

Fís

física

Juan Botto [director]

Nélida Ana González
Lucía Iuliani
Juan Carlos Muñoz

tinta.fresca:

Polimodal | Educación Secundaria Superior

La genialidad es uno por ciento de inspiración y noventa y nueve por ciento de transpiración.

Thomas Alva Edison

6

ENERGÍA MECÁNICA

CONTENIDOS

- Trabajo mecánico
- Concepto de energía
- Relación entre el trabajo y la energía
- Energía cinética
- Energía potencial gravitatoria
- Energía potencial elástica
- Energía mecánica
- Fuerzas conservativas y no conservativas
- Conservación de la energía mecánica
- No conservación de la energía mecánica
- Potencia

La Mecánica newtoniana permitió a los científicos explicar gran cantidad de fenómenos naturales mediante los conceptos de aceleración y fuerza. Si se conocían las fuerzas actuantes sobre un cuerpo cualquiera, su masa y su velocidad en algún instante, era posible determinar las sucesivas posiciones y trayectorias descritas por dicho cuerpo. Sin embargo, con el tiempo se hicieron notorias algunas de las limitaciones propias de esta manera de analizar el mundo físico. Por ejemplo, estudiar el comportamiento de los gases es imposible desde este punto de vista, puesto que sería necesario determinar las fuerzas y las velocidades de cada una de las partículas que los componen.

A principios del siglo XIX, como consecuencia de la Revolución Industrial, surgió una manera alternativa de interpretar los fenómenos naturales mediante la utilización del concepto de energía.

Entre quienes permitieron que este concepto se afanzara y se introdujera definitivamente en el ámbito científico, se destacan el médico Robert Mayer (1814-1878) quien propuso el principio de conservación; William Rankine (1820-1872), que introdujo la palabra "energía" a mediados de 1860; el cervecero James Prescott Joule (1818-1889), que realizó importantes experimentos en este campo; Hermann Helmholtz (1821-1894), un pionero en los estudios de la fisiología de los sentidos; el ingeniero James Watt (1736-1819) mediante sus máquinas de vapor, y el físico Clerk Maxwell (1831-1879) al establecer que la luz es una onda electromagnética. Sin embargo, seguramente el hecho clave que instaló este concepto entre la población mundial fue el lanzamiento de dos bombas atómicas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki durante la Segunda Guerra Mundial.

Actualmente, el concepto de energía es fundamental en las Ciencias Naturales. Todos los fenómenos y procesos naturales conocidos se analizan y explican mediante su aplicación, aunque es un concepto muy difícil de definir.



Cuando el viento impulsa al surfista por el agua, la energía en movimiento (energía cinética) afecta a la tabla, a la vela, al surfista, y al agua que es empujada a los lados de la tabla.

La palabra energía se asocia cotidianamente con la idea de vitalidad, fuerza o poder. Los diferentes significados que se asignan a este término dependen, en gran medida, del ámbito en que se lo utilice. Como primera aproximación al lenguaje empleado en Física, se puede caracterizar a la energía diciendo que por ella funcionan los vehículos y las maquinarias. Es energía lo que permite calentar o enfriar los objetos. La lluvia y el viento se producen debido a la energía proveniente del Sol. Está presente en los fenómenos biológicos, y sin ella no se podría producir la fotosíntesis. Toda actividad física también requiere energía. Aun sin definirla, es posible entender que la energía se manifiesta de diversas maneras.

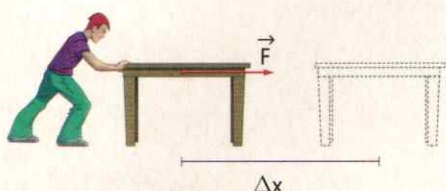
En todos los fenómenos mencionados se producen cambios y transformaciones. Por ello, puede decirse que una de las propiedades de la energía es la de transformarse y producir cambios. Algunos son visibles y otros no. Detrás de todo cambio en la naturaleza, está presente la energía.

Para estudiar el comportamiento de la naturaleza, es necesario realizar un recorte de la realidad. Esencialmente, un **sistema** es una porción del universo cuyos límites se eligen arbitrariamente para su estudio, y donde los elementos que lo constituyen están relacionados entre sí. La **energía** es, más específicamente, aquello que se necesita entregar o quitar a un sistema para producirle algún tipo de transformación.

Entre las múltiples formas en las que se puede manifestar la energía-calórica, luminosa, química, eléctrica, nuclear, sonora, etc., en este capítulo se hará referencia fundamentalmente a la energía mecánica, que está presente en los cuerpos en movimiento o bajo la acción de campos gravitacionales, y se tratarán las diferencias al intercambiar energía lenta o rápidamente, mediante la introducción del concepto de potencia, tan habitual en nuestra vida cotidiana.

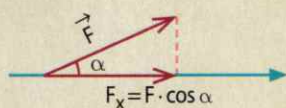
■ Se explica a **energía** como aquello que hay que entregar o quitar a un sistema para que se produzca una transformación. La energía puede manifestarse como calórica, luminosa, química, eléctrica, nuclear, sonora, mecánica, etc.

Trabajo mecánico

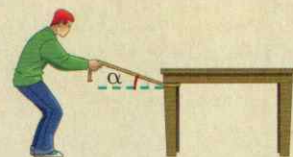


Habitualmente el concepto de trabajo hace referencia a actividades laborales o a situaciones en las que se realiza un esfuerzo físico o intelectual. En Física, este concepto es mucho más específico.

Fundamentalmente, el **trabajo mecánico** mide la transferencia de energía entre un cuerpo y el sistema que aplica la fuerza sobre él. Se realiza trabajo cuando se transfiere energía de un sistema a otro mediante la acción de fuerzas. Al empujar una mesa inicialmente en reposo, ejerciendo una fuerza paralela al suelo, el objeto se desplaza acelerándose en la dirección de dicha fuerza. El producto de la intensidad de la fuerza aplicada por el desplazamiento realizado durante su acción se conoce como trabajo mecánico o trabajo de una fuerza. Su valor indica la energía que le transfiere a la mesa quien la empuja.

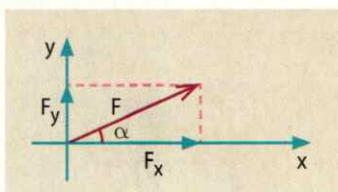


Si la misma fuerza se aplica por tracción, a través de una soga que forma un ángulo α con la dirección del desplazamiento, la aceleración de la mesa es menor, dado que la fuerza en el sentido del desplazamiento también lo es. En este caso, el trabajo mecánico se calcula mediante el producto de la proyección de la fuerza sobre la dirección del desplazamiento por el valor de éste.



Proyección de una fuerza

Toda fuerza puede descomponerse vectorialmente en dos direcciones según los ejes de coordenadas, siendo α el ángulo que forma la fuerza con el eje x .



Componente horizontal (componente sobre el eje x): $F_x = F \cdot \cos \alpha$.

Componente vertical (componente sobre el eje y): $F_y = F \cdot \sin \alpha$.

La expresión $|\vec{V}|$ indica el módulo del vector

$\vec{V}$, es decir, desde el punto de vista matemático, la distancia entre el origen y el extremo del vector. Si el vector representa una magnitud física hay que multiplicar esa distancia por la escala respectiva.

Si se mantiene la misma intensidad de la fuerza aplicada, cuanto mayor sea el valor del ángulo, menor será la fuerza ejercida en la dirección del movimiento y, por ende, menor será el trabajo realizado por dicha fuerza. En el caso de que la fuerza se ejerza en forma perpendicular al movimiento, entonces no producirá una aceleración de la mesa a lo largo de su dirección de desplazamiento, y su trabajo mecánico será nulo.

En otras palabras, el trabajo mecánico W efectuado por una fuerza se define como el producto del módulo del desplazamiento (Δx) por la componente de la fuerza paralela a éste ($F \cdot \cos \alpha$). Su expresión matemática es:

$$W = |\vec{F}| \cdot |\Delta \vec{x}| \cdot \cos \alpha = F_x \cdot \Delta x$$

El trabajo mecánico es una magnitud escalar y su unidad en el SI es el joule (J). Un joule equivale al trabajo que produce una única fuerza de 1 N que se desplaza 1 m en el mismo sentido que dicha fuerza.

El trabajo de una única fuerza que actúa sobre un cuerpo puede ser positivo o negativo. Es positivo cuando dicha fuerza es ejercida en el sentido del desplazamiento. En este caso, la velocidad del objeto aumenta, por lo cual se lo conoce como trabajo **motor**. En cambio, es negativo cuando la fuerza es ejercida en el sentido contrario al desplazamiento. En este caso la velocidad del objeto disminuye y se lo conoce como trabajo **resistente**.

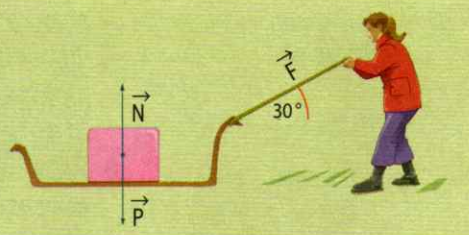
El trabajo es **nulo** cuando la fuerza es ejercida perpendicularmente al desplazamiento. Por ejemplo, si un turista se desplaza a velocidad constante llevando una valija en la mano, el trabajo sobre la valija es cero, porque su peso y la fuerza de sostén son perpendiculares al movimiento. Lo mismo sucede cuando un padre sostiene a su hijo en brazos. Aunque le produzca mucho cansancio, el trabajo sobre el niño es nulo.

Cuando sobre un cuerpo actúan varias fuerzas, el **trabajo mecánico total** o **trabajo resultante** se obtiene como la suma de los trabajos de cada una de las fuerzas por separado, es decir que:

$$W_R = W_{F_1} + W_{F_2} + W_{F_3} + \dots$$

Aplicaciones del concepto de trabajo mecánico

Una joven arrastra sobre el hielo un trineo cargado con una masa de 40 kg. Ejerce una fuerza de 70 N, mediante una soga que forma un ángulo de 30° con la horizontal. Calculen el valor del trabajo mecánico total sobre el trineo al desplazarlo 10 m sobre una superficie horizontal, suponiendo que el rozamiento es despreciable.



Sobre el trineo actúan tres fuerzas: la fuerza $\vec{F}$ de 70 N, ejercida por la joven, el peso P del trineo cargado, y la fuerza normal, N , ejercida por el suelo. Por lo tanto:

$$W_R = W_F + W_P + W_N$$

Es necesario calcular, entonces, el trabajo mecánico de cada fuerza por separado. El trabajo de la fuerza $\vec{F}$ sobre el trineo es:

$$W_F = |\vec{F}| \cdot |\Delta\vec{x}| \cdot \cos \alpha_F = 70 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} \cdot \cos 30^\circ = 606,22 \text{ J}$$

Es decir que la joven suministró al trineo energía por valor de 606,22 J.

El peso del trineo más su carga es: $P = m \cdot g = 40 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 392 \text{ N}$.

El trabajo del peso del trineo es:

$$W_P = |\vec{P}| \cdot |\Delta\vec{x}| \cdot \cos \alpha_P = 392 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} \cdot \cos 270^\circ = 0 \text{ J}$$

Dado que el trineo está en equilibrio en la dirección vertical, el módulo de la fuerza normal coincide, en este caso, con el del peso del trineo. El trabajo de esta fuerza es entonces:

$$W_N = |\vec{N}| \cdot |\Delta\vec{x}| \cdot \cos \alpha_N = 392 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} \cdot \cos 90^\circ = 0 \text{ J}$$

Finalmente, el trabajo resultante se obtiene como:

$$W_R = W_F + W_P + W_N = 606,22 \text{ J}$$

El trabajo mecánico obtenido es mayor que cero, lo cual indica que sobre el trineo actúa un trabajo motor. Éste es debido a la acción de la proyección de la fuerza $\vec{F}$ sobre la dirección horizontal y significa que la joven entregó energía al trineo.

