

**Tema 73. La energía. Transformación, conservación y degradación. Trabajo y calor, procesos de transferencia de energía. Efectos y propagación del calor. Propagación de energía sin transporte de masa: movimiento ondulatorio. Luz y sonido.**

2º ESO. Materia y Energía.  
3º ESO. Bloque III. Energía y electricidad  
4º E.S.O. Bloque 2. La energía, Trabajo y Calor.

**73.1. La energía**

**73.1.1. Energía cinética**

**73.1.2. Energía potencial**

**73.1.3. Potencia**

**73.1.3. Transformación, conservación y degradación**

**73.2. Calor y trabajo**

**73.2.1. Primer principio de la Termodinámica**

**73.2.2. Segundo principio de la Termodinámica**

**73.3. Efectos y propagación del calor**

**73.3.1. Interpretación cinética de los cambios de estado**

**73.3.2. Dilatación de sólidos**

**73.3.3. Dilatación de líquidos**

**73.4. Propagación del calor**

**73.5. Propagación de la energía sin transporte de masa. Movimiento ondulatorio: Luz y sonido**

**73.5.1. Principio de Huygens**

**73.5.2. La luz**

**73.5.3. El sonido**

## 73.1. La energía

El concepto de energía es uno de los más difíciles de la Física. Intuitivamente, la mayoría de las personas entienden cuando un cuerpo tiene más o menos energía, si pierde o gana energía, etc., pero definir absolutamente la energía es poco menos que imposible. Es normal, en los libros de texto, referir la energía con otras magnitudes físicas, como el trabajo.

Dos maneras usuales de definir la energía son:

- a) Todo aquello que puede convertirse en trabajo, y recíprocamente.
- b) La capacidad que tienen los cuerpos de producir transformaciones o cambios.

Aunque aparentemente distintas, en realidad son la misma cosa, porque cuando se realiza un trabajo se está produciendo una transformación en el cuerpo. En ambos casos, reducimos el concepto de energía al de trabajo, también difícil, por cuanto el término trabajo se usa socialmente con un significado muy distinto al significado físico.

En Física, se dice que una fuerza aplicada en un cuerpo produce trabajo cuando logra desplazarlo en una dirección que no sea perpendicular a la dirección de la fuerza. En ese caso, el trabajo producido es el producto escalar del vector fuerza aplicada por el vector desplazamiento conseguido, finalmente:

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r} = F \cdot r \cdot \cos \alpha$$

Por la definición de trabajo como un producto escalar de vectores, es una magnitud escalar, completamente definida por el valor numérico de la magnitud y la unidad de medida. En el S. I. la unidad de trabajo es el Julio (J) equivalente a 1 N x 1 m. El sistema técnico, por su parte, tienen como unidad fundamental el kilográmetro (kgm), trabajo realizado por la fuerza de un kp en el espacio de un metro y en la misma dirección de la fuerza (1 Kgm = 9'8 J).

De la definición de trabajo también podemos observar que si aplicamos una fuerza, F, pero esta no logra desplazar al cuerpo ( $\Delta r = 0$ ), o lo hace perpendicularmente a su dirección ( $\cos 90^\circ = 0$ ), entonces no se produce trabajo ( $W = 0$ ).

### 73.1.1. Energía cinética

Cuando la fuerza que se aplica a un cuerpo se emplea solamente en aumentar su velocidad, sin que se oponga rozamiento alguno ni cualquier otra fuerza resistente, entonces el trabajo realizado por esa fuerza se convierte en una energía mecánica que llamamos **Energía cinética** o energía que poseen los cuerpos por el hecho de estar en movimiento.

Supongamos que aplicamos una fuerza F a un cuerpo de masa (m) que lleva ya una velocidad inicial ( $V_0$ ). Supongamos que, mientras actúa la fuerza constante (F), el cuerpo recorre un espacio (e), que se hará con movimiento uniformemente acelerado. El trabajo realizado valdrá:

$$W = F \cdot e$$

Tras recorrer el espacio (e), la velocidad de cuerpo será, ahora,  $V_f$  (velocidad final). Como la aceleración es constante, podríamos haber considerado que el recorrido se hubiese realizado a la velocidad media constante ( $V_m$ ), con lo que el espacio recorrido sería:

$$e = V_m \cdot t = \frac{V_f + V_0}{2} \cdot t \quad \text{Por otra parte, la fuerza F según el 2º Principio es } F = m \cdot a \text{ luego el trabajo}$$

$$\text{realizado sería: } W = F \cdot e = m \cdot \frac{(V_f - V_0)}{t} \cdot \frac{(V_f + V_0)}{2} \cdot t = \frac{m}{2} (V_f^2 - V_0^2) = \frac{1}{2} m V_f^2 - \frac{1}{2} m V_0^2$$

A la expresión  $\frac{1}{2} m V^2$  es a lo que en Física se le llama **Energía cinética** ( $E_c$ ), y por tanto, el trabajo efectuado por una fuerza constante sobre un cuerpo de masa ( $m$ ), se invierte en incrementar su energía cinética.

$$W = E_{cf} - E_{ci} = \frac{1}{2} m V_f^2 - \frac{1}{2} m V_0^2 \quad E_{ci} = E. \text{ cinética inicial}$$

### 73.1.2. Energía potencial

Hay otra energía mecánica, la energía potencial, que se asocia con el hecho de que un cuerpo se halle situado dentro de un campo de fuerzas conservativo, como el campo gravitatorio o el campo eléctrico, por ejemplo. El valor de la energía potencial del cuerpo depende de la situación de éste dentro del campo y cambia si cambia su posición. Se dice que el campo es conservativo, si el valor de la energía asociada depende sólo de la posición y no del camino para ir de una a otra posición; es decir, en estos campos sólo se producen transformaciones de energía en sus formas cinética y potencial.

Tomando como ejemplo el **campo gravitatorio**, la energía potencial gravitatoria se equipara al trabajo necesario para cambiar la posición de un cuerpo en él. Así, cuando se sube un cuerpo de masa ( $m$ ) a una altura ( $h$ ), el trabajo necesario para hacerlo será el producto de la fuerza aplicada en el cuerpo (el peso), por el espacio recorrido ( $h$ ).

$$W = P \cdot h, \text{ como } P = m \cdot g, \text{ tenemos que } W = m \cdot g \cdot h$$

Este trabajo se ha empleado en variar la energía potencial ( $E_p$ ), al cambiar la posición del cuerpo en el campo una distancia  $h$ , así tenemos que:

$$\Delta E_p = W = m \cdot g \cdot h$$

Si el cuerpo se deja caer desde la altura ( $h$ ), conforme va descendiendo, su posición en el campo gravitatorio va cambiando y, por tanto, va perdiendo energía potencial conforme pierde altura, observamos, no obstante, que la velocidad se va incrementando, es decir, va aumentando la energía cinética a medida que se pierde energía potencial. Una medida cuidadosa pone de manifiesto que, en ausencia de rozamientos, la variación de energía cinética que sufre el cuerpo es igual a la variación de energía potencial, sólo que de sentido contrario, una se gana, otra se pierde.

