre mecheros de gas idénticos y los calentamos durante el mismo tiempo o sea proporcionamos a ambos recipientes la misma cantidad de calor, se puede comprobar que el agua contenida en el recipiente  $R_p$  alcanza mayor temperatura que la contenida en el recipiente  $R_g$ .

En este ejemplo se ha suministrado la misma cantidad de calor a cada recipiente con agua, pero el incremento de temperatura no es el mismo en los dos casos.

## EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

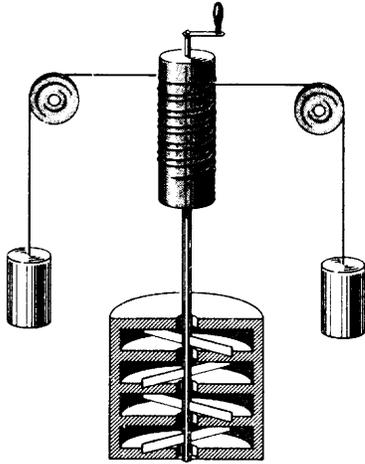


Fig. H-22-6

Puede encontrarse la relación de magnitud entre las unidades calóricas y las unidades mecánicas mediante un experimento en el cual una cantidad medida de energía mecánica se transforma en una cantidad determinada de calor.

Los primeros experimentos precisos fueron realizadas por Joule, utilizando un aparato (ver fig.) en el cual unas pesas que caen hacen girar un conjunto de paletas dentro de un recipiente que contiene agua.

La energía transformada se midió en unidades mecánicas conociendo el peso de los cuerpos y su descenso, y en unidades calóricas a partir de la masa del agua y de su elevación de temperatura.

En métodos más recientes y precisos, la energía eléctrica se convierte en calor en una resistencia sumergida en agua. Los mejores resultados obtenidos dan

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

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} = 777.9 \text{ pies lb}$$

Esto es, cuando se convierten en calor 4186 joules de energía mecánica, elevan la temperatura de 1 Kg de agua de 14.5° a 15.5° C.

### **Capacidad calórica**

Las sustancias difieren entre sí en la cantidad de calor necesaria para producir una elevación determinada de temperatura sobre una masa dada. Supongamos que se suministra a un cuerpo una cantidad de calor  $\Delta Q$ , que produce una elevación  $\Delta T$  de su temperatura. La razón de la cantidad de calor suministrada al correspondiente incremento de temperatura se denomina capacidad calórica del cuerpo y se designa por la letra  $C$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (18T)$$

Las capacidades calóricas se expresan ordinariamente en calorías por grado centígrado, o en Btu por grado Fahrenheit. Si hacemos  $\Delta T = 1$  en la Ec.(18T), vemos que la capacidad calórica de un cuerpo es numéricamente igual a la cantidad de calor que hay que suministrarle para incrementar su temperatura en un grado.

### **Calor específico**

Para obtener una cifra que sea característica de la sustancia de que está hecho el cuerpo, se define el calor específico de una sustancia como la capacidad calórica por unidad de masa de un cuerpo formado por dicha sustancia. Representaremos el calor específico por la letra  $c$

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (19T)$$

El calor específico se expresa en calorías por gramo-grado centígrado, o en Btu por libra-grado Fahrenheit.

De la Ec.(19T) se deduce que el calor que ha de suministrarse a un cuerpo de masa cuyo valor específico es  $c$ , para aumentar su temperatura en  $\Delta T$ , es

$$Q = mc\Delta T = mc(T_f - T_i) \quad (20T)$$

Puesto que cuando un cuerpo absorbe calor se calienta o sea  $T_f > T_i$  tenemos entonces a partir de la expresión (20T) que

$$Q_{abs} > 0$$

Puesto que cuando un cuerpo pierde calor se enfría o sea  $T_f < T_i$  tenemos entonces a partir de la expresión (20T) que

$$Q_{ced} < 0$$

Ni la capacidad calórica de un cuerpo, ni el calor específico de un material es constante, sino que depende de la situación del intervalo de temperaturas. Las ecuaciones anteriores dan solamente valores medios de esas cantidades en el intervalo de temperaturas  $\Delta T$ . El calor específico  $c$  de un material a cualquier temperatura se define como

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (21T)$$

Por consiguiente, la cantidad de calor que debe proporcionarse a un cuerpo de masa  $m$ , cuyo material tiene un calor específico  $c$ , para elevar su temperatura de  $T_i$  a  $T_f$  es

$$Q = m \int_{T_i}^{T_f} c dT \quad (22T)$$

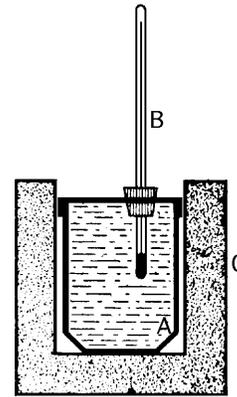
siendo  $c$  función de la temperatura.

A temperaturas ordinarias y en intervalos de temperatura ordinarios, los calores específicos se pueden tomar como constantes.

### **Calorimetría**

El término calorimetría se refiere a la medida de la cantidad de calor. Describiremos un tipo de calorímetro: el calorímetro de agua.