El trabajo total también podría haberse obtenido calculando primero la fuerza resultante en la dirección de desplazamiento (en este caso horizontal). Desde este punto de vista, el valor de R_x es:

$$R_x = F_x + P_x + N_x = F \cdot \cos \alpha + 0 \text{ N} + 0 \text{ N} = 60,62 \text{ N}$$

Y el trabajo resultante es entonces:

$$W_{R_x} = |\vec{R}_x| \cdot |\Delta\vec{x}| \cdot \cos \alpha_{R_x} = 60,62 \text{ N} \cdot 10 \text{ m} = 606,22 \text{ J}$$

1. Una persona arrastra una caja de 30 kg por un suelo horizontal, aplicando una fuerza constante de 120 N paralelamente al suelo. Si la fuerza de fricción entre el piso y la caja es de 25 N, determinen, en cada caso, el trabajo mecánico realizado de:
 - a. cada fuerza sobre el cuerpo;
 - b. la fuerza resultante.

2. Un fletero empuja una caja de 20 kg ejerciendo una fuerza de 80 N por un plano inclinado de 3 m de longitud y rozamiento despreciable. Si el ángulo entre el plano y el suelo es de 40°, determinen el trabajo mecánico realizado por el fletero si la fuerza que ejerce es:
 - a. paralela a la superficie del plano inclinado;
 - b. paralela al suelo.

3. Un hombre empuja una caja de 160 N de peso, inicialmente en reposo, mediante una fuerza F de 50 N a lo largo de una distancia de 10 m. Sabiendo que el coeficiente de rozamiento entre el cajón y el suelo es de 0,2, calculen el trabajo realizado por la fuerza de rozamiento sobre dicho cuerpo.





Un kilojoule (kJ) equivale a 1000 J. Es decir,
1 kJ = 1000 J



Lord Kelvin, hace poco más de 100 años, fue quien llamó por primera vez **energía cinética** a la energía de movimiento. Este es el término que seguimos utilizando actualmente.



4. Un adulto de 70 kg camina a una rapidez de 1,3 m/s.
- ¿Cuál es su energía cinética?
 - ¿Cuál sería su rapidez si su energía cinética se duplicara?

5. Un cuerpo que se desplaza horizontalmente tiene una energía cinética de 100 J. Si su masa es de 12 kg, ¿cuál es su rapidez?

6. ¿Cuál es la masa de un cuerpo que se desplaza a 5 m/s si su energía cinética es de 300 J?

El concepto de energía

Si un sistema físico posee una determinada cantidad de energía, entonces con ella se tiene la posibilidad de producir cambios. Específicamente, se puede producir un trabajo mecánico. Un hombre puede acelerar un carro a lo largo de una distancia a expensas de la energía que contiene en sus músculos. Una ola puede desplazar un bote por la energía que contiene. El movimiento sísmico producido por un terremoto puede causar graves daños por la energía contenida en el interior de la Tierra. Por ello, en el siglo XIX Maxwell formuló la siguiente definición: *La energía es la capacidad de un sistema para realizar trabajo.*

Esta definición es muy útil y sencilla. Sin embargo, es algo inexacta. Sadi Carnot, joven ingeniero militar francés, encontró que era imposible diseñar un motor de vapor que convirtiese todo el calor en trabajo. Es decir, siempre algo de energía se vuelve inutilizable. El calor no puede ser transformado en un 100 % en trabajo útil, y, por lo tanto, la energía se degrada, como se verá en el próximo capítulo.

Dada esta relación entre los conceptos de trabajo mecánico y energía, ambos se miden en las mismas unidades. Entonces, en el SI, la unidad de medida de la energía es el joule (J).

Energía cinética

Una roca lanzada velozmente puede romper un vidrio, una flecha puede perforar un blanco, o un auto que se desplaza puede derribar un poste al chocar contra él. En otras palabras, todo cuerpo en movimiento posee energía porque tiene la capacidad de realizar trabajo mecánico.

Se denomina **energía cinética** (E_c) a la energía que tienen los cuerpos que se encuentran en movimiento. Formalmente, la energía cinética de traslación se calcula como:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

donde m es la masa del cuerpo y v su rapidez.

Aplicaciones del concepto de energía cinética

1. Un automóvil cuya masa es de 1000 kg se desplaza con una rapidez de 15 m/s. ¿Cuál es su energía cinética?

Para calcular la energía cinética es posible utilizar la fórmula anterior; en ese caso se obtiene:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{1000 \text{ kg} \cdot (15 \text{ m/s})^2}{2} = 112\,500 \text{ J} = 112,5 \text{ kJ}$$

2. Un cuerpo de masa m se desplaza con una rapidez v . ¿Qué ocurre con su energía cinética si se duplica su rapidez?

La energía cinética de este cuerpo es de: $E_c = \frac{m \cdot v^2}{2}$. Si se duplica su rapidez se obtiene una energía cinética de:

$$E_{c1} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} = \frac{m \cdot (2 \cdot v)^2}{2} = \frac{m \cdot 4 \cdot v^2}{2} = 4 \cdot \frac{m \cdot v^2}{2} = 4 \cdot E_c$$

Por lo tanto, la energía cinética de un cuerpo se cuadruplica cuando la rapidez se duplica.

Relación entre trabajo y energía cinética

Cuando se aplica una fuerza neta sobre un cuerpo, varía el valor de su velocidad, acelerándose, y por ende, también varía su energía cinética. La fuerza resultante realiza trabajo mecánico mientras actúa a lo largo del desplazamiento, cuyo valor es igual a la variación de la energía cinética de dicho cuerpo. La relación entre el trabajo mecánico y la energía cinética se conoce como el **Teorema de trabajo y energía cinética** antiguamente llamado **Teorema de las fuerzas vivas**, que dice:

El trabajo mecánico de la fuerza resultante de todas la fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a la variación de la energía cinética experimentada por dicho cuerpo.

Simbólicamente:

$$W_R = \Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

donde W_R representa el trabajo mecánico de la fuerza resultante, ΔE_c la variación de la energía cinética de un cuerpo, m su masa, v la rapidez final del cuerpo, y v_0 su rapidez inicial.

En otras palabras, el trabajo mecánico de la fuerza resultante de todas las que actúan sobre un cuerpo permite variar su energía cinética. Realizar trabajo mecánico neto implica adquirir o ceder energía de movimiento. Por ejemplo, para mover un armario inicialmente en reposo, es necesario aplicar una fuerza a lo largo de una cierta distancia. El trabajo mecánico de la fuerza resultante se manifiesta al variar la energía cinética del armario.

Para que un cuerpo inicialmente en reposo alcance una determinada velocidad de desplazamiento, es necesario que se realice un trabajo sobre él. Un valor determinado de velocidad se puede obtener aplicando una fuerza de gran intensidad (en la dirección del movimiento) a lo largo de una corta distancia, pero también mediante una fuerza de menor intensidad a lo largo de una distancia mayor, de tal manera que, en ambos casos, el producto de la fuerza por la distancia (o sea, el trabajo mecánico) sea el mismo.

Aplicaciones del teorema del trabajo y la energía cinética

Una pelota de fútbol, cuya masa es de 450 g, se desplaza horizontalmente a una rapidez de 18 m/s. Si al impactar sobre los guantes del arquero los mueve hacia atrás una distancia de 20 cm hasta detenerse, ¿cuál es la intensidad de la fuerza ejercida por el deportista sobre la pelota, suponiendo que ésta sea constante?

Se sabe que $W_R = W_P + W_F = \Delta E_c$ y que el peso actúa perpendicularmente a la trayectoria, por lo tanto $W_P = 0$ J, y entonces:

$$W_R = F \cdot \Delta x \cdot \cos 180^\circ = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2$$

Con lo cual, si se despeja F y se usa que la velocidad final de la pelota es de 0 m/s se obtiene:

$$F = \frac{\frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{m \cdot v_0^2}{2}}{\Delta x \cdot \cos 180^\circ} = 0 \text{ J} - \frac{0,45 \text{ kg} \cdot (18 \text{ m/s})^2}{2 \cdot (-1)} = 364,5 \text{ kg m/s}^2 = 364,5 \text{ N}$$

Luego, la intensidad de la fuerza ejercida por el deportista fue de 364,5 N.



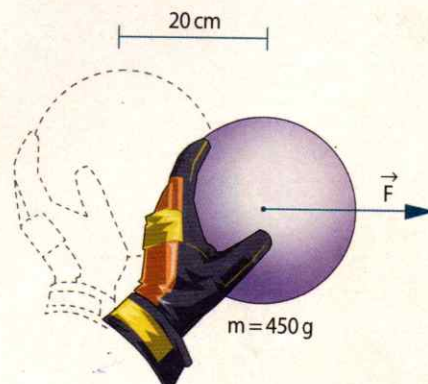
Leibniz fue el creador del término "Dinámica" utilizado actualmente para distinguir la rama de la Física que estudia las causas de los movimientos. También fue quien llamó *vis viva* o **fuerza viva** al producto no direccional $m \cdot v^2$, posteriormente denominado **energía cinética** por Thomas Young.

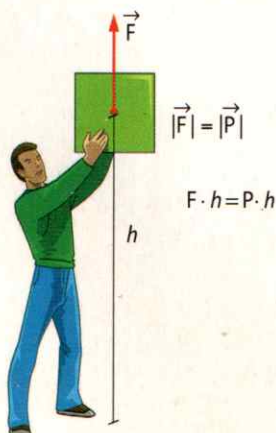
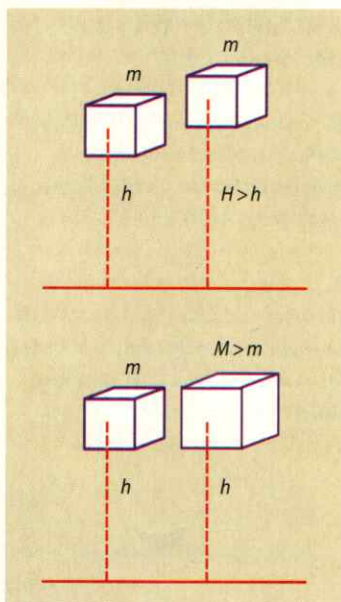
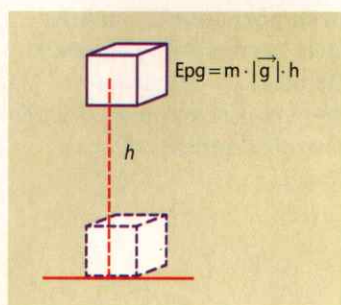


7. ¿Cuál es el valor del trabajo mecánico necesario para acelerar un automóvil de 1000 kg desde el reposo hasta 25 m/s?

8. ¿Cuánto trabajo es necesario realizar para frenar el auto del problema anterior si se desplaza a una rapidez de 80 km/h?

9. Un cuerpo de 2 kg, inicialmente en reposo, se desplaza bajo la acción de una fuerza que realiza un trabajo de 9 J. ¿Cuál es el valor de la velocidad final de dicho cuerpo?





Energía potencial gravitatoria

Todo cuerpo ubicado a una altura determinada sobre la superficie terrestre posee una cierta cantidad de energía, dado que al caer puede realizar trabajo mecánico. Este trabajo se manifiesta si el cuerpo hace un hoyo en el suelo o aplasta un objeto que se encuentre sobre él.

Se denomina **energía potencial**, E_p , a la energía que tiene un cuerpo debido a su posición. Si el cuerpo se encuentra a una altura próxima a la superficie terrestre, recibe el nombre de **energía potencial gravitatoria**, E_{pg} .

Estrictamente, la energía potencial gravitatoria es la energía que posee todo cuerpo que se halla en una cierta posición en un campo gravitatorio, con respecto a un valor cero tomado arbitrariamente como referencia. Cuando el cuerpo se encuentra cerca de la Tierra o de otro cuerpo celeste, el campo gravitatorio se puede considerar de intensidad constante. En esos casos la E_{pg} se calcula como:

$$E_{pg} = m \cdot |\vec{g}| \cdot h$$

donde $|\vec{g}|$ es el módulo de la aceleración gravitatoria, m la masa del cuerpo y h la altura a la que se encuentra con respecto al cero de referencia elegido.

Trabajo y energía potencial gravitatoria

En muchos casos, es práctico tomar la superficie terrestre como nivel cero, aunque esta elección dependerá del tipo de problema que se pretenda resolver.

Si dos cuerpos se encuentran a la misma altura, el de mayor masa tendrá mayor energía potencial gravitatoria. Si, en cambio, los dos tienen la misma masa, entonces el que posea mayor energía potencial gravitatoria será el que se encuentre a una altura mayor.