### 73.1.3. Potencia

Al introducir el tiempo como variable en los conceptos hasta ahora expuestos, se obtienen la definición de una nueva magnitud, referida a la velocidad con la que puede llevarse a cabo un trabajo o liberarse energía. Dicha magnitud es la potencia, trabajo realizado en la unidad de tiempo:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Las unidades fundamentales de potencia en los tres sistemas más utilizados son:

- El **vatio** ( $w$ ), en el S.I. En la práctica es más frecuente la utilización del kilovatio (1000 vatios).
- El ergio/seg. en el sistema cegesimal.
- El kilográmetro/seg (equivale a 9'8 vatios). En el técnico. Se utiliza con más frecuencia el **caballo vapor** (C. V.) cuyo valor es de 75 Kgm/s.

### 73.1.3. Transformación, conservación y degradación

Como hemos visto hasta aquí, una de las características de eso que llamamos energía es que se manifiesta de múltiples formas, todas convertibles unas en otras o en trabajo. De la experiencia acumulada, siempre se ha comprobado que cuando una forma de energía desaparece, aparece otra y en la misma cantidad. Este principio, al que no se le han encontrado excepciones, se conoce como **Principio de la conservación de la energía**, y dice así:

" En la Naturaleza, la energía ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma y cuando lo hace, es siempre en cantidades equivalentes."

Nuestro Universo está poblado de millones de objetos inanimados, por plantas y animales de formas muy diferentes, cuyos tamaños varían desde la más pequeña de las partículas elementales hasta la más gigantesca de las estrellas. En cada instante, todos estos cuerpos poseen unas determinadas propiedades (forma, color,  $t^\circ$ ,...) y ocupan una posición determinada. Para el cambio de cualquiera de estas propiedades o de la posición que ocupan, se necesita una cierta cantidad de energía.

Se podrían poner innumerables ejemplos para visualizar esto, valga como ejemplo lanzar hacia arriba una piedra con cierta velocidad ( $v$ ). El cuerpo dispone de una Energía cinética  $E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2$ , pero a medida

que sube gana Energía potencial, por lo que va reduciéndose su  $E_c$  al hacerlo su velocidad. Llega a un punto dado donde  $V = 0$ , con lo que ha perdido toda su  $E_c$  y alcanzado una altura ( $h$ ), correspondiente a un incremento de Energía potencial igual al de la  $E_c$  perdida. A partir de ese momento, se invierte el proceso, transformándose la Energía potencial en cinética conforme se pierde altura. Al llegar al suelo la velocidad será igual que cuando se lanzó hacia arriba.

No obstante, en el supuesto de ausencia de rozamientos. Los rozamientos son fuerzas omnipresentes, que se oponen siempre al movimiento de los cuerpos y que detraen una parte de la energía de la que dispone el cuerpo, sea de la forma que sea, y la transforman en trabajo de rozamiento, es decir, en calor. Este calor no es aprovechable en su totalidad y no puede ser convertido, por lo que se le llama " forma degradada de energía", y **degradación** al proceso por el que se produce el trabajo de rozamiento.

Los rozamientos harían que la piedra lanzada hacia arriba, al caer otra vez a suelo, no llevase la misma velocidad que al principio, ya que alguna porción de la energía cinética y potencial ha sido degradada por los rozamientos. Otra característica de los rozamientos es que son **fuerzas no conservativas**, es decir, dependen del camino seguido para ir de un sitio a otro, pudiendo ser mayores o menores sus trabajos dependiendo de cómo ha tenido lugar la transformación.

## 73.2. Calor y trabajo

Al igual que sucede con el concepto de trabajo, sucede con el de calor. La palabra calor se utiliza con diferente significado en la vida cotidiana y en la Ciencia. La palabra calor la asociamos con sensaciones fisiológicas de caliente y frío, pero esta acepción no tiene valor en la Física, puesto que es subjetiva.

Aparece así el concepto de **temperatura** como una magnitud que nos permite afirmar sin ambigüedades lo caliente o frío que se encuentra un cuerpo. Ordinariamente los términos calor y temperatura se confunden y hablamos de calor cuando queremos referirnos realmente a la temperatura. Así, al decir: "este cuerpo está más caliente que aquél", estamos afirmando que se encuentra a mayor temperatura. Debido al uso incorrecto de la terminología, se llegó a pensar que el calor era algo que tienen los cuerpos, idea que perduró hasta mediados del siglo XIX.

Sin embargo, los cuerpos no poseen calor, sino que tienen una determinada temperatura. Dicha magnitud se mide por medio de escalas, ya sean convencionales o absolutas, que se relacionan con el volumen, la presión o cualquier otro parámetro característico del cuerpo con el que se opera, por ser en su mayoría variables con respecto a la temperatura. La temperatura es, pues, una característica de los cuerpos, como la masa, el volumen, etc..., siendo una magnitud fundamental, que se mide con los **termómetros**. Todos ellos se fundan en la variación de dimensiones físicas de las sustancias con respecto a la temperatura y en el principio según el cual, en el contacto de un cuerpo frío y otro caliente, la energía calorífica se transmite del segundo al primero hasta que se alcanza un estado de equilibrio térmico, momento en el cual el valor de la temperatura será constante.

El fundamento de los actuales termómetros de líquido es la dilatación que sufre dicho líquido con el aumento de la  $t^a$ , siendo registrado por su aumento de volumen. Los termómetros metálicos utilizan la dilatación térmica como impulso para desplazar una aguja sobre una escala.

### Escalas termométricas

La más difundida es la **centígrada o Celsius**, en la que los puntos fijos se establecen de forma que el cero corresponde con la  $t^a$  de fusión del hielo y los  $100^{\circ}$  a la ebullición del agua destilada a 1 atm. de presión y a  $45^{\circ}$  de latitud sobre el nivel del mar.