Este calorímetro, en su forma más sencilla, consiste en una vasija metálica A, de paredes delgadas, cuya capacidad es aproximadamente de dos litros y cuya superficie exterior está niquelada con el fin de reducir la pérdida de calor por radiación. La vasija contiene una cantidad conocida de agua y está provista de una tapa a través de la cual pasa un termómetro, B. Las pérdidas de calor se reducen a un mínimo rodeando la vasija con una envoltura C impermeable al calor.



Si leemos el termómetro antes y después que una cantidad  $Q$  desconocida de calor se haya introducido en el calorímetro, puede determinarse  $Q$  a partir de la elevación de temperatura producida.

El calorímetro de agua puede emplearse para medir el calor específico de una sustancia, para lo cual se procede del siguiente modo:

- a) Se agita el agua y se mide su temperatura inicial.
- b) Luego se calienta hasta una temperatura conocida, una muestra de la sustancia.
- c) Se introduce la muestra en el calorímetro, se agita el agua para conseguir el equilibrio y se mide la temperatura final del agua.

Si no hay pérdidas de calor durante el experimento, el calor cedido por la muestra al enfriarse ha de ser igual al calor absorbido por el agua y el calorímetro.

De la ecuación (20T) tenemos que el calor absorbido es positivo y el calor cedido es negativo, por lo tanto

$$\Delta Q_{\text{absorbido}} = -\Delta Q_{\text{cedido}}$$

Entonces este caso tenemos que

$$\Delta Q_{\text{absorbido}} (\text{agua} + \text{calorímetro}) = -\Delta Q_{\text{cedido}} (\text{muestra})$$

$$\Delta Q_{\text{absorbido}} (\text{agua}) + \Delta Q_{\text{absorbido}} (\text{calorímetro}) = -\Delta Q_{\text{cedido}} (\text{muestra})$$

Utilizando la expresión (19T) tenemos en términos generales que

$$\Delta Q = cm(T_f - T_i)$$

Si designamos por

	Agua	Calorímetro	Muestra
masa	$m_A$	$m_c$	$m_m$
calor específico	$c_A$	$c_c$	$c_m$
temperatura inicial	$T_{iA}$	$T_{ic}$	$T_{im}$
temperatura final	$T_{fA}$	$T_{fc}$	$T_{fm}$

$$c_A m_A (T_{fA} - T_{iA}) + c_c m_c (T_{fc} - T_{ic}) = -c_m m_m (T_{fm} - T_{im}) \quad (23T)$$

Donde  $T_{iA} = T_{ic}$  y  $T_{fA} = T_{fc} = T_{fm} = T_e$  y  $c_A = 1 \text{Kcal}$

Se obtiene a partir de (23T)

$$c_m = -\frac{c_A m_A (T_e - T_{iA}) + c_c m_c (T_e - T_{iA})}{m_m (T_e - T_{im})} = \frac{(c_A m_A + c_c m_c)(T_e - T_{iA})}{m_m (T_{im} - T_e)}$$

Realmente, el calorímetro durante el experimento ganará (o perderá) calor procedente del medio que lo rodea, a menos que se tomen precauciones especiales. Un procedimiento de reducir al mínimo esta transmisión de calor es comenzar con el calorímetro algo más frío que el medio que lo rodea y acabar cuando su temperatura excede de la de dicho medio en una cantidad igual a la diferencia inicial.

Se observará que este método de medida de valores específicos da únicamente el calor específico medio correspondiente al intervalo de

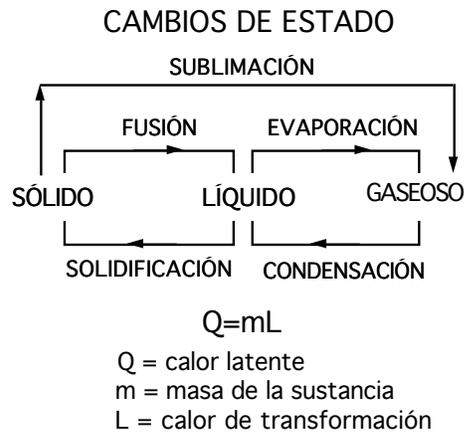
temperatura entre  $T_{im}$  y  $T_{fm}$ . Son necesarios aparatos más complicados para medir el calor específico a una temperatura cualquiera.

En calorimetría moderna las cantidades de calor se miden casi siempre en función de la energía eléctrica proporcionada a un baño de agua al hacer pasar una corriente por una resistencia que se encuentra dentro él, raras veces se miden observando la elevación de la temperatura de un baño de agua.

## CAMBIOS DE ESTADO

La materia puede existir en estado sólido, líquido o gaseoso.

Siempre que no se descompongan a elevadas temperaturas, todas las sustancias pueden existir en cualquiera de los tres estados cuando se encuentran en condiciones adecuadas de presión y temperatura.