Llevar un cuerpo a una posición elevada requiere realizar un trabajo contra la gravedad. En este caso, el trabajo mecánico para elevarlo a velocidad constante es igual al producto de la fuerza necesaria para equilibrar el peso, por el desplazamiento vertical o altura alcanzada. Es decir:

$$W = F \cdot \Delta y \quad (1)$$

donde W es el trabajo mecánico, F la fuerza necesaria y Δy el desplazamiento vertical.

El módulo de la fuerza F es igual al del peso, es decir, $F = P$. Además, el peso de un cuerpo se puede expresar como el producto de su masa por la aceleración de la gravedad en el lugar, o sea, $P = m \cdot |\vec{g}|$. Por otro lado, el desplazamiento vertical corresponde a la variación de altura del cuerpo, $\Delta y = h$. Luego la expresión (1) queda: $W = m \cdot |\vec{g}| \cdot h$.

Es decir, el peso de un cuerpo a una altura h tiene la capacidad de realizar un trabajo $m \cdot |\vec{g}| \cdot h$ al dejarlo caer, que coincide con el valor de su energía potencial gravitatoria a dicha altura. En consecuencia:

$$E_{pg} = m \cdot |\vec{g}| \cdot h$$

donde h está medida con respecto a la superficie terrestre.

En general, el trabajo ejercido por la fuerza peso entre dos puntos A y B próximos a la superficie terrestre, cuyas alturas son respectivamente h_A y h_B , es igual a la diferencia de la energía potencial gravitatoria entre A y B. Simbólicamente:

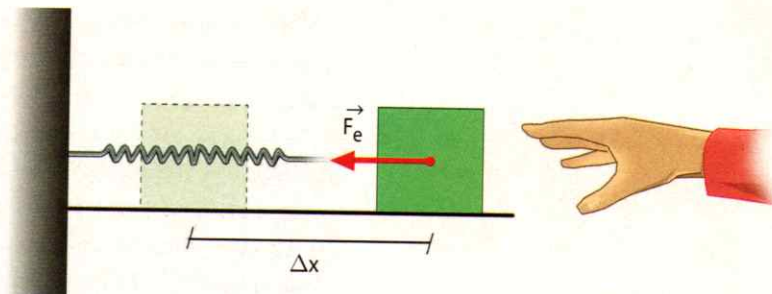
$$W_{AB}^P = E_{pgA} - E_{pgB}$$

Energía potencial elástica

Todo elemento elástico, como por ejemplo un resorte, posee energía en forma de **energía potencial elástica** (E_{pe}) cuando se lo estira o se lo comprime. Al soltarlo, este tiende a regresar a su posición de equilibrio. La fuerza elástica tiene la capacidad de realizar trabajo mecánico durante su desplazamiento, que se manifiesta transfiriendo la energía del resorte a un cuerpo unido a él. Esta energía potencial elástica se expresa matemáticamente como:

$$E_{pe} = \frac{k \cdot (\Delta x)^2}{2}$$

donde E_{pe} es la energía potencial elástica, k es la constante elástica del resorte y Δx es su elongación.



Cuanto mayor sea la elongación del resorte, mayor será la energía potencial elástica que adquiera. Un resorte que se estira una distancia d tiene la misma energía potencial elástica que si se comprimiera la misma distancia.

Un resorte cuya elongación es nula no posee energía potencial elástica dado que, en este caso, no existe fuerza elástica que pueda realizar trabajo mecánico. Además, cuanto mayor es el valor de la constante elástica del resorte, mayor es la energía que almacena, considerando que la elongación se mantiene constante.

Trabajo y energía potencial elástica

El trabajo mecánico entre dos puntos, A y B, que realiza la fuerza elástica ejercida por un resorte sobre un cuerpo es igual a la diferencia entre la energía potencial elástica entre dichos puntos.

$$W_{AB}^{Fe} = E_{peA} - E_{peB}$$

Aplicaciones del concepto de energía potencial elástica

Un cuerpo empuja un resorte comprimiéndolo 5 cm cuando se le aplica una fuerza de 20 N. ¿Cuál es la energía potencial elástica en esa posición del resorte?

Para determinar la energía potencial elástica, primero es necesario determinar la constante elástica del resorte. De la ecuación de la fuerza elástica se obtiene que:

$$k = \frac{F_e}{\Delta x} = \frac{20 \text{ N}}{5 \text{ cm}} = 4 \text{ N/cm} = 400 \text{ N/m}$$

Por lo tanto, el valor de la energía potencial elástica en esa posición es:

$$E_{pe} = \frac{k \cdot (\Delta x)^2}{2} = \frac{400 \text{ N/m} \cdot (0,05 \text{ m})^2}{2} = 0,50 \text{ J}$$

Se llama **elongación** de un resorte a la longitud de estiramiento o de acortamiento desde su posición normal de equilibrio.

Como se analizó en el capítulo 3, página 50, la intensidad de la fuerza elástica se expresa matemáticamente como:

$$F_e = k \cdot \Delta x$$

10. ¿Cuál es la energía potencial gravitatoria que posee un cuerpo de 3 kg si se encuentra a 10 m sobre el suelo terrestre?

11. ¿Cuál es el trabajo mecánico necesario para elevar una pesa de 2 kg desde una altura de 60 cm hasta 1,50 m durante un ejercicio de fortalecimiento del bíceps braquial?

12. Un astronauta toma una roca de 5 kg y la levanta hasta una altura de 1 m. Si el trabajo requerido para ello es de 18,55 J, ¿en qué planeta se encuentra? ¿Por qué?

13. Un cuerpo empuja un resorte y lo comprime 10 cm cuando aplica una fuerza de 10 N. ¿Cuál es la energía potencial elástica en la posición del resorte?



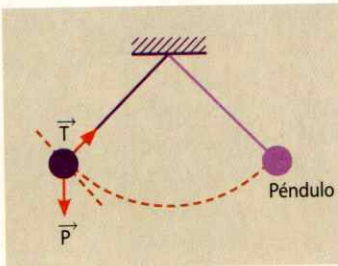
Energía mecánica

La **energía mecánica**, Em , de un cuerpo es igual a la suma de sus energías cinética, potencial gravitatoria y potencial elástica. Por lo tanto, la expresión matemática que representa a la energía mecánica de un cuerpo en un punto arbitrario A es: $Em_A = Ec_A + Epg_A + Epe_A$. Entonces:

$$Em_A = \frac{m \cdot v_A^2}{2} + m \cdot |\vec{g}| \cdot h_A + \frac{k \cdot (\Delta x_A)^2}{2}$$

donde v_A es la rapidez del cuerpo en el punto A, h_A su altura en dicho punto con respecto al cero de referencia, y Δx_A es la elongación del resorte en el punto A.

El centro de masa (CM) de un cuerpo, explicado en la página 25 del capítulo 2, es el punto alrededor del cual se distribuye toda la masa de dicho cuerpo.



En ausencia de rozamiento, un péndulo que oscila libremente alcanzaría siempre la misma altura, dado que la tensión del hilo no realiza trabajo por ser perpendicular a la dirección del movimiento en cada punto; y el peso no produce una variación de la energía mecánica por ser una fuerza conservativa.

Fuerzas conservativas y no conservativas

Las **fuerzas conservativas** son aquellas que al actuar sobre los cuerpos en determinadas circunstancias mantienen constante su energía mecánica. Si sobre un cuerpo actúan solamente fuerzas conservativas, entonces su cantidad de energía mecánica se conserva, es decir que se mantiene constante en todo punto de la trayectoria que describe.

El trabajo realizado por estas fuerzas presenta la característica particular de depender de las posiciones inicial y final del cuerpo, pero no de la trayectoria que éste haya seguido para ir de uno a otro. Entre las fuerzas conservativas se encuentran la fuerza peso y la fuerza elástica.

Las **fuerzas no conservativas**, en cambio, son aquellas que no conservan la energía mecánica del cuerpo. El trabajo mecánico realizado por estas fuerzas, entre dos puntos cualesquiera, depende de la trayectoria seguida. Cuando sobre un cuerpo actúa una fuerza no conservativa, entonces su energía mecánica no se mantiene constante, sino que varía entre un punto y otro de su trayectoria mientras ésta actúa. La fuerza no conservativa más característica es la fuerza de rozamiento.

Por ejemplo, un autito de juguete que se desplaza con una cierta velocidad sobre el suelo, finalmente terminará deteniéndose. Su energía cinética inicial no se mantiene constante a lo largo de su desplazamiento debido a la fricción que actúa sobre él. Esta **fuerza de rozamiento** produce una disminución de la energía del cuerpo, que se transforma en calor y ruido liberados al medio externo.



14. ¿Cuál es la energía mecánica que posee un atleta durante un salto en largo, en el instante en el que su centro de masa se encuentra a 1,50 m de altura y su rapidez es de 5 m/s?

15. ¿Cuál es la energía mecánica de una pelota de 500 g lanzada verticalmente hacia arriba, cuando alcanza una altura máxima de 6 m?

Las fuerzas no conservativas no solo generan una disminución en la energía de un cuerpo; también pueden producir un aumento. Es el caso de una **fuerza motriz**, como la ejercida por un músculo al levantar un objeto inicialmente en reposo, o por el motor eléctrico de una bomba de agua para elevar el líquido desde el suelo al techo. En estos ejemplos, el trabajo ejercido por la fuerza entrega energía al cuerpo.

Principio de Conservación de la Energía Mecánica

El Principio de Conservación de la Energía es el principio básico y fundamental de todas las Ciencias Naturales y, en particular, de la Física. Éste sostiene que si un subsistema ha perdido energía, es que otro u otros subsistemas han ganado la misma cantidad, de forma tal que la cantidad de energía total permanece invariable. En otras palabras, la energía se transforma, pero no se crea ni se destruye.

En el caso de la energía mecánica, (E_m) el principio afirma que:

La energía mecánica de un sistema aislado en el que solamente actúan fuerzas conservativas permanece constante.

En este tipo de análisis se considera, por ejemplo, que no hay rozamiento o que es despreciable a efectos prácticos, de modo que ninguna fracción se transforma en calor o ruido, asociados a formas no mecánicas en las que se manifiesta la energía. La expresión matemática de este principio, entre dos puntos diferentes cualesquiera (uno considerado inicial y el otro final), es:

$$E_{m_o} = E_{m_f}$$

Dado que la energía mecánica es la suma de la energía cinética y potencial, la expresión puede describirse como:

$$E_{c_o} + E_{pg_o} + E_{pe_o} = E_{c_f} + E_{pg_f} + E_{pe_f}$$

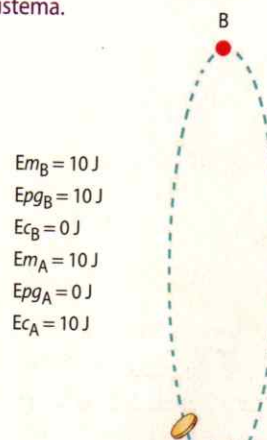
donde E_c es la energía cinética, E_{pg} es la energía potencial gravitatoria, y E_{pe} es la energía potencial elástica del sistema.

Aunque la energía mecánica sea igual al principio y al final de una transformación, esto no significa que suceda lo mismo con la energía cinética. Tampoco la energía potencial gravitatoria o la elástica son necesariamente constantes. La fórmula solo indica que la suma de estas formas de energía se mantiene invariante.

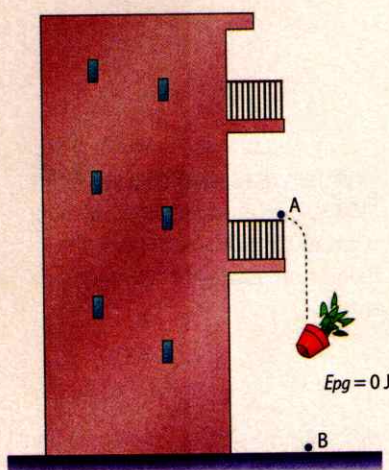
Por ejemplo, cuando se arroja una moneda verticalmente hacia arriba, inicialmente toda su energía se encuentra en forma de energía cinética. Ésta disminuye gradualmente durante su ascenso y aumenta su energía potencial gravitatoria, pero la suma de la energía cinética y la potencial gravitatoria es siempre la misma en todo instante a lo largo de su trayectoria. En el punto más alto, la energía cinética de la moneda es nula, ya que se detiene durante ese instante, y la energía potencial gravitatoria alcanza su máximo valor, que coincide con el de la energía cinética inicial, siempre que se considere despreciable el rozamiento con el aire.