La **escala Fahrenheit**, cifra sus puntos fijos en las temperaturas de fusión y de ebullición de una disolución de cloruro amónico en agua. Los  $32^{\circ}$  corresponden al cero de la anterior escala, y los  $212$  a los  $100^{\circ}\text{C}$ . Se utiliza en los países anglosajones y en Japón

$$\frac{C}{100} = \frac{(F - 32)}{180}$$

La **escala Reamur**, sitúa sus extremos en los  $0^{\circ}\text{C}$  y en los  $80^{\circ}$  para el punto de ebullición del agua.

La **escala absoluta o escala Kelvin**, se establece a partir de criterios termodinámicos, estableciéndose que la mínima  $t^a$  alcanzable corresponde a  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Por lo que los extremos de la escala centígrada corresponden al  $273,15^{\circ}\text{K}$  y al  $373,15^{\circ}\text{K}$ , ya que el grado centígrado se mantiene como unidad primaria de división.

Una definición operativa del calor se extrae de lo que sucede al poner juntos dos cuerpos de distinta temperatura. Transcurrido un cierto tiempo, ambos cuerpos alcanzan la misma temperatura. Para explicar este hecho se hacen varios supuestos:

- Un cuerpo, por el hecho de tener cierta temperatura, posee cierta energía que llamamos energía interna.
- Al poner en contacto dos cuerpos a diferente temperatura, se transfiere energía del que tiene más temperatura al que tiene menos, hasta que estas se igualan y cesa el flujo de energía.

Denominamos **calor** a la cantidad de energía transferida de un cuerpo caliente a otro frío al ponerlos en contacto. Se acepta que el calor es una forma de energía, igual que la cinética, o la eléctrica, etc. Esta energía calorífica tiene un factor de nivel que es la temperatura, responsable de las sensaciones caliente y frío.

La unidad fundamental del calor, cuya definición se ha mantenido inalterada desde las primeras experiencias calorimétricas (Hooke, Lavoisier), es la **caloría (cal)**, que es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua destilada de  $14,5^{\circ}\text{C}$  a  $15,5^{\circ}\text{C}$ , a presión atmosférica normal. Aunque esta es la unidad más empleada en Física experimental, se usa con más frecuencia la kilocaloría (1000 calorías) y la termia (un millón de calorías). Ambas utilizadas en estudios de tecnología industrial.

El aumento de energía calorífica (o térmica) de un cuerpo puede hacerse no solamente poniéndolo en contacto con otro que tenga mayor nivel térmico (temperatura), sino también por transformación de otras formas de energía, como por ejemplo la energía de la corriente eléctrica (efecto Joule) o por transformación del trabajo, como ocurre con los rozamientos.

Un aumento de la energía térmica de un cuerpo produce un aumento de temperatura, que es directamente proporcional a ella y depende de un coeficiente característica del cuerpo llamado capacidad calorífica.

$$Q = C \cdot (T_2 - T_1)$$

Esto siempre que el cuerpo no cambie de estado físico. La capacidad calorífica (C), de un cuerpo es directamente proporcional a su masa:

$$C = c_e \cdot m$$

Dónde la constante  $c_e$ , que sólo depende de la clase de materia que forme el cuerpo, se llama **calor específico** de dicha materia. El significado del calor específico de un material es ser la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de esa materia en un grado centígrado. Sustituyendo, queda

$$Q = c_e \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$$

que nos da la expresión que permite calcular la cantidad de calor ganado o cedido por un cuerpo de masa  $m$ , y calor específico,  $c_e$ , al cambiar su temperatura de  $T_1$  a  $T_2$ .

Cuando se establece un equilibrio térmico entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, la temperatura de equilibrio será intermedia entre la del cuerpo más frío y la del más caliente. El principio de la conservación de la energía exige que el calor cedido por el cuerpo caliente ha de ser igual al ganado por el cuerpo frío, por eso:

$Q_1 = c_{e_1} \cdot m_1 \cdot (T_e - T_1)$ , calor absorbido por el cuerpo frío  $Q_2 = c_{e_2} \cdot m_2 \cdot (T_2 - T_e)$ , calor cedido por el cuerpo caliente. Como  $Q_1 = Q_2$ :

$$c_{e_1} \cdot m_1 \cdot (T_e - T_1) = c_{e_2} \cdot m_2 \cdot (T_2 - T_e)$$

Todas las medidas experimentales para comprobar los equilibrios térmicos se realizan en aparatos que se denominan **calorímetros de mezclas**.

Aceptando que el calor es una forma de energía, ésta debe poderse convertir en trabajo. La Termodinámica es la parte de la Física que estudia la conversión del calor en trabajo y se basa en dos principios fundamentales.

Un **sistema termodinámico** es una porción de espacio aislada de su entorno mediante una superficie de separación. Dichos sistemas pueden ser:

- **Abiertos**: cuando se produce una transferencia de materia y energía entre el sistema y su entorno;
- **Cerrados**: cuando tiene lugar un intercambio de energía pero no de materia entre sistema y su entorno;
- **Aislados**: cuando no se produce transición energética entre los dos medios.

### 73.2.1. Primer principio de la Termodinámica

Se limita a afirmar que el calor es una forma de energía y que se puede convertir en trabajo y el trabajo en calor con equivalencias recíprocas.

El hombre prehistórico encendió fuego frotando dos trozos de leña, pero no fue hasta 1842 que un médico alemán (Robert Meyer), se dio cuenta de que el trabajo y el calor eran dos formas distintas de la misma cosa. Unos años más tarde, Rankine y Helmholtz emplearon la palabra energía para expresar aquella magnitud que interviene en todos los fenómenos físicos y químicos, y que se manifiesta en forma de calor, trabajo, o de otras formas.

El físico inglés J. P. Joule realizó experimentos en los que convirtiendo trabajo de rozamiento en calor, determinó la equivalencia entre trabajo y calor, llegando al resultado de que  $1 \text{ cal.} = 4,18 \text{ J}$ , igualdad que se conoce como **equivalente mecánico del calor**.

#### Aplicación del primer principio al calentamiento de un gas perfecto. Energía interna

Se considera un gas perfecto o ideal al que cumple la ley de los gases perfectos (ver tema 68) y está de acuerdo con la teoría cinético molecular en su comportamiento.