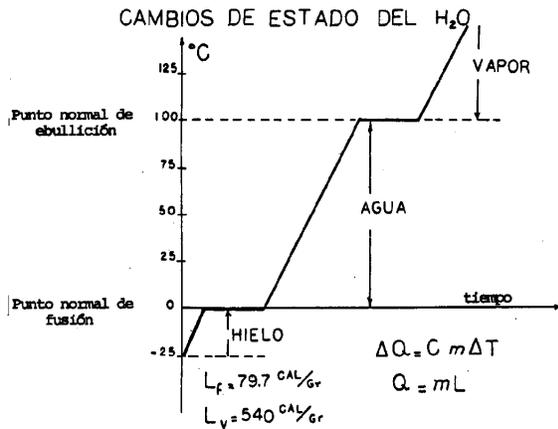
Los cambios de un estado a otro van acompañados de absorción o desprendimiento de calor y, ordinariamente, de cambios de volumen. Para pasar del estado sólido a líquido y del estado líquido a gaseoso se necesita absorber una cantidad  $Q$  de calor.

Para pasar del estado gaseoso a líquido y del estado líquido a sólido se necesita ceder una cantidad  $Q$  de calor.

$$Q = mL \quad (24T)$$

Tenemos que el calor de fusión es igual al calor de solidificación, y que el calor de evaporación es igual al calor de condensación.

$L$  se denomina calor de transformación y representa el calor absorbido o cedido por unidad de masa en el cambio de estado.



Así, la sustancia química H<sub>2</sub>O existe en estado sólido (hielo), en estado líquido (agua) y en estado gaseoso (vapor) .

Mientras transcurre el cambio de un estado a otro la temperatura se mantiene constante en un determinado valor, todo el calor absorbido o cedido se va en el cambio de un estado a otro y no en elevación de temperatura.

## SISTEMA Y MEDIO AMBIENTE

Cuando estudiamos los cambios de energía, enfocamos nuestra atención sobre una parte pequeña, bien definida del universo. La porción cuyo detalle se estudia se denomina sistema y el resto se denomina entorno o medio ambiente. Cuando observamos una reacción química en el Laboratorio, las sustancias químicas suelen constituir el sistema, el recipiente y todo lo que lo rodea se considera el medio ambiente.

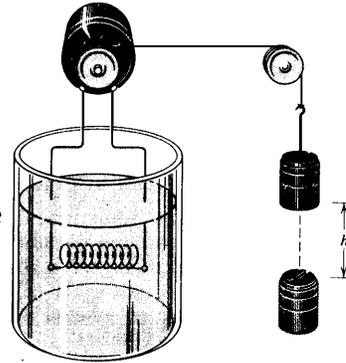
Por ejemplo consideremos una mezcla de gas hidrógeno H<sub>2</sub> y gas oxígeno O<sub>2</sub> contenida en un cilindro con un émbolo. Si nos interesa estudiar las propiedades de los gases solamente, estos constituyen el sistema y el cilindro y el pistón se consideran el medio ambiente.

La termodinámica se preocupa de estudiar los procesos termodinámicos y los intercambios de energía que intervienen en la ejecución de trabajo y en el flujo de calor. Se entiende por procesos termodinámicos aquellos en los cuales el sistema se mueve desde un estado de equilibrio a otro interactuando con el medio ambiente.

Tenemos que el calor es energía que fluye de un cuerpo a otro debido a que hay entre ellos una diferencia de temperatura. En cambio trabajo es energía que se transmite de un sistema a otro de tal manera que no interviene directamente una diferencia de temperatura.

Analicemos ahora la siguiente situación:

La Fig. muestra una pesa que al caer hace girar un generador, el cual, a su vez, manda una corriente eléctrica por una resistencia colocada dentro del agua de un recipiente.



a) Consideremos que el sistema sea el generador y el circuito eléctrico conectado con él, el agua, y su recipiente.

Entonces el medio ambiente es la pesa y la tierra que atrae a la pesa. El proceso consiste en dejar caer la pesa una distancia  $h$  en el campo gravitacional de la tierra. Durante este proceso, el medio ambiente (por medio de la cuerda) hace trabajo  $W$  sobre el sistema. No hay diferencias de temperatura entre el sistema y su medio ambiente y, por consiguiente,  $Q = 0$  para este proceso.

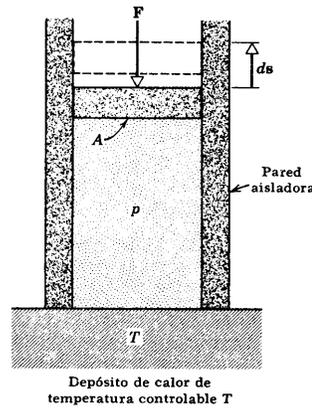
b) Nuestra elección de un sistema en los problemas de la termodinámica es arbitraria. Consideremos ahora que el sistema sea únicamente el agua y su recipiente. El medio ambiente sería ahora el generador y el circuito conectado a él, así como la pesa y la tierra. Para esta elección de sistema ahora sí hay una diferencia de temperatura entre el medio ambiente (la resistencia) y el sistema (el agua), y fluirá una cantidad de calor  $Q$  entrando al sistema durante este proceso. Sin embargo, no abran fuerzas a través de las fronteras del sistema capaces de producir desplazamiento y, por consiguiente, para este proceso  $W = 0$ .

Este ejemplo muestra que debemos establecer primero en forma bien definida que cosa es el sistema y cuál es su medio ambiente antes de poder decidir si el cambio del sistema se debe al flujo de calor o a que se ejecute trabajo, o a ambas cosas. Habrá una transmisión de calor entre el sistema y el medio ambiente sólo en el caso de que haya una diferencia de temperaturas a través de la frontera del sistema; si no hay una diferencia de temperaturas, la transmisión de energía se efectúa con trabajo.