Si se desprecia el rozamiento, y la moneda parte de la mano de la persona con una energía cinética inicial de 10 J, su energía potencial gravitatoria es nula con respecto a la mano y, por ende, la cantidad de energía mecánica es de 10 J. A la mitad de su trayectoria de ascenso, su energía cinética es de 5 J y su energía potencial gravitatoria también es de 5 J. Justo en el instante en el que alcanza la máxima altura, su energía cinética es cero y su energía potencial gravitatoria es de 10 J; el valor de la energía mecánica se mantiene constante a lo largo de toda la trayectoria.

Un sistema aislado es aquel en el que no existe intercambio de energía ni de materia con el exterior u otro sistema.



▶ El resultado de este ejercicio concuerda perfectamente con el hecho analizado en la página 26 del capítulo 2 con respecto a la caída libre que sostenía que todo cuerpo soltado al mismo tiempo y desde la misma altura, cae con la misma rapidez, independientemente de su masa.



$$E_{cA} = 0 \text{ J}$$

$$E_{mA} = E_{mB} \Rightarrow E_{pgA} = E_{cB}$$

▶ Para conocer el valor de la energía mecánica, es necesario conocer el valor de la masa del cuerpo. Si bien una maceta de 3 kg llega con la misma rapidez que otra de 1 kg, la primera presenta una energía igual al triple de la segunda.



16. ¿Cuál es la altura que puede alcanzar un atleta que realiza un salto con garrocha si su rapidez de despegue es de 8 m/s?

17. ¿Con qué rapidez llegará un objeto al suelo si se lo deja caer desde una altura de 5 m?

18. ¿Desde qué altura se dejó caer un objeto si llegó al suelo con una rapidez de 7 m/s?

Aplicaciones del principio de conservación de la energía mecánica

1. Una maceta mal ubicada sobre la baranda de un balcón cae desde una altura de 9 m hasta la vereda. Despreciando el rozamiento con el aire, ¿con qué rapidez llega al suelo? ¿Es necesario conocer el valor de la masa de la maceta? ¿Por qué?

Despreciando el rozamiento con el aire, la maceta no intercambia energía (en forma de calor) con el medio exterior, y por lo tanto su energía mecánica total puede considerarse constante a lo largo de la caída. La energía mecánica inicial a la altura del balcón (punto A de la ilustración) es igual a la energía en cada punto de su caída, y en particular la que posee en el instante en el que llega al suelo (punto B de la ilustración). En este caso: $E_{m\text{balcón}} = E_{m\text{suelo}}$, es decir que: $E_{mA} = E_{mB}$ y por lo tanto, $E_{cA} + E_{pgA} = E_{cB} + E_{pgB}$. O sea que:

$$\frac{m \cdot v_A^2}{2} + m \cdot |\vec{g}| \cdot h_A = \frac{m \cdot v_B^2}{2} + m \cdot |\vec{g}| \cdot h_B$$

Sacando la masa como factor común a cada lado de la igualdad, y luego simplificándola se llega a:

$$\frac{v_A^2}{2} + |\vec{g}| \cdot h_A = \frac{v_B^2}{2} + |\vec{g}| \cdot h_B \Rightarrow \frac{(0 \text{ m/s})^2}{2} + 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 9 \text{ m} = \frac{v_B^2}{2} + 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 0 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 9 \text{ m} = \frac{v_B^2}{2} \Rightarrow v_B = \sqrt{2 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 9 \text{ m}} = 13,28 \text{ m/s.}$$

Es decir que la maceta llega al suelo con una rapidez de 13,28 m/s.

Para el cálculo no fue necesario conocer el valor de la masa de la maceta. Esto expresa que la rapidez alcanzada por este cuerpo es la misma que alcanzaría cualquier otro que cayera desde la misma altura, independientemente de su masa.

2. Determinen cuál es el valor de la velocidad que necesita un saltador de garrocha para pasar sobre una barra ubicada a 4,80 m de altura, suponiendo que el centro de gravedad del atleta está inicialmente a 1 m sobre el suelo.

Si se desprecia el rozamiento con el aire, se tiene que: $E_{mA} = E_{mB}$. Por lo tanto: $E_{cA} + E_{pgA} = E_{cB} + E_{pgB}$, con lo cual:

$$m \cdot \frac{v_A^2}{2} + m \cdot |\vec{g}| \cdot h_A = m \cdot \frac{v_B^2}{2} + m \cdot |\vec{g}| \cdot h_B \Rightarrow \frac{v_A^2}{2} + |\vec{g}| \cdot h_A = \frac{v_B^2}{2} + |\vec{g}| \cdot h_B$$

Si se reemplaza por los valores numéricos se obtiene que:

$$\frac{v_A^2}{2} + 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} = \frac{0 \text{ m/s}^2}{2} + 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 4,8 \text{ m}$$

Entonces:

$$\frac{v_A^2}{2} = 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 4,8 \text{ m} - 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} \Rightarrow v_A^2 = 37,24 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot 2$$

De donde:

$$v_A = 8,63 \text{ m/s}$$

La velocidad inicial del atleta debe ser superior a 8,63 m/s para alcanzar una altura superior a la barra, y de esta manera pasar sobre ella. En realidad, para un cálculo más preciso sería necesario tener en cuenta también la energía elástica que almacena la garrocha.

Energía potencial en campos gravitatorios no uniformes

Anteriormente se vio que la energía potencial gravitatoria de un cuerpo cercano a la superficie terrestre se puede calcular mediante la ecuación $E_{pg} = m \cdot |\vec{g}| \cdot h$.

Esta ecuación es válida siempre que la aceleración gravitatoria pueda considerarse prácticamente constante, como por ejemplo cerca de la superficie de la Tierra. Incluso, puede generalizarse a cualquier otro planeta en la proximidad de su superficie. Sin embargo, el valor de la energía potencial disminuye considerablemente al aumentar la distancia desde la Tierra. Por lo tanto, la ecuación anterior ya no la expresa correctamente a medida que el cuerpo se aleja de las inmediaciones de la superficie de nuestro planeta. De allí la necesidad de encontrar una expresión más general de la energía potencial gravitatoria, de manera que pueda calcularse su valor incluso cuando el campo gravitacional no sea uniforme. El valor de la energía potencial gravitatoria puede obtenerse entonces mediante la ecuación:

$$E_{pg} = - \frac{G \cdot M \cdot m}{d}$$

donde G es la constante de gravitación universal, M la masa del planeta, m la masa del cuerpo y d la distancia entre sus respectivos centros.

El signo negativo expresa que se tiene que realizar trabajo contra las fuerzas gravitatorias para alejar un cuerpo de la superficie terrestre o de la de otro cuerpo celeste.

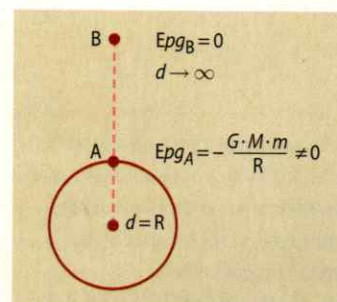
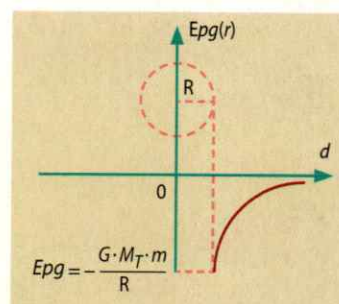
De esta ecuación se deduce que cuanto mayor sea la distancia d , menor será el valor absoluto de la energía potencial gravitatoria. Por lo tanto, la referencia cero de la energía potencial gravitatoria se considera cuando la distancia del cuerpo es infinitamente grande con respecto al centro de la Tierra. En otras palabras, la energía potencial gravitatoria tiende a cero cuando la distancia tiende a infinito. En este caso, la expresión matemática es:

$$E_{pg} = - \frac{G \cdot M \cdot m}{d} \xrightarrow{d \rightarrow \infty} 0$$

Esta es una diferencia con respecto a la ecuación de la energía potencial gravitatoria para campos gravitatorios uniformes, en la que el cero se toma generalmente sobre la superficie del planeta.

Además, dado que un cuerpo tiene mayor cantidad de energía potencial gravitatoria cuanto más alejado se encuentre del centro de la Tierra, entonces, a medida que la distancia es mayor, el valor de E_{pg} se va acercando a cero. Por ello, los valores intermedios se consideran negativos (menores que cero) y la ecuación lleva el signo negativo.

Una diferencia importante entre las ecuaciones de energía potencial gravitatoria para campos uniformes y para campos no uniformes es que mientras que en el primer caso la relación entre distancia y energía del cuerpo es lineal, en el segundo caso no lo es. En un campo uniforme, a medida que aumenta la distancia entre un cuerpo y el planeta, también crece proporcionalmente el valor de la energía potencial de dicho cuerpo. En cambio, cuando aumenta la distancia en un campo no uniforme, la energía gravitatoria también lo hace, pero no de modo directamente proporcional, sino más lentamente cuanto más alejado se encuentra el cuerpo de la superficie del planeta.



La rapidez de escape de la Tierra es de 11,19 km/s. Este valor fue calculado en el capítulo 4 (página 75).

La rapidez de escape de la Tierra

Si se lanza un cuerpo verticalmente hacia arriba desde la superficie terrestre, volverá a caer. Si es lanzado con una rapidez un poco mayor, alcanzará una mayor altura, pero también terminará cayendo. Sin embargo, hay un valor determinado de velocidad para el cual el cuerpo ya no retornará a nuestro planeta, sino que se alejará de él indefinidamente. Este valor se denomina **rapidez de escape** y es posible calcularlo a partir del concepto de conservación de la energía mecánica.

Si se consideran despreciables los efectos de la resistencia del aire, es posible plantear la conservación de la energía mecánica asumiendo que la rapidez del cuerpo será nula en un punto infinitamente alejado de la Tierra, donde se encuentre libre de su atracción gravitacional.

$$Em_0 = Em_f \quad \Rightarrow \quad Ec_0 + Epg_0 = Ec_f + Epg_f$$

En el estado inicial, la rapidez de despegue de la Tierra es la rapidez de escape; y la energía potencial gravitatoria es la que posee por encontrarse a una distancia igual al radio terrestre. Luego, la energía mecánica inicial es:

$$Em_0 = \frac{m \cdot v_e^2}{2} - \frac{G \cdot M_T \cdot m}{R} \quad (1)$$

En el estado final, la rapidez del cuerpo, y por ende su energía cinética, es cero. Además su energía potencial gravitatoria también es nula, dado que se halla a una distancia infinita del centro de la Tierra. En otras palabras, la energía mecánica en el estado final es cero, y por lo tanto:

$$Em_f = \frac{m \cdot v^2}{2} - \frac{G \cdot M_T \cdot m}{d} = 0 \quad (2)$$

Dado que la energía mecánica se mantiene constante, $Em_0 = Em_f$, por lo tanto de (1) y (2) se obtiene que:

$$\frac{m \cdot v_e^2}{2} - \frac{G \cdot M_T \cdot m}{R} = 0, \text{ luego } \frac{m \cdot v_e^2}{2} = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{R} \text{ y por lo tanto:}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_T}{R}}$$

Teniendo en cuenta que la masa de la Tierra es $M_T = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, su radio $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ y que la constante de gravitación universal $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, la rapidez de escape desde la Tierra vale:

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ m}}} = 11,19 \text{ km/s}$$



19. Calculen el mínimo valor de la energía cinética necesario para que un módulo lunar de 15 toneladas logre despegar y escapar de su atracción gravitatoria.
($M_L = 7,34 \cdot 10^{22} \text{ kg}$; $R_L = 1,74 \cdot 10^6 \text{ m}$)

Es decir que, si se lanza un cuerpo desde la superficie terrestre con una rapidez de 11,19 km/s, nunca regresará, dado que alcanzaría una posición infinitamente alejada, libre de la atracción gravitatoria de nuestro planeta.

En realidad, cuando se lanza un cuerpo más allá de la atracción terrestre, el cohete impulsor lo lleva primero fuera de la atmósfera, y en otra etapa se le suministra la velocidad inicial necesaria para no volver a la Tierra y orientarse según la trayectoria programada.