Supongamos una masa de gas perfecto encerrada en un depósito de volumen constante. Si le comunicamos una cierta cantidad de calor  $Q$ , el gas aumenta su  $T$  y las moléculas incrementan su energía



cinética. La energía cinética de las moléculas del gas perfecto constituyen la energía interna ( $E_i$ ). Por lo tanto, el aumento de energía calorífica de un gas perfecto a volumen constante se emplea en aumentar su energía interna:

$$Q = \Delta E_i$$

Si llamamos  $C_v$  al calor específico del gas a volumen constante, ( $m$ ) a su masa, e  $\Delta t$  al aumento de temperatura, el calor  $Q$ , comunicado se puede poner de la forma:

$$Q_v = m \cdot C_v \cdot \Delta t, \text{ por lo que el aumento de energía interna será: } \Delta E_i = m \cdot C_v \cdot \Delta t.$$

Supongamos que el gas está encerrado en un recipiente cilíndrico, provisto de un émbolo, de modo que pueda expandirse cuando se calienta. En este caso, la energía térmica comunicada ( $Q$ ) se empleará no sólo en aumentar la energía interna del gas, sino también en el trabajo de dilatación (o expansión). En este caso el balance energético es:

$$Q = \Delta E_i + W_{\text{exp}}$$

Si la transformación se hace a temperatura constante (proceso isotérmico). En esas condiciones la ecuación anterior queda en:  $Q = W_{\text{exp}}$  ya que  $\Delta t = 0$  y ello implica que  $\Delta E_i = 0$ , por lo que: "En una transformación isotérmica de un gas perfecto, todo el calor comunicado se invierte en el trabajo de expansión". Así pues, en este tipo de transformaciones todo el calor aplicado al sistema se convertirá en trabajo.

$W_{\text{exp}} = n \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$ , en la  $n = n^\circ$  moles;  $T = t^\circ$  absoluta,  $V_1$  y  $V_2$  los volúmenes iniciales y finales de la masa gaseosa.

Al calentar la masa gaseosa bajo presión constante (**transformación isobárica**), el émbolo, impulsado por la dilatación del gas, se desplazará una distancia ( $h$ ). El trabajo generado durante la dilatación es  $W = F \cdot h$ . Si el émbolo tiene una superficie ( $S$ ), podemos transformar la expresión en:

$$W = P \cdot S \cdot h$$

$S \cdot h$  = incremento de volumen producido por la masa gaseosa al dilatarse, el trabajo externo en una transformación isobárica presentará un valor determinado por:

$$W = P \cdot (V_2 - V_1)$$

### Transformaciones adiabáticas

De gran importancia en termología y se realizan sin intercambio de calor entre el gas y su entorno. Al no existir aporte calórico externo, el trabajo se genera a expensas de la energía interna del gas, lo que provocará un enfriamiento del mismo.

$$W = \frac{(P_1 \cdot V_1) - (P_2 \cdot V_2)}{k - 1}$$

$P$  y  $V$  son valores de presión y volumen inicial y final,  $k = \frac{C_p}{C_v}$  relación entre los calores específicos a presión y volumen constante.

**Entalpía:** Cantidad de calor necesaria para calentar un sistema a presión constante desde el cero absoluto hasta una determinada  $t^\circ$ .

## 73.2.2. Segundo principio de la Termodinámica

Para el primer principio, la transformación del trabajo en calor, y viceversa, siempre es posible. No se especifica ninguna limitación. En la práctica, es mucho más fácil transformar el trabajo en calor que el calor en trabajo. Con un ejemplo se entenderá fácilmente: si frotamos las manos se calientan, pero si calentamos las manos, no se ponen en movimiento.

El segundo principio enunciado por Clausius en 1850, trata de esto, y dice: el calor no puede transmitirse de forma espontánea desde un cuerpo a una determinada  $t^a$  a otro de  $t^a$  mayor. Por tanto no existe la posibilidad de aprovechar toda la energía calórica de un cuerpo, sino solamente aquella porción que pueda cederse al ámbito exterior. De acuerdo con esto "El calor no puede convertirse en trabajo si no existe una diferencia de temperatura". Aún en este caso, si el foco caliente cede  $Q$  calorías, no todas pueden convertirse en trabajo, sino que parte de ellas,  $Q'$ , deberán pasar al foco frío, convirtiéndose en trabajo solamente la diferencia  $Q - Q'$ .

El físico francés Carnot estableció, antes que Clausius, un enunciado para este mismo principio según el cual una transformación cíclica de un sistema termodinámico que intercambie calor con una sola fuente térmica no puede generar trabajo positivo. (Inexistencia del móvil perpetuo de segunda especie o motor periódico que transformaría el calor en trabajo a partir de una única fuente).

El segundo principio establece que para que funcione una máquina térmica, que transforme el calor en trabajo, es preciso un foco caliente, a una temperatura  $T_1$ , el cual proporciona una energía  $Q_1$ . Un foco frío, que muchas veces es la misma atmósfera, a una temperatura  $T_2$ , tal que  $T_1 > T_2$ , absorbe una energía  $Q_2$  del foco caliente, convirtiéndolo en trabajo la diferencia  $Q_1 - Q_2$ .

### Entropía

La entropía ( $S$ ) disminuye en el primer cuerpo (el de  $t^a$   $T_1$ ), en una magnitud equivalente a  $dS_1 = \frac{dQ}{T_1}$ , y en el segundo sufre un incremento de la misma determinable por  $dS_2 = \frac{dQ}{T_2}$ .

En sistema termodinámicamente constituido por dos cuerpos puestos en contacto que presentan diferentes valores de  $t^a$ . Si  $T_1 > T_2$  la ganancia de calor del sistema vendrá dada por  $dQ/T_2 - dQ/T_1$ . La variación de entropía ( $dS$ ) da la medida de la variación de calor con respecto a la  $t^a$ :

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

El incremento de entropía en los procesos espontáneos que tienen lugar en sistemas aislados es siempre positivo.

Una **máquina térmica** es un dispositivo que, al absorber calor de un foco a una  $t^a$  elevada, es capaz de desarrollar un trabajo externo y de ceder calor al entorno a una  $t^a$  inferior.

En una máquina térmica ideal se cumple un ciclo reversible ideal al que se denomina **Ciclo de Carnot**. En él, el rendimiento térmico entre dos  $t^a$  es máximo aunque su realización práctica no es factible, en términos reales. Los rendimientos para ciclos reales se pueden expresar en % del rendimiento de Carnot.