## CALOR Y TRABAJO

Analicemos ahora que sucede con el calor  $Q$  y el trabajo  $W$  para un proceso termodinámico específico.

Consideremos un gas en un depósito cilíndrico que tiene un émbolo móvil (ver fig.), sus paredes son aislantes y su base se encuentra ubicada sobre una fuente de calor. Consideremos el gas como el sistema, el depósito y la fuente de calor como el medio ambiente.



Tenemos entonces que se ejerce una fuerza  $F_{ext}$  sobre el gas la cual esta dada por la presión atmosférica y por el peso del émbolo.

$$F_{ext} = P_{atm}A + m_{emb}g \quad (25T)$$

El gas a su vez ejerce una fuerza  $F_g$  sobre la parte inferior de émbolo.

$$F_g = P_g A \quad (26T)$$

Si la magnitud de ambas fuerzas es igual o sea

$$F_g = F_{ext}$$

el émbolo se encuentra en equilibrio.

Si en esta situación de equilibrio procedemos a calentar el gas, éste se dilata haciendo que  $F_g$  crezca. Por lo cual  $F_g > F_{ext}$  y por lo tanto existe una fuerza resultante que hará que el émbolo tenga un desplazamiento  $ds$  hacia arriba y el gas entonces realizará un trabajo  $dW_g$  dado por la siguiente expresión

$$dW_g = \vec{F}_g \cdot d\vec{s} = F_g dS \cos 0^\circ = F_g dS \quad (27T)$$

Reemplazando la expresión (26T) en (27T) tenemos que

$$dW_g = F_g ds = P_g A ds = P_g dV \quad (28T)$$

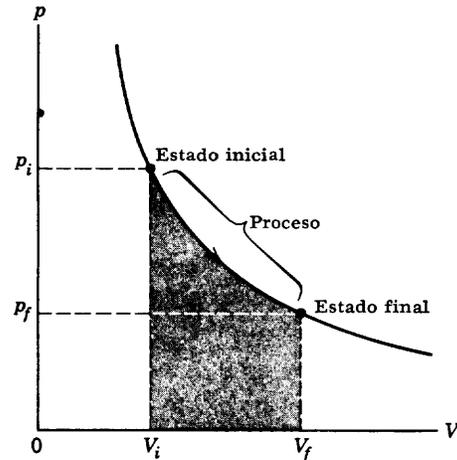
Siendo  $dV$  el cambio diferencial de volumen del gas. En general, la presión no será constante durante el desplazamiento. Para obtener el trabajo total efectuado sobre el émbolo por el gas en un desplazamiento grande, debemos saber cómo varía  $p$  con respecto al desplazamiento. Entonces calculamos la integral

$$W_g = \int dW_g = \int_{V_i}^{V_f} p_g dV \quad (29T)$$

entre los límites de volumen.

Esta integral se puede valorar gráficamente como el área bajo la curva de un diagrama p-V, como se muestra para un caso especial en la Fig. de la derecha.

En la situación física que estamos analizando también podemos proceder a quitar calor al gas, eso implicaría que la presión disminuya y el émbolo se desplace hacia abajo, realizando el gas en este caso un trabajo negativo.



Podemos ver a partir de la ecuación (27 T) que el trabajo realizado por el gas es positivo cuando el gas se expande y negativo cuando el gas se comprime.

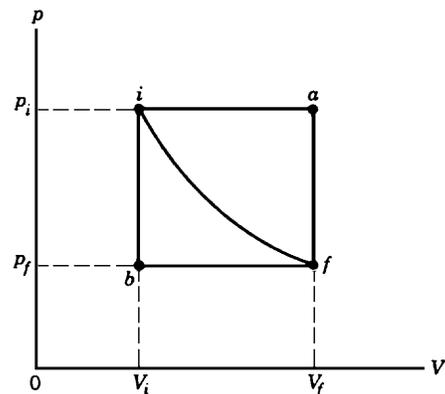
En el proceso que acabamos de analizar se realizó trabajo  $W$  e intercambio de calor  $Q$  entre el sistema y el medio ambiente para ir de una situación inicial a una situación final.

Tenemos que cualquier proceso termodinámico se puede representar en un diagrama P-V.

De la fig. vemos que se puede ir de la posición inicial a la final por medio de distintos procesos termodinámicos.

Consideremos para ir de la posición inicial  $i$  a la final  $f$  las siguientes trayectorias:

- Trayectoria  $i \rightarrow a \rightarrow f$
- Trayectoria  $i \rightarrow f$
- Trayectoria  $i \rightarrow b \rightarrow f$



Considerando que el trabajo realizado por el gas está representado por el área bajo la curva en un diagrama P-V, podemos ver que el trabajo es diferente para las distintas trayectorias que unen los estados inicial y final.

También podemos determinar el calor absorbido o cedido en un proceso para ir de una situación inicial a una situación final. Se obtiene que dicho calor depende del proceso que una ambas situaciones o sea el calor es diferente para las distintas trayectoria que unen los estados inicial y final.

Tenemos entonces que tanto el trabajo como el calor dependen del proceso termodinámico que se realice para ir de una situación a otra. Ninguno de los dos es independiente del recorrido que se siga.