Agujeros negros

Un agujero negro es un cuerpo de gran concentración de masa, de modo que el campo gravitatorio que produce es tan intenso que no permite que nada escape de él, ni siquiera la luz. Esta idea fue propuesta inicialmente por John Michell (1724-1793) en 1783, quien calculó que un cuerpo con un radio equivalente a 500 radios solares con su misma densidad sería invisible, puesto que la luz no podría salir de su campo gravitatorio. Pierre Simon de Laplace (1749-1827) sostuvo en 1796 una idea similar. El término **agujero negro**, actualmente utilizado, fue inventado por el astrofísico estadounidense John Wheeler en 1969.

A pesar de no poder observarse porque la radiación emitida por ellos no puede escapar, los agujeros negros podrían ser detectados por su atracción gravitatoria sobre otros cuerpos celestes. Actualmente existen variadas pruebas de su existencia, e incluso algunos astrónomos suponen que su cantidad podría ser mayor que la de las estrellas visibles que, solo en nuestra galaxia, llegarían a unos cien mil millones. El mismo centro de la Vía Láctea podría contener un gran agujero negro con una masa equivalente a cien mil veces la del Sol.

 Actualmente se supone que en el centro de la mayoría de las galaxias existen agujeros negros supermasivos.

Aplicaciones de la rapidez de escape a los agujeros negros

- Calculen el mínimo radio que debería tener una estrella con la misma masa que el Sol, antes de transformarse en un agujero negro.
- Determinen qué densidad tendría dicha estrella.

a. De la fórmula de rapidez de escape se tiene que: $v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_*}{R_*}}$, donde M_* y R_* son, respectivamente, la masa y el radio de la estrella.

Considerando que el máximo valor posible de rapidez (v_e) es el de la luz, cuyo valor es c , se llega a la siguiente expresión:

$$R_* = \frac{2 \cdot G \cdot M_*}{c^2}$$

Esta ecuación indica que cualquier estrella de masa M_* con radio menor que R_* no permitiría escapar la luz, por lo cual no sería visible. Es el caso de un agujero negro.

Se denomina **radio de Schwartzschild** al mínimo radio que debe poseer una estrella para ser un agujero negro. En el caso de una estrella con la masa del Sol, el radio mínimo sería aproximadamente de:

$$R_{\min} = \frac{2 \cdot G \cdot M_{\text{sol}}}{c^2} = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} = 2964,44 \text{ m} \approx 3 \text{ km}$$

Es decir que, una estrella con la masa del Sol debería tener un radio de solamente unos tres kilómetros. En el caso del astro, su radio es de unos $7 \cdot 10^5 \text{ km}$, es decir, un valor muchísimo mayor que el calculado.

b. La densidad media (δ) de esta estrella se puede calcular aproximadamente como el cociente entre su masa y su volumen, suponiendo que es un cuerpo esférico y homogéneo. Es decir,

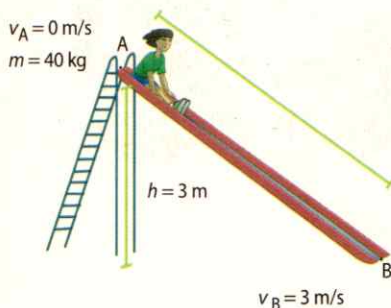
$$\delta = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{3 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot R^3} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{4 \cdot \pi \cdot (3 \cdot 10^3 \text{ m})^3} \approx 1,7 \cdot 10^{19} \text{ kg/m}^3$$

Una estrella con la masa del Sol y un radio de unos 3 km, tendría una densidad extremadamente grande. En este caso, en cada metro cúbico habría concentrada una masa media de unos $1,7 \cdot 10^{19} \text{ kg}$.



20. Un automóvil de 1000 kg que se desplaza a 20 m/s se detiene en una distancia de 30 m. ¿Cuál es la intensidad de la fuerza de frenado?

21. Una niña cuya masa es de 20 kg se deja caer deslizándose por la pendiente de un tobogán cuya altura es de 2 m. Si llega al suelo con una rapidez de 2 m/s y la fuerza de rozamiento sobre ella es de 90 N, ¿cuál es la longitud del tobogán?



Trabajo de las fuerzas no conservativas

Cuando sobre un cuerpo actúan fuerzas no conservativas, como por ejemplo, la fuerza de rozamiento, su cantidad de energía mecánica no permanece constante debido, en general, a la disipación que se produce en forma de calor.

A partir del teorema del trabajo-energía, se tiene que el trabajo de la fuerza resultante es igual a la variación de energía cinética del cuerpo. Es decir $W_{\text{resultante}} = \Delta E_c$ (1). Como, además, el trabajo de la fuerza resultante es necesariamente igual al trabajo de todas las fuerzas, sean conservativas o no conservativas, se tiene que: $W_{\text{resultante}} = W_C + W_{NC}$ (2). De (1) y (2) se deduce que $W_C + W_{NC} = \Delta E_c$. Dado que, por otra parte, $W_C = -\Delta E_p$, entonces $-\Delta E_p + W_{NC} = \Delta E_c$, que equivale a:

$$W_{NC} = E_c + \Delta E_p = \Delta E_m$$

Es decir que, en el caso de la acción de fuerzas no conservativas, la variación de energía mecánica es igual al trabajo mecánico realizado por dichas fuerzas. La expresión matemática es:

$$\Delta E_m = W_{NC}$$

donde W_{NC} es el trabajo de las fuerzas no conservativas.

En el caso de que la única fuerza no conservativa que actúe sobre el cuerpo sea la fuerza de rozamiento, entonces la ecuación puede escribirse como:

$$\Delta E_m = W_{F_{\text{roz}}}$$

donde $W_{F_{\text{roz}}}$ es el trabajo de fuerza de rozamiento.

Aplicaciones de la no conservación de la energía mecánica

Una niña de 40 kg de masa se deja caer deslizándose por la pendiente de un tobogán cuya altura es de 3 m. Si llega al suelo con una rapidez de 3 m/s:

- ¿cuál es el valor de la energía mecánica de la niña en el punto más alto?
- ¿cuál es el valor de su energía mecánica en el suelo?
- ¿cuál es la cantidad de calor disipada por rozamiento?
- ¿cuál es la intensidad de la fuerza de rozamiento si el largo del tobogán es 5 m?

$$\text{a. } E_{m_o} = E_{c_o} + E_{p_{g_o}} = \frac{m \cdot v_o^2}{2} + m \cdot |g| \cdot h_o = 0 \text{ J} + 40 \text{ kg} \cdot 9,80 \text{ m/s}^2 \cdot 3 \text{ m} = 1176 \text{ J}$$

$$\text{b. } E_{m_f} = E_{c_f} + E_{p_{g_f}} = \frac{m \cdot v_f^2}{2} + m \cdot |g| \cdot h_f = \frac{40 \text{ kg} \cdot (3 \text{ m/s})^2}{2} + 0 \text{ J} = 180 \text{ J}$$

c. Dado que la energía mecánica final es menor que la energía mecánica inicial, parte de ella fue disipada al medio exterior en forma de calor debido a la acción de la fuerza de rozamiento, que es una fuerza no conservativa. Por lo tanto, la variación de energía mecánica es igual a la cantidad de calor liberado:

$$\Delta E = E_f - E_o = 180 \text{ J} - 1176 \text{ J} = -996 \text{ J}$$

Se disipan entonces 996 J.

d. Como $\Delta E_M = W_{F_{\text{roz}}} = F_{\text{roz}} \cdot d \cdot \cos \alpha$, entonces:

$$F_{\text{roz}} = \frac{\Delta E_M}{d \cdot \cos \alpha} = \frac{-996 \text{ J}}{5 \text{ m} \cdot \cos 180^\circ} = 199,20 \text{ N}$$

Potencia

La **potencia** es la magnitud escalar que expresa la cantidad de energía transferida o transformada por unidad de tiempo. Por ejemplo: la potencia de un motor de combustión, como el de un automóvil, es la cantidad de energía química que éste puede transformar en energía mecánica por unidad de tiempo. La potencia de una lamparita eléctrica es la energía eléctrica que ésta transforma en energía lumínica y calor por unidad de tiempo. Simbólicamente puede expresarse la potencia de la siguiente manera:

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

donde ΔE es la cantidad de energía trasferida, y Δt el tiempo transcurrido.

En realidad, P es la potencia media desarrollada, dado que al considerar solamente los estados final e inicial, puede haber variaciones de energía en el medio del proceso que no se toman en cuenta (picos de energía, momentos donde no se transfirió energía por detención momentánea de la actividad, etc.).

La unidad de potencia en el sistema internacional se llama watt, en honor al ingeniero James Watt, (1736-1819). Un watt (W) equivale a la potencia desarrollada al transferir o transformar un joule de energía en un segundo. Simbólicamente: $W = J/s$. Por ejemplo, una lamparita de 60 W transforma 60 joules por segundo de energía eléctrica en energía lumínica y calórica. Una de 75 W transforma 75 joules por segundo.

Dado que la energía se puede transformar por medio del trabajo mecánico, entonces la potencia también puede calcularse en algunos casos como el trabajo realizado por unidad de tiempo. Matemáticamente:

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

donde ΔW es la cantidad de trabajo mecánico realizado, y Δt el tiempo transcurrido.

De esta ecuación se puede deducir que cuanto menor sea el tiempo empleado en la transferencia de energía, mayor será la potencia desarrollada, y viceversa. En la industria, entre dos motores que transforman la misma cantidad de energía, es preferible aquél que lo hace en un tiempo menor, es decir el que desarrolla mayor potencia.

Es importante diferenciar los conceptos de energía y potencia. La cantidad de energía necesaria para elevar una caja de 50 N desde el suelo hasta una altura de 2 m es la misma, tanto si se la levanta en un segundo como en tres. La energía mínima en cada caso es igual al trabajo de la fuerza necesaria para vencer el peso de la caja. Es decir:

$$W = F \cdot \Delta x = 50 \text{ N} \cdot 2 \text{ m} = 100 \text{ J}$$

Sin embargo, en el primer caso la energía es transformada rápidamente, mientras que en el segundo, la misma cantidad de energía es transformada en un lapso mayor. Por lo tanto, la potencia desarrollada en el primer caso es mayor que en el segundo. Se observa entonces que esta magnitud toma en cuenta tanto la cantidad de energía como el tiempo requerido para transferirla. Numéricamente:

$$P_1 = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{100 \text{ J}}{1 \text{ s}} = 100 \text{ W} \quad \text{y} \quad P_2 = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{100 \text{ J}}{3 \text{ s}} = 33,33 \text{ W}$$

Thomas Savery construyó el primer motor de vapor en el año 1698, y propuso como unidad de medida la potencia desarrollada por un caballo. Así surgió el concepto de **caballo de fuerza o potencia de un caballo** (HP = horse power).

Actualmente, se sabe que la potencia realmente desarrollada por un caballo es algo inferior a 1 HP: $1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$.

La potencia puede expresarse también en función de la velocidad, de la siguiente manera:

$$P = F \cdot v$$

En el arte marcial conocido como tae-kwon-do, para quebrar una pila de listones de madera, se imparte la mayor fuerza con la mayor rapidez posible, y también se desarrolla la mayor potencia en el impacto.



22. Calculen la potencia que desarrolla un automóvil que se desplaza a una velocidad constante de 13 m/s, si la fuerza de rozamiento sobre el vehículo es de 500 N.



Einstein y las montañas rusas



“Consideremos la atracción popular de la montaña rusa. Se levanta un pequeño tren hasta el punto más alto de una vía. Al dejarlo libre, empieza a rodar, por acción de la fuerza gravitatoria, primero hacia abajo, y sigue subiendo y bajando por un fantástico camino curvo, lo cual produce en los viajeros la emoción debida a los cambios

bruscos de velocidad. Toda montaña rusa tiene su punto más elevado en el lugar donde se inicia el viaje y no alcanza nunca, en todo su recorrido, otra altura igual. (...)