Se llama rendimiento de una máquina térmica, a la relación entre el trabajo ( $W$ ), realizado por la máquina y el calor cedido por el foco caliente:

$$r = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

El rendimiento, expresado en tanto por 1, siempre es menor que la unidad, ya que  $Q_1 - Q_2 < Q_1$ , ó  $T_1 - T_2 < T_1$ . Para que el rendimiento fuera la unidad, debería  $T_2 = 0$  (recuérdese que  $T$  se expresa en  $^aK$ ), por lo que  $T_2 = 0^aK$ , es una  $t^a$  imposible de alcanzar, ya que cuando se suministra al foco frío algo de calor se elevaría su  $t^a$ , que no puede ser la del cero absoluto.



Se suele simplificar el enunciado de este 2º principio, diciendo que: "Es imposible alcanzar el cero absoluto". Las máquinas térmicas son artefactos que utilizamos para convertir el calor en trabajo. Se dividen en tres clases: de vapor, motores de combustión interna y turbinas de vapor.

**Máquina de vapor:** es un motor térmico alternativo de combustión externa que aprovecha la energía térmica del vapor de agua que, procedente de una caldera, genera energía mecánica al expansionarse mediante el émbolo o pistón de un cilindro. Su rendimiento es bajo y requiere un periodo de preparación hasta alcanzar la presión normal de funcionamiento.

**Turbina de vapor:** Constan de un recinto o envolvente en el que entra el vapor que sale por unos orificios (toberas) provocando el giro de un eje. Su rendimiento es mayor que el de las máquinas de vapor. Las turbinas alcanzan grandes velocidades de giro, por lo que se utilizan para impulsar turbocompresores, generadores, etc.

**Motores de combustión interna o compresión:** Constan de un alimentador (depósito + carburador) y el motor propiamente dicho. Se compone de un cilindro en cuyo interior se desplaza un émbolo o pistón. En su parte superior se sitúa la cámara de explosión, en la que se encuentra la bujía productora de la ignición y dos válvulas, una de admisión y otra de escape. Su rendimiento es de un 30 %, superado por el de otros motores tanto térmicos como eléctricos.

### 73.3. Efectos y propagación del calor

Al comunicar energía calorífica a un cuerpo aumenta la  $t^{\circ}$  de éste, pero además, pueden observarse varios efectos, se pueden producir cambios de estado de la materia del cuerpo y dilataciones o variaciones del tamaño del cuerpo.

#### 73.3.1. Interpretación cinética de los cambios de estado

Gracias a los estudios realizados con Rayos X sabemos que los sólidos tienen estructura cristalina, es decir, sus átomos están dispuestos con regularidad en determinados puntos a lo largo de las tres direcciones del espacio. Sin embargo, los átomos pueden realizar pequeñas vibraciones alrededor de su posición de equilibrio, y la amplitud de estas vibraciones crece al aumentar la  $t^{\circ}$ , ya que el calor se emplea en incrementar la energía cinética de átomos y moléculas, de ésta forma, al ir calentando puede llegar un momento en que los enlaces se rompan, desapareciendo la estructura cristalina, y la sustancia pasa al estado líquido, iniciándose la **fusión**.

Si seguimos calentando, una vez rotos todos los enlaces cristalinos, la  $t^{\circ}$  del líquido continuará aumentando y con ella la energía cinética media de las moléculas; las más energéticas se aproximarán a la superficie libre, y venciendo la tensión superficial, que constituye una barrera, sólo salvable por las moléculas que poseen mayor energía, irán escapando del líquido, produciéndose la **vaporización**, fenómeno que ocurre a cualquier  $t^{\circ}$  del líquido. Si dejamos evaporar el líquido sin comunicarle calor externo, este cambio de estado tendrá lugar con el correspondiente enfriamiento, ya que desaparecen del líquido las moléculas más energéticas y sabemos que la energía cinética media es proporcional a la  $t^{\circ}$ .

En todos los cambios de estado tiene lugar el paso de una configuración molecular a otra totalmente distinta, con la consiguiente alteración en los valores de energía cinética y potencial, así, la transición del estado líquido al gaseoso supone un notable incremento de la energía potencial de las moléculas, que es preciso comunicar desde el exterior en forma de energía calorífica. Además, si el cambio tiene lugar con aumento del volumen hay que realizar un trabajo externo contra las fuerzas exteriores (presión atmosférica) suministrando una energía adicional.

Es evidente que en los procesos inversos, la energía será devuelta por el cuerpo en forma de una cantidad de calor liberada.

Durante el proceso de cambio de estado, si la sustancia es pura, su  $t^a$  no cambia, a pesar de que el cambio de estado va acompañado de un proceso calorífico. La correspondiente cantidad de calor viene dada por la expresión:

$$\Delta Q = m \cdot L$$

donde  $m$  = masa del cuerpo que cambia de estado;  $L$  = calor latente de la transformación, que depende de la clase de materia de la que esté hecho el cuerpo.

### 73.3.2. Dilatación de sólidos

Es un hecho experimental que, con muy pocas excepciones, todos los cuerpos se dilatan al calentarse. En los casos de los cuerpos sólidos, es frecuente, considerar en la dilatación tres casos, dependiendo de que, por la forma del cuerpo, predomine una dimensión sobre las demás, o dos o tres.

#### a) Dilatación lineal

Afecta al sólido que tiene forma de barra o alambre, donde predomina la longitud sobre la anchura o el volumen. Midiendo su longitud a diferentes  $t^a$ , y al representar las variaciones relativas de longitud =  $\Delta L/L$ , en función de la  $t^a$ , se obtienen gráficas que, en su mayor parte, son líneas rectas, por lo que se puede suponer que en el tramo lineal hay proporcionalidad entre el alargamiento y el aumento de  $t^a$ , formalmente:

$$L_t = L_0(1 + \alpha t)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación, característico del material que compone el cuerpo.

#### b) Dilatación superficial

En realidad, la dilatación proporcionada por un incremento de  $t^a$  modifica todas las dimensiones de un cuerpo. En los cuerpos de forma laminar se considera la dilatación superficial. Supongamos que un cuadrado mide de lado,  $L_0$  a  $0^\circ\text{C}$ . Si aumentamos su  $t^a$ ,  $t^\circ\text{C}$ , se expande, y si la sustancia es isótropa se origina un cuadrado de mayor lado ( $L_t$ ). El área inicial es  $S_0 = L_0^2$ , y la final,  $S_t = L_t^2$ . Si  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación del material, resulta que:

$S_t = L_t^2 = [L_0 \cdot (1 + \alpha t)]^2$ , como  $\alpha^2 t^2$  es una cantidad prácticamente despreciable (es del orden de una millonésima de  $^\circ\text{C}$ ), resulta que:

$$S_t = S_0(1 + 2\alpha t)$$

#### c) Dilatación cúbica

De igual modo, un cubo de arista  $L_0$  a  $0^\circ\text{C}$  se calienta uniformemente hasta  $t^\circ\text{C}$ . Se convierte en un cubo de arista  $L_t$  con un volumen  $V_t$ ; que será:

$V_t = V_0 \cdot (1 + 3\alpha t)$ , ya que, como antes, son despreciables  $3\alpha^2 t^2$  y  $\alpha^3 t^3$ .