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA

Hemos visto que en el proceso representado en la fig. anterior, tanto el calor  $Q$  como el trabajo  $W$  dependen de la trayectoria que se siga para unir la posición inicial y final.

Pero si calculamos  $Q-W$  para cada una de esas trayectorias nos encontramos entonces que, en todos los casos, la cantidad  $Q-W$  es la misma. Esto es, aun cuando  $Q$  y  $W$  aisladamente dependen de la trayectoria seguida,  $Q-W$  no depende en absoluto como se lleve el sistema del estado  $i$  al estado  $f$  sino solamente de los estado inicial y final (de equilibrio).

Tenemos entonces en general que si un sistema que cambia de un estado de equilibrio inicial  $i$  a un estado de equilibrio final  $f$  de una manera definida, siendo  $Q$  el calor absorbido por el sistema y  $W$  el trabajo desarrollado por el mismo, la cantidad  $Q-W$  depende solamente de la posición inicial y final.

Recordemos de mecánica que al mover un objeto de un punto inicial  $i$  a un punto final  $f$  en un campo gravitacional no habiendo rozamiento, el trabajo efectuado depende solamente de las posiciones de los dos puntos y no del recorrido que hizo el cuerpo al moverse. De aquí deducimos que hay una función de las coordenadas espaciales del cuerpo cuyo valor final menos su valor inicial es igual al trabajo efectuado al desplazar el cuerpo. La llamabamos función de energía potencial.

Ahora, en termodinámica, encontramos que al cambiar un sistema del estado  $i$  al estado  $f$  la cantidad  $Q-W$  depende solamente de las coordenadas iniciales y finales de la trayectoria seguida entre los puntos extremos. Llegamos a la conclusión de que hay una función de las coordenadas termodinámicas cuyo valor final menos su valor inicial es igual al cambio  $Q-W$  que ocurre en el proceso. A esta función la llamamos **energía interna**.

Ahora bien,  $Q$  es la energía agregada al sistema por la transmisión de calor y  $W$  es la energía producida por el sistema al efectuar trabajo, de

manera que  $Q - W$  representa, por definición, el *cambio de energía interna del sistema*. Representaremos con la letra  $U$  la función de energía interna. Entonces la energía interna de sistema en el estado  $f$ ,  $U_f$ , menos la energía interna del sistema en el estado  $i$ ,  $U_i$ , es simplemente el cambio de energía interna del sistema, y esta cantidad **tiene un valor definido, independiente de cómo pasó el sistema del estado  $i$  al estado  $f$** . Tenemos:

$$U_f - U_i = \Delta U = Q - W \quad (30T)$$

Lo mismo que para la energía potencial, para la energía interna lo que importa es el cambio. Si se escoge algún valor arbitrario para la energía interna de algún estado de referencia patrón, se puede dar un valor definido a su valor en cualquier otro estado.

La ecuación (30T) se conoce como la **Primera Ley de la Termodinámica**. Al aplicarla debemos recordar que  $Q$  se considera positivo cuando entra calor al sistema y  $W$  es positiva cuando el sistema hace trabajo.

Si nuestro sistema sufre solamente un cambio infinitesimal en su estado, sólo será absorbida una cantidad infinitesimal de calor  $dQ$  y solamente se efectuará una cantidad infinitesimal de trabajo  $dW$ , de manera que el cambio de energía interna  $dU$  es también infinitesimal. En tal caso, la primera ley se escribe en forma diferencial como

$$dU = dQ - dW \quad (31T)$$

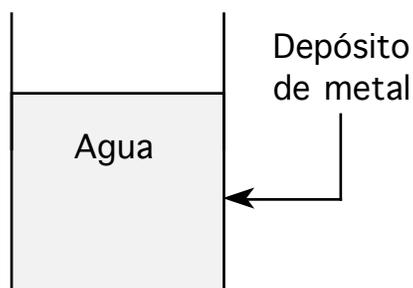
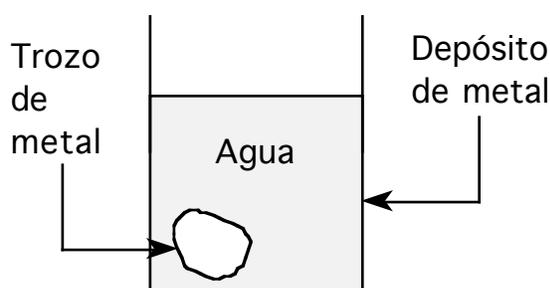
## PROBLEMAS

### 1) Problema H-22-5, N 3

Calcular el calor específico de un metal a partir de los siguientes datos. Un depósito hecho de dicho metal pesa 35.6 N y contiene además 133.5 N de agua.

Un trozo de metal de 17.8 N que está inicialmente a una temperatura de  $177^\circ\text{C}$  se arroja en el agua .

El agua y el depósito tienen inicialmente una temperatura de  $15.5^\circ\text{C}$  y la temperatura final de todo el sistema es de  $18.3^\circ\text{C}$ .