(...) Con relación al experimento ideal, imaginemos que alguien descubriera un procedimiento capaz de eliminar el roce que acompaña siempre al movimiento y se decidiera a aplicar su invento a la construcción de una montaña rusa, debiendo arreglárselas solo para encontrar la manera de construirla. El vehículo ha de descender y ascender repetidas veces; su punto de partida estará a 35 metros, por ejemplo. Al final de varias tentativas, descubriría la sencilla regla siguiente: puede darle a la trayectoria la forma que le plazca, con tal de que la elevación no exceda la de la posición inicial. Si el vehículo debe efectuar todo el recorrido libremente, entonces la altura de la montaña puede alcanzar los 35 metros todas las veces que quiera, pero nunca excederla. La altura primera no puede recuperarse jamás si el vehículo marcha sobre rieles verdaderos, a causa de la fricción, pero nuestro

hipotético ingeniero no necesita preocuparse por ella. (...) En el punto más elevado, el vehículo tiene una velocidad nula o cero y está a 35 metros del suelo. En la posición más baja posible, su distancia al suelo es nula, siendo, en cambio, máxima su velocidad. Estos hechos pueden ser expresados en otros términos. En la posición más elevada, el vehículo tiene energía potencial pero no energía cinética o de movimiento. En el punto más bajo, posee la máxima energía cinética pero ninguna energía potencial. Toda posición intermedia, donde hay determinada velocidad y elevación, tiene ambas energías. La energía potencial crece con la elevación, mientras que la energía cinética aumenta con la velocidad. (...) La energía total, potencial más cinética, se comporta como dinero cuyo valor queda intacto a pesar de múltiples cambios de un tipo a otro de moneda, por ejemplo de dólares a pesetas y viceversa, de acuerdo con un tipo de cambio bien definido.”

Albert Einstein y Leopold Infeld.
La evolución de la Física. Salvat Editores, S.A. Barcelona, 1986.



A partir de la lectura del texto, respondan a los siguientes interrogantes.

- ¿Es posible que el tren de una montaña rusa real supere la altura de la primera elevación? ¿Y que la alcance? ¿Por qué?
- ¿Es posible eliminar totalmente el rozamiento?
- Suponiendo el caso ideal, sin rozamiento, propuesto por los autores: ¿con qué valor de velocidad llegará el tren al suelo?
- ¿En qué es análogo el dinero a la energía mecánica?

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- El **trabajo mecánico** (W) realizado por una fuerza se define como el producto del módulo del desplazamiento (Δx) por la componente de la fuerza paralela a éste ($F \cdot \cos \alpha$).
- El trabajo es nulo cuando la fuerza es ejercida perpendicularmente al desplazamiento.
- Maxwell definió la **energía** como la capacidad de un sistema para realizar trabajo.
- La **energía cinética** es la energía que tienen los cuerpos que se encuentran en movimiento.
- El **trabajo mecánico** de la fuerza resultante sobre un cuerpo es igual a la variación de su energía cinética.
- La **energía potencial gravitatoria** es la energía que posee todo cuerpo que se halla a una altura determinada dentro de un campo gravitatorio constante, con respecto a un cero de referencia arbitrario.
- La **energía mecánica** de un cuerpo, en un punto determinado del espacio, es igual a la suma de sus energías cinética, potencial gravitatoria y potencial elástica en dicho punto.
- La cantidad de energía mecánica de un sistema aislado en el que solamente actúan fuerzas conservativas permanece constante.
- La variación de energía mecánica es igual al trabajo mecánico realizado por las fuerzas no conservativas.
- La **potencia** expresa la cantidad de energía transferida o transformada por unidad de tiempo.

Fórmulas

$$W = |\vec{F}| \cdot |\Delta \vec{x}| \cdot \cos \alpha = F_x \cdot \Delta x \quad \text{Trabajo mecánico}$$

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \text{Energía cinética}$$

$$E_{pg} = m \cdot |\vec{g}| \cdot h \quad \text{Energía potencial gravitatoria de un campo uniforme}$$

$$E_{pg} = - \frac{G \cdot M \cdot m}{d} \quad \text{Energía potencial gravitatoria de un campo no uniforme}$$

$$E_{pe} = \frac{k \cdot (\Delta x)^2}{2} \quad \text{Energía potencial elástica}$$

$$E_m = E_c + E_{pg} + E_{pe} \quad \text{Energía mecánica}$$

$$W_{\text{fuerza resultante}} = \Delta E_c \quad \text{Trabajo de la fuerza resultante}$$

$$\Delta E_m = W_{NC} \quad \text{Variación de la energía mecánica}$$

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{Potencia}$$

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Calculen la energía cinética de una bala de 200 g cuya velocidad es de 300 m/s.

2. Un resorte de constante elástica $k = 300 \text{ N/m}$ se estira y adquiere una energía de 20 J. ¿Cuál es la elongación del resorte?

3. Una pelota de béisbol tiene una masa de 140 g. Llega al guante del catcher con una velocidad de 30 m/s y mueve 25 cm hacia atrás su mano hasta detenerla completamente. ¿Cuál fue la fuerza que la pelota ejerció sobre el guante?

4. ¿Cuál es el valor del trabajo mecánico que debe realizarse para detener un automóvil de 1000 kg que se desplaza a una rapidez de 20 m/s?

5. Una bomba eleva 6 kg de agua por minuto, hasta una altura de 4 m. ¿Cuál es la potencia desarrollada por el motor de dicha bomba?

6. En un adulto, la energía media liberada por cada litro de oxígeno consumido es de unos $2 \cdot 10^4 \text{ J}$. Si una persona consume 1,40 litro de oxígeno por minuto durante un pedaleo rápido, ¿cuál es la potencia desarrollada?

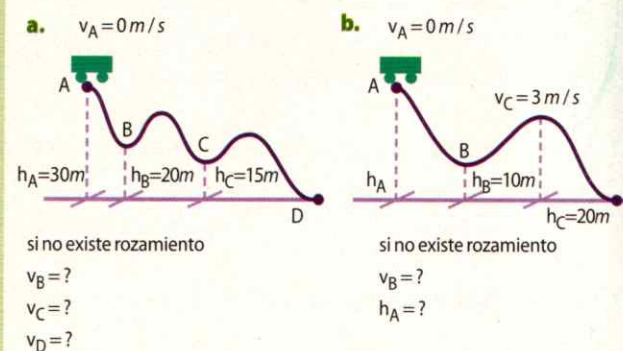
7. Un operario de una empresa constructora eleva a velocidad constante un bloque de 15 kg a una altura de 5 m por medio de una soga. Si para ello emplea un tiempo de 30 segundos:

- ¿cuál es la intensidad de la fuerza ejercida por el operario? ¿por qué?
- ¿cuál es el valor del trabajo mecánico efectuado por él?
- ¿cuál es la cantidad de energía que transfiere al bloque?
- ¿cuál es la potencia desarrollada por el trabajador?
- Si el bloque fuera elevado mediante un motor eléctrico en 10 segundos:
 - ¿cuál sería la cantidad de energía transferida al bloque?
 - ¿cuál sería la potencia desarrollada por el motor?

8. Un atleta de salto con garrocha alcanza una altura máxima de 4,70 m durante una prueba. Despreciando el rozamiento, determinen su:

- energía potencial gravitatoria inicial;
- energía potencial gravitatoria en la altura máxima;
- energía cinética en la altura máxima;
- energía mecánica en la altura máxima;
- energía mecánica inicial;
- energía mecánica en la mitad de su altura máxima;
- energía cinética inicial;
- rapidez inicial (de despegue).

9. Los siguientes esquemas representan montañas rusas. Calculen las variables desconocidas suponiendo que no existe rozamiento entre el carrito y las vías.



10. ¿En qué caso es mayor el valor de la energía potencial gravitatoria de Romeo al subir al balcón de Julieta:

- por una escalera;
- por una soga;
- en un globo aerostático (todavía no existía);
- en una máquina voladora de Leonardo da Vinci (si hubiese funcionado)?

11. En qué caso es mayor la variación de energía potencial gravitatoria adquirida por un piano al subirlo a un camión: ¿por un plano inclinado largo, o por uno corto? (Consideren que ambos planos tienen la misma altura.)

12. ¿En qué caso es mayor el trabajo realizado por la fuerza peso al subir el piano de la pregunta anterior? ¿Por qué?

13. Un atleta va a realizar un salto vertical, y antes de comenzar el movimiento, la energía cinética, la potencial gravitatoria y la elástica son todas cero. ¿Cómo es posible entonces el salto si la energía no se crea de la nada?

14. Cuando un paracaidista contacta el suelo, ¿qué sucede con la energía que traía en la caída si finalmente queda quieto y en altura cero? ¿Desaparece?

15. Al empujar un ropero, le entregamos una cierta cantidad de energía. ¿Qué sucede con esa energía si el ropero queda quieto al dejar de aplicarle la fuerza?

16. Determinen cuánta energía potencial gravitatoria adquieren al subir las escaleras de la escuela, de la casa, etc. Midan las magnitudes que necesiten para realizar los cálculos.

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si cada una de las siguientes afirmaciones es verdadera (V) o falsa (F).
Justifiquen en cada caso.

1	Dos cuerpos que se desplazan a igual rapidez poseen igual energía cinética.	F
2	Si la rapidez de un cuerpo se duplica, entonces su energía cinética también se duplica.	F
3	La expresión $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$ es válida cuando actúan fuerzas no conservativas.	F
4	En un campo uniforme, la diferencia de energía potencial gravitatoria entre 0 m y 1 m es menor que entre 1 m y 2 m.	X
5	El trabajo de la fuerza normal sobre un cuerpo es nulo.	V
6	El trabajo del peso de un cuerpo que se desliza en un plano inclinado es cero.	X
7	La energía cinética nunca puede ser negativa.	V
8	La fuerza de rozamiento es una fuerza conservativa.	F
9	Un péndulo que oscila libremente posee su máxima energía cinética en la posición más baja de su trayectoria.	X
10	Una pelota puede rebotar a una altura mayor que la inicial cuando se la deja caer libremente.	F
11	Un resorte adquiere la misma energía potencial elástica cuando se lo estira 3 cm que cuando se lo comprime la misma longitud.	X
12	Un cuerpo conserva su energía cinética cuando se desplaza exclusivamente bajo la acción de fuerzas conservativas.	F
13	La energía potencial gravitatoria se calcula siempre como $m \cdot g \cdot h$.	F
14	Las fuerzas no conservativas siempre producen una disminución de la energía mecánica del cuerpo.	F
15	Si la velocidad de un cuerpo es constante, el trabajo mecánico de cada fuerza sobre el cuerpo es cero.	F
16	El trabajo de una fuerza puede ser negativo.	V
17	El trabajo de las fuerzas no conservativas es igual a la variación de la energía cinética de un cuerpo.	F
18	La energía se mide en watt.	F
19	La potencia es menor cuanto mayor es el tiempo empleado en transformar una cantidad de energía.	V
20	La energía cinética en la máxima altura de un tiro oblicuo es cero.	F

En torno de la esencia está la morada de la ciencia.

Platón

CONTENIDOS

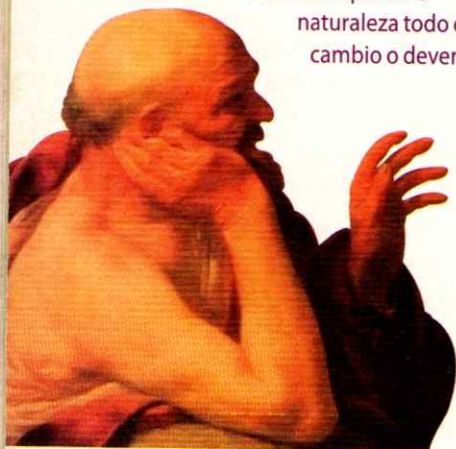
- Concepto de energía
- Transferencia de energía
- Transformaciones de la energía
- Fuentes de energía

7

LAS TRANSFORMACIONES DE LA ENERGÍA

■ **Heráclito de Éfeso.** Poco se sabe de su vida. Nació hacia 544 a. C. aproximadamente, y vivió en Éfeso, ciudad enclavada en la costa Jonia, al norte de Mileto, hasta su muerte, en 484 a. C.

Afirmaba que en la naturaleza todo es cambio o devenir.



La energía permite desempeñar diversas funciones y múltiples actividades: trabajar, caminar, correr, cocinar, comer, lavar la ropa, poner en funcionamiento los electrodomésticos, usar autos, celulares, calculadoras, computadoras, televisores, radios, etc. Todo esto puede lograrse a través de recursos o fuentes que aportan energía.

Algunos de los recursos naturales que aportan energía son: el Sol, el agua, el aire, el suelo, el petróleo, el gas o el carbón. Existen también otras formas alternativas de generar energía que se analizarán a lo largo de este capítulo. Pero es necesario diferenciar el concepto científico del término energía del uso habitual de esta palabra en el lenguaje cotidiano.