### 73.3.3. Dilatación de líquidos

La determinación de la dilatación térmica que presenta un líquido tiene el problema de que hay que tener en cuenta la dilatación que sufre, simultáneamente, el sólido de que está hecho el recipiente que lo contienen.

En general, los líquidos dilatan más que los sólidos y hay que distinguir en ellos dos dilataciones, la real o absoluta y la aparente dentro de la vasija que lo contiene.

En los líquidos sólo cabe considerar la dilatación cúbica, por lo que, para la dilatación real podemos escribir:

$$V_t = V_0 \cdot (1 + kt)$$

donde k = coeficiente de dilatación cúbica real del líquido.

La medida de  $V_t$  presenta dificultades, porque la vasija experimenta cambios de volumen. Para determinar el coeficiente (k) hay que medir el coeficiente de dilatación aparente en un recipiente cuyo coeficiente de dilatación cúbica sea conocido. Esta operación se lleva a cabo mediante los dilatómetros, que no son más que recipientes de vidrio perfectamente calibrados.

## 73.4. Propagación del calor

En cuanto existe una diferencia de  $t^\circ$  entre dos cuerpos, o entre dos partes del mismo cuerpo, ésta tiende a desaparecer espontáneamente por un transporte de energía calorífica, que puede tener lugar de tres maneras:

### a) Por conducción

Las moléculas más calientes ceden parte de su energía cinética a las más frías adyacentes, de modo que el transporte de energía tiene lugar, molécula a molécula, sin que se alteren las posiciones relativas de aquellas.

Este mecanismo de propagación es, desde luego, muy lento, pero por conducción térmica tienen lugar las transmisiones de calor más frecuentes en la Naturaleza y encontramos este proceso en multitud de hechos de la vida cotidiana. Estos hechos nos hacen observar que no todos los cuerpos conducen igual el calor. Si en un recipiente que contiene agua hirviendo introducimos una cucharilla de plata, podemos sostenerla una fracción de segundo sin quemarnos, en cambio, si es de madera se calentará lentamente, prácticamente no observaremos cambio de temperatura.

Por esta misma razón una piedra o un metal parecen estar más fríos al tacto que otros cuerpos como el corcho, madera, telas, etc., pues los primeros son mejores conductores del calor que los últimos y nos roban o ceden más rápidamente calor cuando los tocamos, proporcionándonos la sensación de más frío, o más calor que otros.

La distinta conductividad es una característica propia de la clase de materia y se mide por un coeficiente de conductividad térmica de las sustancias.

### b) Por convección

En los fluidos, las diferencias de  $t^\circ$  ocasionan diferencias de densidad y, en consecuencia, producen corrientes fluidas o de convección que tienen por efecto igualar la  $t^\circ$  de todas las partes de la masa fluida.

La convección es un proceso mecánico de transporte de calor que tiene lugar exclusivamente en los fluidos. Las corrientes de convección en los líquidos tienen una aplicación práctica en las calderas de calefacción por agua caliente. El agua se calienta en la caldera y asciende, por su menor densidad, por los tubos hasta pasar por los radiadores, donde se enfría y regresa por otros tubos a la caldera.

En los gases, los fenómenos convectivos tienen más importancia, por ser menos densos y muy compresibles. El tiro de las chimeneas es un ejemplo de convección de gases.

La transferencia de calor por convección son muy importantes en la Tierra. La mayor parte de las corrientes marítimas y vientos atmosféricos tienen su origen en el sobrecalentamiento de ciertas áreas respecto a otras. Basta observar la formación de nubes cumuliformes que se producen durante el día, tras el calentamiento del suelo por el Sol, para advertir, por su estructura vertical, la corriente convectiva, de aire caliente ascendente que las origina. La Tectónica de placas aboga por las corrientes de convección de la Astenosfera como "motor" del desplazamiento de las placas litosféricas.

**c) Por radiación**

Los dos mecanismos anteriores requieren de la presencia de materia. Pero todos sabemos que la energía calorífica del Sol llega hasta nosotros por el vacío. Esta propagación se realiza por radiación.

Todos los cuerpos emiten energía en cantidad que depende de su propia  $t^{\circ}$ , por medio de la radiación. Es una forma de energía análoga a la luz, que se propaga en el vacío a su misma velocidad. La radiación consiste en la emisión de radiación electromagnética. Gracias a este proceso subsistimos todos los seres vivos sobre la Tierra, porque en última instancia, toda la energía sobre la Tierra, excepto la nuclear, nos llega o nos ha llegado del sol por radiación. Parte de ella en forma de luz visible, otra parte en forma de energía infrarroja o calorífica, ultravioleta, etc.

Según la teoría de Prevost, todos los cuerpos están constantemente irradiando y recibiendo energía calorífica; pero en estado de equilibrio térmico, la cantidad de energía perdida por unidad de tiempo es igual a la absorbida en el mismo tiempo en forma de radiaciones idénticas recibidas de los otros cuerpos que le rodean. Mientras no se alcance el equilibrio, los cuerpos calientes irradian más cantidad de calor del que reciben y se enfrían hasta que se establece en ellos el equilibrio de  $t^{\circ}$ .

Una consecuencia directa y de gran importancia es la siguiente: Supongamos dos objetos, uno de superficie bien pulimentada o reflectora y otros con caras ennegrecidas. Cuando ambos se colocan dentro de un recinto cerrado, impermeable al calor, alcanzarán al final la misma  $t^{\circ}$ . Ahora bien, el pulimentado, actuando de espejo, reflejará gran parte de la energía que reciba y, por tanto, no la absorberá, deberá pues, por su parte, emitir su propia radiación en menor cantidad que el otro, pues de lo contrario se iría enfriando. La validez de este razonamiento se comprueba experimentalmente y el **poder de emisión** y el de **absorción** de las distintas superficies varía en la misma proporción. Las superficies negras u oscuras absorben y emiten más energía que las blancas o claras.