**Desarrollo****Representación gráfica de la situación física****Situación inicial****Situación Final****Tabla de Información**

<b>Datos</b>	<b>Conversión de unidades</b>
$P_d = 35.6N$ Peso depósito $P_A = 133.5N$ Peso agua $P_m = 17.8N$ Peso trozo de metal $T_{im} = 177^\circ C$ T inicial del metal $T_{id} = 15.5^\circ C$ T inicial del depósito $T_{iA} = 15.5^\circ C$ T inicial del agua $T_e = 18.3^\circ C$ T de equilibrio $c_A = 1 \frac{Kcal}{Kg^\circ C}$ Calor específico del agua	
<b>Preguntas</b>	<b>Consideraciones Generales</b>
$c_m = ?$ Calor específico del metal	El depósito y el trozo de metal son del mismo material. $\Rightarrow c_d = c_m = ?$

**Plan de Solución**

El agua y el depósito se encuentran originalmente a diferente temperatura que el trozo de metal (muestra del metal) y alcanzan el equilibrio térmico después de ponerse en contacto.

Tenemos de la expresión (20T) que

$$Q_{abs} = -Q_{ced}$$

Por lo tanto en este caso

$$Q_{abs}(\text{depósito} + \text{agua}) = -Q_{ced}(\text{muestra})$$

$$Q_{abs}(\text{depósito}) + Q_{abs}(\text{agua}) = -Q_{ced}(\text{muestra}) \quad (1-P1)$$

De la definición de calor específico (10T) tenemos que

$$Q_{abs}(\text{depósito}) = c_d m_d (T_e - T_{id}) \quad (2-P1)$$

$$Q_{abs}(\text{agua}) = c_A m_A (T_e - T_{iA}) \quad (3-P1)$$

$$Q_{ced}(\text{muestra}) = c_m m_m (T_e - T_{im}) \quad (4-P1)$$

Vemos que combinando estas expresiones con (1-P1) y considerando que que el depósito esta hecho del mismo metal que el trozo que se introduce en la vasija podemos obtener el calor específico del metal  $c_m$  puesto que todos los otros datos son conocidos.

### **Solución**

Reemplazando en la ecuación (1-P1) las expresiones (2-P1), (3-P1) y (4-P1) tenemos

$$c_d m_d (T_e - T_{id}) + c_A m_A (T_e - T_{iA}) = -c_m m_m (T_e - T_{im}) \quad (5-P1)$$

multiplicando la expresión por g y considerando que  $c_m = c_d$  obtenemos

$$c_m [P_m (T_e - T_{im}) + P_d (T_e - T_{id})] = -c_A P_A (T_e - T_{iA})$$

$$c_m = \frac{-c_A P_A (T_e - T_{iA})}{P_m (T_e - T_{im}) + P_d (T_e - T_{id})}$$

reemplazando los valores numéricos se obtiene finalmente

$$c_m = \frac{-1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \times 133.5 \text{N} \times (18.3 - 15.5)^\circ\text{C}}{17.8 \text{N} (18.3 - 177)^\circ\text{C} + 35.6 \text{N} (18.3 - 15.5)^\circ\text{C}} = 0.14 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

## 2) Problema H-22-1, N 20

En un experimento de Joule, una masa de 6.0 Kg cae desde una altura de 50 m y hace girar una rueda de aspas que agita a 0.600 kg de agua. El agua está inicialmente a  $15^{\circ}\text{C}$  ¿Cuánto se eleva su temperatura?

### Desarrollo

### Representación gráfica de la situación física

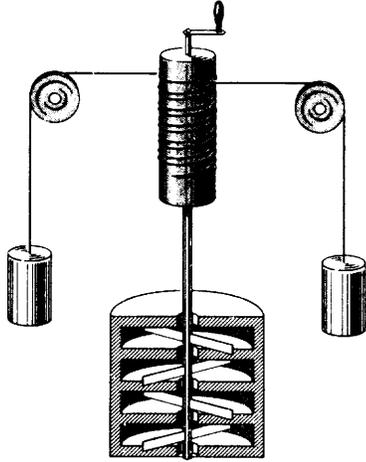


Fig. H-22-6

El dispositivo que se propone sea usado en este problema fue el utilizado por Joule para obtener el equivalente mecánico del calor o sea la relación que existe entre la unidades de energía mecánica y calórica.

### Tabla de Información

<b>Datos</b>	<b>Conversión de unidades</b>
$m = 6.0 \text{ Kg}$ $h = 50 \text{ m}$ $m_A = 0.600 \text{ Kg}$ $T_i = 15^{\circ}\text{C}$	$c_A = 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} = 4186 \frac{\text{joule}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}}$
<b>Pregunta</b>	<b>Consideraciones generales</b>
$\Delta T = ?$	

### Plan de Solución

Considerando que toda la energía potencial  $E_p$  de la masa que cae se convierte en calor tenemos entonces que

$$E_p = Q \quad (1-P2)$$

La energía potencial de una masa que se encuentra a una altura  $h$  esta dada por

$$E_p = mgh \quad (2-P2)$$

Si todo el calor  $Q$  es absorbido por el agua tenemos entonces que

$$Q = m_A c_A \Delta T \quad (3-P3)$$

### **Solución**

Reemplazando las expresiones (2-P2) y (3-P2) en (1-P2) tenemos

$$mgh = m_A c_A \Delta T$$

De donde se obtiene

$$\Delta T = \frac{mgh}{m_A c_A}$$

Reemplazando los valores numéricos correspondientes tenemos

$$\Delta T = \frac{6.0 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/seg}^2 \times 50 \text{ m}}{0.600 \text{ kg} \times 4186 \text{ joule/kg}^\circ\text{C}} = 1.17^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 1.17^\circ\text{C}$$