Es importante, además, reflexionar sobre las inquietudes planteadas acerca del uso adecuado de los recursos o fuentes de energía, y sobre la necesidad de tomar conciencia de la crisis energética que es actualmente motivo de grandes controversias y enfrentamientos en todo el mundo.

Afrontar el desafío que significa lograr un equilibrio entre el crecimiento demográfico y económico de las sociedades de consumo, y el suministro seguro y racional de los recursos energéticos es un reto que atañe a todos los ciudadanos.

Este problema implica una urgente toma de decisiones y el diseño de estrategias de resolución a corto, mediano y largo plazo, que aseguren el futuro energético de las sociedades actuales.



Central hidroeléctrica Yaciretá.

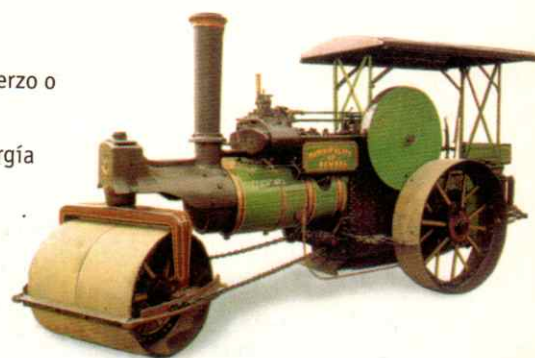
El concepto de energía

En general, la palabra energía se asocia con fuerza, vitalidad, temperamento, esfuerzo o cansancio, pues adopta distintos significados según el uso.

Como se ha visto en el capítulo anterior, en el ámbito científico el concepto energía tiene un significado preciso.

Una primera aproximación al lenguaje científico permite asegurar que la **energía** se asocia a cambios en la naturaleza; por ejemplo, la manifestación de un huracán, los movimientos sísmicos o el desarrollo de las funciones de los seres vivos. Pero también se habla de energía cuando se hacen funcionar máquinas, se pone en marcha el motor de un auto, se enciende un celular o se apaga un televisor con un control remoto.

La energía permite que en un cuerpo o en un conjunto de cuerpos natural o artificial se produzca algún tipo de cambio o transformación.



Aplanadora de vapor inventada por el francés Louis Lemoine en 1859 y utilizada para mantener lisas las rutas.

El concepto de energía ha adquirido diversas acepciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, la idea clave de energía como cierta constancia en medio del cambio se mantuvo con firmeza desde la Antigüedad. Las primeras manifestaciones de este término se encuentran en filósofos presocráticos. Heráclito de Éfeso (siglo VI a. C.) sostenía que a pesar de que todo es cambio, hay algo invariable en el universo considerado como un todo: alguna esencia etérea que puede ser transformada sin que se produzca una pérdida neta.

La palabra energía aparece por primera vez en los escritos de Aristóteles y tiene el significado de un *estado de potencialidades*, que guarda cierta relación con los cambios y transformaciones.

Un **sistema** es un recorte de la realidad o de un fenómeno y está formado por componentes que definen su estructura especial, mantienen una organización interna y permiten su funcionamiento.

Los sistemas

El científico que investigue una cierta realidad, hecho o fenómeno debe hacer un recorte de ese hecho para delimitar su contexto de estudio. Esto constituye un **sistema**, y está formado por componentes que definen una estructura especial, mantienen una organización interna y permiten su dinámica o funcionamiento.

El Sistema Solar, por ejemplo, está formado por el Sol, los planetas, la Luna, y otros componentes: polvo cósmico, asteroides, etc., cuya estructura y funcionamiento permiten explicar fenómenos astronómicos como el día y la noche, las estaciones, los eclipses, las fases de la Luna, entre otros.

Cuando se analiza un sistema es necesario relacionarlo con su contexto o medio, estudiando las interacciones que se producen, como las entradas y salidas de materia, información y energía de dicho sistema.

La energía es una característica asociada al estado de un sistema. Para describir de la forma más completa posible un cuerpo o un conjunto de cuerpos hay que conocer una cierta cantidad de valores, como sus tamaños, masas, posiciones, temperaturas, composición química, etc. Estos valores indican el estado de ese sistema y cuando uno o varios de ellos varían, se producen cambios en el sistema. Si el sistema cambia de estado, entonces ha cambiado su energía. Así, si se toma como sistema un litro de agua a 70 °C y se lo enfría a 20 °C, su energía habrá disminuido.

La siguiente clasificación permite diferenciar algunos sistemas.

Sistemas abiertos

Son los sistemas en los que se producen ingresos y egresos de materia y energía, producto de su interacción con el medio. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema abierto, ya que incorpora energía a través de los alimentos, procesa o transforma la energía aportada por ellos y la intercambia con el medio exterior mediante el trabajo, el calor y la radiación.

Sistemas cerrados

Son los sistemas en los que se producen ingresos y egresos de energía aunque no de materia. Por ejemplo, una lata de tomates es un sistema cerrado dado que no hay intercambios de materia con el medio pero sí de energía, como cuando absorbe calor del medio exterior al salir de la heladera y aumentar su temperatura.

Sistemas aislados

Son los sistemas en los que no se producen interacciones con el medio, no ingresa ni egresa materia o energía. Por ejemplo, un termo cerrado se puede aproximar a un sistema aislado durante algún tiempo porque no intercambia materia y minimiza las transferencias de energía con el medio.

1. El cuerpo humano intercambia con el medio materia y energía de muchas formas: alimentación, respiración, movimiento, transferencia de calor, etc.

2. Al colocar la lata en la heladera puede ceder energía para enfriarse pero no intercambia materia.

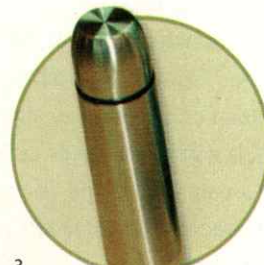
3. Los termos mantienen durante algún tiempo la temperatura constante en su interior. En ese lapso se puede considerar que no han intercambiado materia ni energía con el medio.



1.



2.



3.

Transferencia de energía

¿De dónde viene y adónde va la energía?

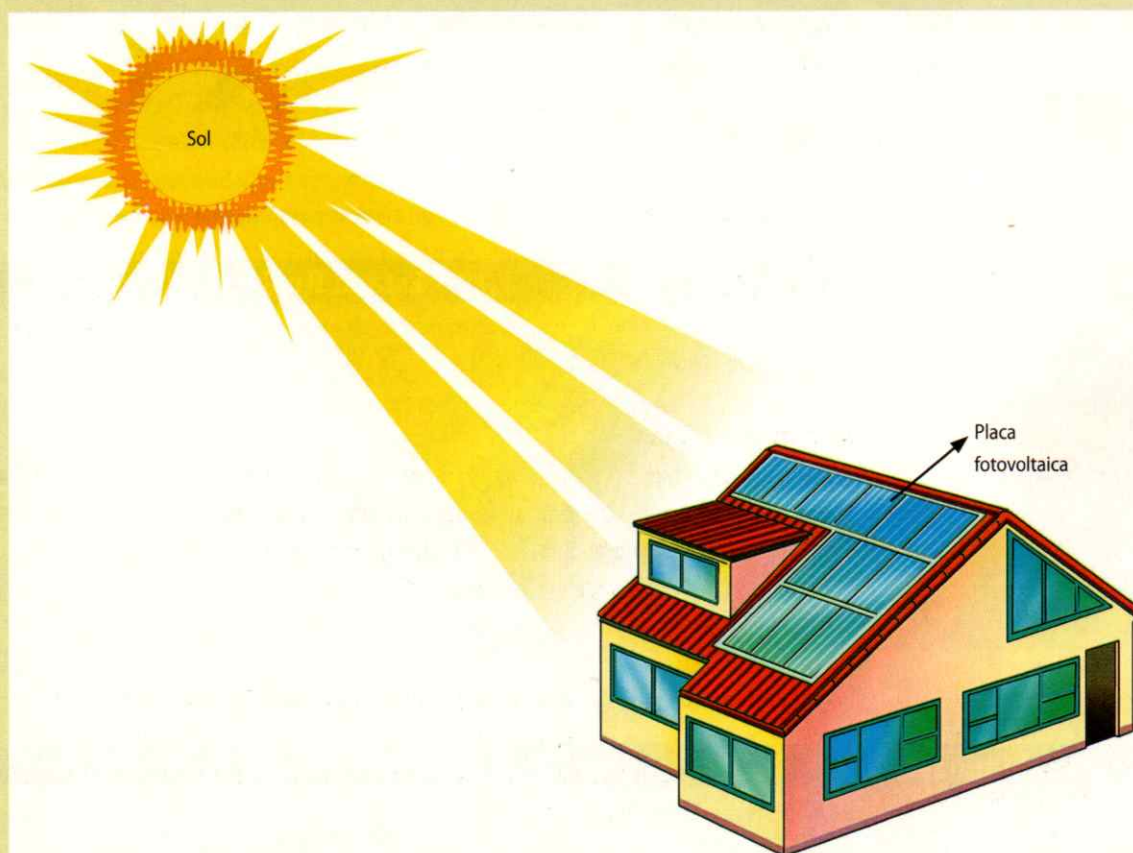
Una de las propiedades fundamentales de la energía es su posibilidad de transmitirse de un sistema a otro o aun entre partes del mismo sistema.

El análisis de la **transferencia de energía** entre muchos cuerpos puede ser muy complejo, pero en algunos casos resulta posible distinguir un sistema que cede energía y otro que la recibe.

En esos casos, como la energía de ambos cuerpos varía, se produce un cambio en estos sistemas, hecho que pone en evidencia dicha transferencia.

Por ejemplo, en el caso de un reloj a cuerda, el sistema que cede energía es la cuerda del reloj, el sistema receptor de la energía son las manecillas del reloj. La transferencia de energía se evidencia en que las manecillas del reloj giran y el reloj se pone en funcionamiento.

Otro ejemplo de esto puede ser la cadena de transferencias de energía desde el Sol hasta una casa con placas fotovoltaicas.



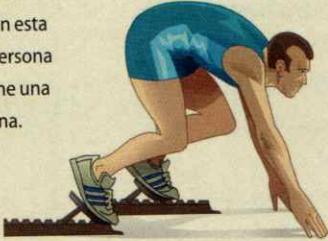
El Sol incide sobre una placa fotovoltaica que transforma la energía radiante en energía eléctrica. Se acumula energía en una batería. A su vez, ésta transfiere energía a un regulador, que mantiene las condiciones necesarias para distribuir la corriente eléctrica a la red domiciliaria.

Las propiedades de la energía

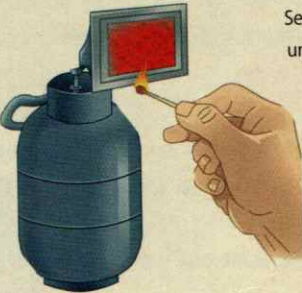
Transformación

Como ya se analizó anteriormente, una de las propiedades de la energía es la capacidad de pasar de una forma a otra. Para identificar cuáles son estas transformaciones en un cuerpo o sistema, es necesario describir la situación energética inicial y la final, luego de los cambios que se evidencian en dichos cuerpos. Veamos ejemplos:

- Un atleta a punto de largar en una carrera de 100 metros llanos.

Estado inicial	Estado final
El deportista está en posición de largada para una carrera de 100 metros llanos. En esta situación inicial la persona está en reposo y tiene una cierta energía interna. 	El atleta corre y trata de alcanzar la llegada. Cuando la persona se mueve, la energía interna de su cuerpo se transforma en energía cinética. Intercambia además energía con el aire que la rodea y con el piso de la pista de carrera sobre la que corre. Esto produce también un aumento de la energía interna del aire y del suelo. La disminución de la energía interna del atleta es equivalente al aumento de su energía cinética más el aumento de las energías internas del aire y del piso. 

- Una estufa de gas que se enciende por un tiempo para calentar una habitación.

Estado inicial	Estado final
 La estufa está apagada y conectada a una garrafa llena de gas. En esta situación inicial tiene asociada una propia energía interna. El gas que contiene es la fuente que aporta energía.	 Se enciende la estufa y se la deja en funcionamiento durante un tiempo. Por la combustión, la energía interna del gas disminuye, pero esta transformación provoca un aumento de la energía interna del aire que rodea la estufa, de los gases que desprende y de la misma estufa, ya que los materiales que la componen aumentan su temperatura.