Gracias a los experimentos de laboratorio, se sabe que la cantidad de energía radiante emitida por un cuerpo depende en primer lugar, de la  $t^{\circ}$ , y en segundo lugar de la naturaleza de su superficie. Para el cuerpo negro, Stefan y Boltzmann dedujeron que el poder emisivo total del cuerpo negro era proporcional a la cuarta potencia de su  $t^{\circ}$  absoluta:

$$E_n = S \cdot T^4; \sigma = \text{cte. de Stefan-Boltzmann}$$

Según los casos, uno u otro mecanismo de propagación juega un papel preponderante aunque rara vez tienen lugar aisladamente. Para un cuerpo caliente en el aire el efecto convectivo es el más importante, aunque también pierde calor por conducción y por radiación. No obstante, hay que hacer notar que, a medida que se eleva la  $t^{\circ}$ , la radiación va convirtiéndose en la forma de transmisión calorífica dominante.

## **73.5. Propagación de la energía sin transporte de masa.**

### **Movimiento ondulatorio: Luz y sonido**

Acabamos de ver que la radiación es un método de propagación de la energía sin que se necesite la presencia de materia, es decir, sin transporte de masa. La radiación, hemos dicho, tiene naturaleza electromagnética, ello quiere decir que es la proporción en el espacio de un campo eléctrico y de otro magnético, ambos variables con el tiempo, dentro de lo que constituye un fenómeno físico más general conocido como movimiento ondulatorio u ondas, de las cuales, la luz y el sonido son los ejemplos más característicos.

Los fenómenos ondulatorios consisten en la propagación en el espacio de una vibración sin que haya transporte de materia. Lo que se propaga es la vibración, energía. Cada molécula comunica energía a las que le rodean. Si para que la onda se propague, caso del sonido, se necesita un medio material que la "soporte", se dice que es un onda material o elástica, pero no siempre es necesario un medio material de soporte, como en el caso de las ondas electromagnéticas, o luz, que se pueden propagar en el vacío.

Si observamos lo que sucede al lanzar una piedra a un estanque, tendremos un ejemplo de movimiento ondulatorio. Al caer, la piedra perturba las moléculas de agua sobre las que cae, comenzando éstas a

vibrar. Al estar en contacto con otras vecinas, le transmiten su movimiento, y éstas sucesivamente a su alrededor. No hay transporte de materia. Si colocamos un corcho flotando en la superficie del agua, se observa que el corcho se limita a subir y bajar, pero sin desplazarse del lugar que ocupa, sin embargo, las ondas del agua se propagan en todas direcciones.

Los fenómenos ondulatorios son fenómenos que se denominan periódicos, ya que cada cierto tiempo se repite el fenómeno de idéntica forma. Para caracterizar un movimiento ondulatorio se definen varias magnitudes características: **período**, **frecuencia** y **longitud de onda**. De ellos se deduce una cuarta: **velocidad de propagación**.

**Período**, es el tiempo empleado por un punto en realizar una oscilación completa, o tiempo en que tarda en repetirse un fenómeno.

**Frecuencia (n)**. Es el número de oscilaciones que se producen por unidad de tiempo, por la definición de periodo es fácil deducir que la frecuencia es la inversa del periodo:

$$n = \frac{1}{T}$$

Su unidad de frecuencia es el Hercio (Hz) o ciclos por segundo.

Mientras que un punto describe una vibración completa, la perturbación, u onda, se propaga un cierto espacio, ese espacio que avanza la onda en un tiempo igual al periodo, que es el que tarda en darse la vibración, es lo que llamamos **longitud de onda**. Dos puntos que estén separados en el espacio una longitud de onda se encuentran en el mismo estado de vibración, pues entre ellos el primero de los puntos ha ejecutado una vibración completa respecto al segundo, se dice, por ello, que están en fase. Esto también sirve para definir la longitud de onda de otra forma, como la mínima distancia entre dos puntos que están en fase.

La longitud de onda se representa por  $\lambda$  y su unidad es el metro, en el S. I. La relación que existe entre la longitud de onda y el tiempo de un periodo es la velocidad de propagación ( $v$ ):

$$v = \frac{\lambda}{T}, \text{ ó } \lambda = v \cdot T, \text{ ó } \lambda = \frac{v}{n}, \text{ ecuaciones que relacionan entre sí las magnitudes definidas.}$$

La velocidad de propagación de una onda depende de las características del medio en el que se propaga la onda, por eso, la velocidad del sonido es diferente en el aire, que en los líquidos o en los sólidos. Está motivada por la mayor o menor rigidez que existe entre las uniones de los átomos o moléculas de los materiales terrestres.

Dependiendo de cómo vibran las partículas del medio material, se pueden clasificar las ondas. Decimos que una onda es transversal si las partículas vibran en una dirección perpendicular a la dirección de propagación (ej. ondas sísmicas S), y que es longitudinal, si la dirección de vibración coincide con la dirección de propagación (ondas sísmicas P).

Las ondas materiales transversales sólo se propagan en medios sólidos. Las longitudinales pueden propagarse en los tres tipos de medios.

Con frecuencia no resulta fácil determinar si un fenómeno es de naturaleza ondulatoria. Lo usual es ver si presentan algunas características de los fenómenos ondulatorios, como la **reflexión**, o cambio de dirección que sufre una onda al llegar a la superficie de separación de dos medios materiales, no siendo el segundo transparente para la onda, que es devuelta al medio en el que se propagaba, pero en una dirección distinta. La **refracción** es el cambio de dirección y de velocidad que sufre la onda al atravesar la superficie de separación.

Los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales entre sí; los de incidencia y de refracción son diferentes. Si la refracción se produce por disminución de la velocidad de propagación es mayor el ángulo de incidencia, en caso contrario es mayor el de refracción. Siempre se cumple la **ley de Snell** (primera ley de la refracción) que:

$$\text{Sen } i \cdot n_1 = \text{Sen } r \cdot n_2$$

Donde  $\hat{i}$  = ángulo de incidencia;  $r$  = ángulo de refracción;  $n_1$  = índice de refracción en el medio 1 =  $c/v_1$ ;  $n_2$  = índice de refracción en el medio 2 =  $c/v_2$ ;  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de la luz en cada medio.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Cuando el segundo medio es transparente se produce la interferencia y la difracción. Se produce interferencia cuando en un medio se propagan más de una onda que, al menos en parte, presentan igual amplitud, frecuencia y longitud de onda. Cuando un punto del medio es alcanzado por dos ondas, se produce la acumulación de los efectos de ambos movimientos que llamamos interferencia. Como resultado, el punto puede vibrar más intensamente o no tener vibración. En el primer caso se dice que la interferencia es constructiva y en el segundo, que es destructiva. Un ejemplo lo podemos poner de manifiesto si dejamos caer varias piedras, a la vez, sobre la superficie de un estanque.