### **3) Problema H-22-17, N 13**

Supongan que la conductividad térmica del cobre sea el doble de la del aluminio y cuatro veces mayor que la del latón. Tres varillas de metal hechos de cobre, aluminio y latón, respectivamente son cada una de ellas 6.0 in de largo y 1.0 in de diámetro. Estas varillas se colocan una a continuación de la otra estando la de aluminio entre las otras dos. Los extremos libres de las varillas de cobre y latón se conservan a  $100^\circ\text{C}$  y a  $0^\circ\text{C}$  respectivamente. Encontrar las temperaturas de equilibrio de la junta Cobre-Aluminio y de la junta Aluminio-Latón.

### **Desarrollo**

#### **Representación gráfica de la situación física**



### Tabla de Información

Datos	Conversión de Unidades
$k_{Cu} = 2k_{Al} = 4k_{Latón}$ $k_{Cu} = 9.2 \times 10^{-2} \text{ Kcal/s m } ^\circ\text{C}$ $T_1 = 0^\circ\text{C}$ $T_2 = 100^\circ\text{C}$ $L_{Cu} = L_{Al} = L_{Latón} = L = 6.0 \text{ in}$ $d_{Cu} = d_{Al} = d_{Latón} = d = 1.0 \text{ in}$	$1 \text{ m} = 39.37 \text{ in}$ $1 \text{ in} = 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}$
Preguntas	Consideraciones generales
$T_{CuAl}$ Temperatura en la junta Cu-Al $T_{AlLatón}$ Temperatura en la junta Al-Latón	

### Plan de Solución

Puesto que se mantienen constante los focos de temperatura en los extremos de la varilla compuesta, se trata de un régimen estable (no varía la temperatura a través del tiempo a lo largo de la varilla) por lo tanto la rapidez de transmisión del calor en los distintos materiales es la misma e igual a la que existe en la varilla compuesta.

$$\frac{\Delta Q_{Cu}}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_{Al}}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_{Latón}}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1-P3)$$

- Aplicando la expresión (11T) a los tramos Cobre y Latón del alambre compuesto,
- designando a la temperatura entre el Cobre y el Aluminio por  $T_{CuAl}$  y a la temperatura entre el aluminio y el Latón por  $T_{AlLatón}$ ,
- considerando además que todos los alambres tienen la misma longitud y diámetro, y
- utilizando le expresión (1-P3).

Tenemos

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = - \frac{AK_{Cu}(T_{CuAl} - T_2)^\circ\text{C}}{L} \quad (2-P3)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = - \frac{AK_{Latón}(T_1 - T_{AlLatón})}{L} \quad (3-P3)$$

De estas expresiones vemos que conociendo  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  podemos obtener las temperaturas  $T_{CuAl}$  y  $T_{AlLatón}$  solicitadas.

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  lo podemos obtener de la ecuación (17 T) para la rapidez de transmisión del calor a través de tres capas de materiales de diferentes conductividades térmicas

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\frac{L_{Cu}}{k_{Cu}} + \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_{Latón}}{K_{Latón}}} \quad (4-P3)$$

### Solución

Reemplazando en la expresión (4-3P) las conductividades térmicas del Aluminio y Latón en función de la conductividad térmica del Cobre y considerando que todas las varilla tienen la misma longitud  $L$  tenemos:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\cancel{L}_{k_{Cu}}(1 + 2 + 4)} = \frac{Ak_{cu}(T_2 - T_1)}{7L} \quad (5-P3)$$

Tenemos que el área transversal de las varillas es

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4} = 5.07 \times 10^{-4} m^2$$

Reemplazando en (5-P3) los valores numéricos tenemos

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{5.07 \times 10^{-4} m^2 \times 9.2 \times 10^{-2} Kcal/seg m^{\circ}C(100^{\circ}C)}{7 \times 6.0 \times 2.5 \times 10^{-2} m}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = 4.37 \times 10^{-3} Kcal/seg \quad (6-P3)$$

Despejando de (2-P3) la temperatura  $T_{CuAl}$  tenemos

$$T_{CuAl} = - \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{L}{Ak_{Cu}} + 100^{\circ}C$$

Reemplazando los valores numéricos correspondientes tenemos:

$$T_{CuAl} = -\frac{4.37 \times 10^{-3} \text{ Kcal/seg} \times 6.0 \times 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}}{5.06 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 9.2 \times 10^{-2} \text{ Kcal/seg m}^\circ\text{C}} + 100^\circ\text{C} = 86^\circ\text{C}$$

$$T_{CuAl} = 86^\circ\text{C}$$

Despejando de (3-P3) la temperatura  $T_{AlLatón}$  y considerando que  $k_{Latón} = \frac{k_{Cu}}{4}$

$$\text{Tenemos que } T_{AlLatón} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{4L}{Ak_{Cu}}$$

$$T_{AlLatón} = \frac{4.37 \times 10^{-3} \text{ Kcal/seg} \times 4 \times 6.0 \times 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}}{5.06 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 9.2 \times 10^{-2} \text{ Kcal/seg m}^\circ\text{C}} = 56^\circ\text{C}$$

$$T_{AlLatón} = 56^\circ\text{C}$$

#### 4) Problema H-22-18, N 16

Supongamos que  $k$  sea una constante, demostrar que el flujo radial de calor en una sustancia colocada entre dos esferas concéntricas está dada por

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(T_1 - T_2)4\pi k r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

teniendo la esfera interior un radio  $r_1$  y una temperatura  $T_1$ , y la esfera exterior un radio  $r_2$  y una temperatura  $T_2$ .