En el caso de las ondas sonoras, la interferencia se produce al colocar dos focos vibrando simultáneamente a una distancia lo suficientemente próxima, de tal forma que las respectivas frecuencias de vibración presenten valores similares aunque no idénticos.

La **difracción** es la propiedad que tienen las ondas de bordear los obstáculos, aunque sólo se produce este fenómeno si el obstáculo tiene un tamaño semejante a la longitud de onda.

La propagación de una onda supone una transmisión de energía desde el foco emisor hasta cada uno de los puntos alcanzados por la misma. La energía que inicialmente posee la onda está concentrada en el foco. A medida que se propaga se producen pérdidas debidas a diferentes motivos: rozamiento, calor, etc., a consecuencia de ello la onda se debilita. Se denomina **absorción** al debilitamiento producido por esta causa.

Hay otra razón para que la onda se debilite. La energía que al principio está concentrada en el foco emisor, a medida que pasa el tiempo, conforme avanza la onda, la energía se reparte entre más moléculas del medio, por lo que cada vez es menor la energía que una molécula le comunica a las vecinas. Al debilitamiento debido a la expansión de la onda, se le denomina **atenuación**, y es independiente de la absorción.

### 73.5.1. Principio de Huygens

Para una sucesión de ondas que se desplaza en un determinado medio, el lugar geométrico de los puntos que en un mismo instante presentan idéntica fase de vibración se denomina superficie o frente de onda. El llamado rayo de onda se define como la dirección que presenta la propagación y, para medios isotrópicos y homogéneos, es siempre perpendicular a la superficie de onda.

Según Huygens, todo punto de un frente de onda pueden considerarse emisor de ondas secundarias y la envolvente de estas perturbaciones secundarias dará lugar a una nueva superficie de onda que corresponde a un instante posterior.

### 73.5.2. La luz

La luz y el sonido son dos ejemplos de movimientos ondulatorios. El primero, la luz, es de naturaleza electromagnética y se produce cuando vibran las cargas eléctricas que hay en el interior de átomos y moléculas. Es una onda transversal que puede propagarse en el vacío y en los medios materiales transparentes a ella.

Nosotros llamamos luz a una pequeña fracción de los movimientos ondulatorios electromagnéticos, que tienen la propiedad de excitar la retina del ojo, pero de la misma naturaleza son los Rayos X, los ultravioletas (UV), los infrarrojos (IR), las ondas de la radio y T.V., etc. Lo único que diferencia a unas ondas de otras del espectro electromagnético es su longitud de onda y la frecuencia de radiación. La luz visible está comprendida entre longitudes de ondas que van desde 360 a 700 nm.



La velocidad de la luz ( $c$ ) es una de las constantes fundamentales de la ciencia física y, por aproximación, se considera idéntica para todas las frecuencias de vibración, desde las ondas de la radio hasta los rayos X. Su gran magnitud, 300.000 km/s planteó notables problemas para su determinación

### 73.5.3. El sonido

El sonido es un movimiento ondulatorio longitudinal, producido por la vibración de un cuerpo elástico. Al vibrar un cuerpo elástico empuja a un lado y otro a las moléculas de aire que están en contacto con él, creando una presión fluctuante que es lo que se propaga como sonido. Cuando esas ondas de presión llegan a la membrana del tímpano, la hacen vibrar, esta vibración transmitida por el sistema auditivo (la onda cambia dos veces de medio de propagación, o sea se refracta dos veces), se convierte en estímulos nerviosos que, en el área cerebral correspondiente, se transforman en la sensación de sonido.

El sonido es una perturbación longitudinal que necesariamente precisa de un soporte material para su propagación. El más frecuente medio de propagación es el aire, pero también se propaga en líquidos y sólidos.

El oído humano está capacitado para percibir frecuencias entre 15-20 y 20.000 Hz, aunque hay sonidos de menor y mayor frecuencia. A los primeros se les llama infrasonidos y a los segundos ultrasonidos. Ciertos animales tienen capacidad de percibir unos y otros y algunos, como los murciélagos utilizan los ultrasonidos como un radar para cazar sus presas y detectar los obstáculos en su vuelo.

La naturaleza del sonido queda caracterizada, además de por su frecuencia y por su periodo, por tres propiedades fundamentales: el tono, la intensidad y el timbre.

El **tono** de un sonido viene definido por su frecuencia. Al incrementarse el número de vibraciones por segundo del foco emisor se eleva el tono (ej. las sirenas).

La **intensidad** ( $I$ ) es la cualidad sonora que permite diferenciar los sonidos en fuertes o débiles. Se define como la energía media que atraviesa la unidad de superficie dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación de la perturbación, en la unidad de tiempo. La fuerza del sonido depende de cuánta energía hay en las ondas sonoras. Las grandes ondas energéticas mueven los tímpanos largamente y suenan fuerte, las ondas pequeñas los mueven mucho menos y suenan poco.

La diferencia de intensidades de dos sonidos (**nivel de intensidad**) se mide en bel<sup>1</sup> o en su submúltiplo decibel. La escala decibélica es logarítmica (un sonido de dos decibelios (dB) es diez veces más intenso que un sonido de un decibelio (no el doble). Los sonidos por encima de 120 dB causan intensos dolores y sordera.

Las vibraciones periódicas complejas se producen por superposición de varias oscilaciones armónicas simples con frecuencias que sean múltiplos de la frecuencia fundamental de la vibración, que es la menor de todas ellas. Los componentes de una vibración compleja que presentan valores de frecuencia superiores a la fundamental se denominan armónicos. Según von Helmholtz (1859) el **timbre** de un sonido depende del número e intensidad de los armónicos que acompañan a un sonido fundamental, así como de las características del foco emisor del sonido. Así podemos distinguir sonidos de igual tono e intensidad emitidos por un instrumento musical, la voz humana o cualquier otro.

Tanto la luz como el sonido presentan todas las características de los movimientos ondulatorios, se refleja, refractan, interfieren y difractan. Como movimientos ondulatorios que son propagan energía en forma de ondas, sin transporte de materia. La energía que propagan es la que suministra su foco emisor, es decir, la fuente que genera la luz o el sonido.

---

<sup>1</sup> un bel = julio/m<sup>2</sup>.s