#### **Desarrollo**

#### **Representación gráfica de la situación física.**

La fig. 1 se obtiene del enunciado del problema.

La fig.2 se obtiene del plan de solución del problema.

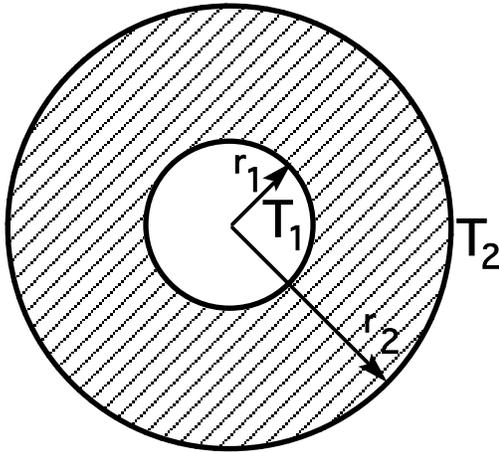


Fig.1

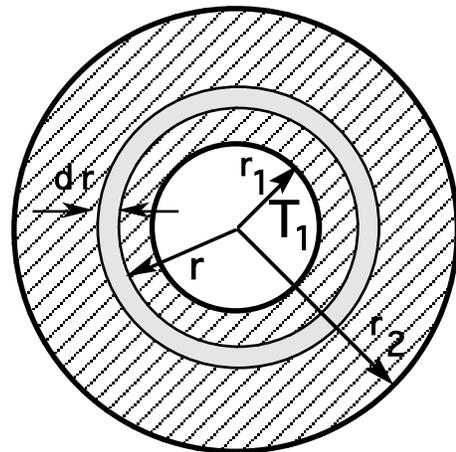


Fig.2

### Tabla de Información

Datos	Preguntas
<p><math>k</math> conductividad térmica de la sustancia colocada entre las esferas.</p> <p><math>r_1</math> radio de la esfera interna</p> <p><math>T_1</math> temperatura esfera interna</p> <p><math>r_2</math> radio de esfera externa</p> <p><math>T_2</math> temperatura esfera externa</p>	<p>Demostrar la expresión</p> $\frac{dQ}{dt} = \frac{(T_1 - T_2)4\pi k r_1 r_2}{r_2 - r_1}$ <p>Dicha expresión corresponde a la rapidez de transmisión del calor en la sustancia colocada entre ambas esferas.</p>

### Plan de Solución

Conocemos que la expresión de la rapidez de transmisión del calor está dado por la expresión (10T)

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-P4)$$

Siendo  $A$  el área transversal a través de la cual fluye el calor en una lámina de espesor infinitesimal  $dx$ .

En este caso para encontrar la rapidez de transmisión del calor a través de la sustancia que se encuentra entre ambas esferas, podemos considerar una esfera de espesor  $dr$  (fig. 2) a la cual le aplicamos la expresión (1-4P).

Tenemos entonces que

$$\frac{dQ(r)}{dt} = -KA(r)\frac{dT}{dr} \quad (2-P4)$$

Pero en un régimen estable tenemos que

$$\frac{dQ(r)}{dt} = \frac{dQ}{dt} = Cte \quad (3-P4)$$

De donde podemos ver que para determinar la expresión  $\frac{dQ}{dt}$  necesitamos encontrar el valor de la  $Cte$ .

Reemplazando la expresión (3-P4) en (2-P4) tenemos para la  $Cte$

$$Cte = -kA(r)\frac{dT}{dr} \quad (4-P4)$$

De donde podemos encontrar el valor de esta  $Cte$ , haciendo una separación de las variables  $r$  y  $T$  e integrando.

### **Solución**

Designemos por  $H$  a la  $Cte$  tenemos entonces que

$$H = -kA(r)\frac{dT}{dr}$$

Separando en esta expresión las variables  $r$  y  $T$ , considerando que  $A(r) = 4\pi r^2$  e integrando cada miembro y tenemos

$$H \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{4\pi r^2} = -k \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$H = \frac{(T_1 - T_2)4\pi k r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

Recordando que  $H = Cte$  y reemplazando en la expresión (3-P4) encontramos finalmente  $\frac{dQ}{dt}$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(T_1 - T_2)4\pi k r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

**Bibliografía**

Sears F. W	Fundamentos de Física	Tomo I
Feynman R. P.	Física	Volumen I
Halliday D. y Resnick R. -	Física	Parte I
Tipler P. A.	Física	Tomo I
Serway R. A. y Beichner R. J.	Física	Tomo I
Wilson J. D.	Física	
Hewitt P. G.	Conceptos de Física	
Máximo A. y Alvarenga B.	Física General.	
Tippens P. E.	Física. Conceptos y Aplicaciones	