- Una pila se conecta a una lamparita de una linterna para hacerla funcionar.

Estado inicial	Estado final
 La pila es una fuente de energía, por lo tanto y debido a su composición química, tiene asociada una cierta energía interna.	 Cuando se la conecta a una lamparita y se cierra el circuito, la energía química de la pila se transforma en energía eléctrica. Disminuye la energía interna de la pila pero aumenta la energía interna de la lámpara. Esto posibilita emitir energía en forma de luz.

En todos los ejemplos analizados se pueden observar las transformaciones de la energía entre los estados inicial y final, tanto en el sistema estudiado como en el medio que interactúa con él.

La energía de un sistema puede transformarse y manifestarse de muchas maneras.

Transformaciones energéticas en los seres vivos

En los seres vivos se producen diversas transformaciones de energía necesarias para las funciones esenciales.

El conjunto de todas las transformaciones energéticas que tienen lugar en el interior de un organismo vivo se denomina **metabolismo**. Es un proceso que permite el mantenimiento, crecimiento y reproducción del organismo.

Los alimentos aportan la energía necesaria para el correcto funcionamiento del metabolismo de todo ser vivo.

Las necesidades energéticas de una persona dependen de sus características físicas, edad, sexo, actividad desarrollada, etc.

Aunque la unidad de energía en el SI es el joule, para algunas aplicaciones, como las transformaciones energéticas en los seres vivos, se utilizan otras unidades como la kilocaloría. La kilocaloría equivale a 4186 joule y se puede tener una idea de su valor a través de su antigua definición referida a la cantidad de energía que debe intercambiar 1 kilogramo de agua para variar su temperatura en un grado Celsius.

Es muy difícil hacer un cálculo exacto, sin embargo la Organización Mundial de la Salud ha estimado que las necesidades energéticas diarias de una persona en edad escolar son de 50 Kcal por kg de peso. Es decir que un niño o joven de 50 kg necesita una cantidad de energía de aproximadamente 2500 Kcal diarias para una adecuada alimentación.

Conservación y degradación de la energía

La **conservación** es una de las propiedades fundamentales de la energía, ya que cuando dos sistemas intercambian energía, la energía cedida por uno de ellos es igual a la que gana el otro.

El análisis de las transformaciones energéticas se expresa en una de las leyes más importantes de la Física, la **Ley de Conservación de la Energía**:

Según la organización Mundial de la Salud, las necesidades energéticas básicas para una persona en edad escolar son de 50 kcal por kg de peso.

La ley de Conservación de la Energía dice que la energía se transforma sin que cambie su cantidad total.

La energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma de una manifestación en otra, aunque la cantidad total no cambia.

Esta ley se cumple para sistemas aislados, es decir que, en un sistema aislado la cantidad de energía que se tiene al principio (situación inicial del sistema) es igual a la que se tiene al final (situación final del sistema).

Si el sistema no es aislado, habrá intercambios de energía con el medio y, por lo tanto, variaciones al recibir o ceder energía.

Desaceleración



Los frenos convierten la energía cinética en calor y sonido.

auto con el aire y de las ruedas con el suelo. Al final del trayecto, es necesario detener el vehículo por medio de un sistema de frenos, que acciona el rozamiento de unos discos sobre las ruedas.

Es decir que la energía inicial del automóvil es igual a la suma de los aumentos producidos en la energía interna del aire, en el piso y en las demás partes del auto que se calentaron, pero ya no es tan útil para ser usada. Por ejemplo, sería complicado y de muy bajo rendimiento tratar de hacer funcionar otro motor con la energía que pasó del auto al piso por frotamiento. Esto no significa que la energía inicial se haya perdido, sino que se ha transformado en otras menos útiles.



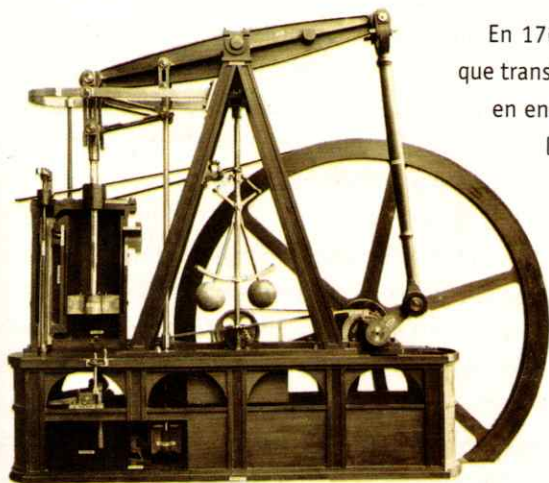
Como se analizará en el capítulo 9, este proceso de degradación de la energía se produce en toda transformación, aun eliminando aspectos como el frotamiento señalado en el ejemplo anterior.

Las máquinas y la energía

Las máquinas han posibilitado al hombre la utilización del viento, el agua y otros recursos naturales como fuentes para obtener energía.

Las primeras referencias de la sustitución de la fuerza humana o animal se encuentran en las **ruedas hidráulicas**, que aprovecharon la energía del agua y que fueron utilizadas unos 100 años a.C. para moler cereales.

Los **molinos de viento** se extendieron en Europa principalmente en los tiempos de las Cruzadas (entre 1096 y 1444)*, aunque fueran conocidos ya en la Antigüedad. Se atribuye su existencia a maquinarias muy rudimentarias para moler el trigo, halladas en Persia en el siglo VII.



La máquina de vapor de Watt.

En 1769, *Watt* creó la **máquina de vapor** que transformaba la energía del vapor de agua en energía mecánica. Inicialmente se utilizó para bombeo, y recién en el 1800 se aplicó para impulsar medios de transporte. En 1807 se construyó el primer buque de vapor y en 1825 la primera locomotora de vapor. Estas máquinas se extendieron rápidamente a la industria. A principios del siglo XX un 95% de la energía utilizada por el hombre provenía del uso del carbón.

Los **motores eléctricos** tienen sus antecedentes a mediados del 1800 con la construcción de los electroimanes, que son sistemas compuestos por materiales conductores de la corriente eléctrica enrollados sobre un núcleo de hierro.

Este enrollamiento conductor se denomina **bobina**. Una corriente eléctrica hace que la bobina se convierta en un imán capaz de atraer o mover objetos ferromagnéticos como los discos de hierro.

Los motores eléctricos son sistemas que transforman la energía eléctrica en energía cinética. Hacia fines del siglo XIX, los primeros generadores de corriente alterna permitieron comenzar a armar las redes de distribución de corriente eléctrica.

En la actualidad, la energía cinética del viento se aprovecha para la producción de energía eléctrica mediante el uso de los **aerogeneradores**, cuyas potencias normales van desde los 500 hasta los 1500 kw, aunque hay proyectos de aumentar la potencia de estas máquinas.



Los aerogeneradores.

En la Argentina, la región Patagónica constituye uno de los territorios con mayores recursos eólicos potenciales del mundo, según estimaciones del Centro Regional de Energía Eólica del Chubut, CREE. Hasta el momento, la potencia eólica total instalada en la Argentina es de alrededor de 26 560 kw, que representa un 1% del total de la producción de energía eléctrica generada por otras fuentes.



Molinos de viento.

En todas las máquinas térmicas, el sistema absorbe energía de una o varias fuentes a alta temperatura. Parte de esa energía se transforma en trabajo, y el resto se cede al medio que se encuentra a menor temperatura. Este hecho constituye una regla general de toda máquina térmica y da lugar a la definición de un parámetro característico de cada máquina, que se denomina **eficiencia o rendimiento**.

La **eficiencia** se define como el cociente entre la energía útil producida y la energía total absorbida. Su expresión en porcentaje es:

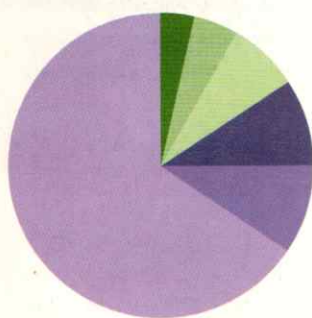
$$E (\%) = 100 \cdot \frac{\text{energía útil producida}}{\text{energía total}}$$

Ninguna máquina térmica alcanza un rendimiento del cien por ciento.

► ¿Dónde está el petróleo?

Medio Oriente sigue siendo el centro de atención en relación al petróleo, especialmente cuando se habla de reservas. La magnitud de los yacimientos petrolíferos de Arabia Saudita e Irak hace que los del resto del mundo parezcan pequeños. El Mar de Norte y Canadá aún tienen importantes reservas pero, en estas zonas, es mucho más cara la extracción.

Reservas probadas 2002*



- Asia-Pacífico 3,7%
- Norteamérica 4,8%
- África 7,4%
- Europa y Eurasia 9,3%
- Centro y Sudamérica 9,4%
- Medio Oriente 65,4%

*Reservas probadas son aquellas que la industria considera que pueden ser recuperadas en las condiciones económicas y operativas existentes.

FUENTE: BP

Fuentes de energía

El hombre ha utilizado los recursos naturales de la Tierra como fuentes de energía desde el comienzo de su existencia. Así, la madera, el viento, el agua, el Sol y los **combustibles fósiles** como el carbón, el petróleo o el gas natural continúan siendo las principales fuentes de energía que permiten el desarrollo y crecimiento tecnológico de toda sociedad industrializada.

Las fuentes de energía se suelen clasificar, en general, como **renovables** y **no renovables**, ya que algunos de estos recursos son temporales y se agotan con el correr del tiempo. La renovabilidad de un recurso surge de comparar el tiempo que tarda en reproducirse o generarse, con el ritmo con el que se lo utiliza.

Los combustibles fósiles se consideran fuentes no renovables, ya que los ritmos de su utilización son muy superiores a los ritmos de formación de estos combustibles.

Si se tiene en cuenta que casi el 90% de la energía comercial empleada en el mundo es de origen fósil, y que las reservas de estos combustibles (que tardaron millones de años en formarse) tienden a agotarse, se puede afirmar que uno de los principales retos del siglo XXI es, sin duda, la utilización de nuevas fuentes de energía, múltiples y renovables para contrarrestar la creciente escasez de los tradicionales recursos energéticos.

Además, las fuentes no renovables están concentradas en pocos lugares del mundo y en manos de unas pocas naciones. Esto genera tensiones y conflictos permanentes entre los organismos gubernamentales y las instituciones involucradas en el tema.

Hasta el momento no alcanzan las producciones de energía generadas a partir de las fuentes no renovables. Solo ha habido intentos de abastecimientos locales y de algunas sociedades o poblaciones pero, *¿cuáles de estos recursos tendrán mayores posibilidades de subsistir en esta crisis energética desatada y declarada en el siglo XX? ¿Podrán ofrecer soluciones a nivel masivo? ¿Cuáles son las expectativas de soluciones posibles para el siglo XXI?*

Estos interrogantes quedan abiertos y son de discusión actual en el ámbito de la ciencia. Los organismos gubernamentales, dirigentes políticos, asociaciones ambientalistas, ecologistas, etc., también debaten hoy sobre el futuro energético mundial.



Pozo petrolero de Total Austral en plataforma submarina, Tierra del Fuego.



Mina de carbón en Río Turbio, Santa Cruz.



Destilería de YPF en Lujan de Cuyo, Mendoza.

Formas alternativas de energía

Ante el agotamiento de los recursos energéticos fósiles como el petróleo, el gas y el carbón, los científicos se plantean otras maneras de aprovechar y generar energía a gran escala. Algunas de estas formas alternativas son las que siguen.

Energía nuclear

El núcleo atómico almacena una gran cantidad de energía si se tiene en cuenta su pequeña masa. Esta energía está relacionada con las fuerzas que mantienen unidos los neutrones y los protones. La tecnología nuclear utiliza esta energía en tratamientos contra el cáncer, en la esterilización de instrumentos de uso medicinal, en el estudio de los suelos, en la conservación de alimentos y en la producción de energía eléctrica, entre otros.

En la actualidad, algunos países como Francia priorizan esta nueva alternativa: aproximadamente un 75% de la energía eléctrica que produce ese país es de origen nuclear.

¿Es la energía nuclear la posible solución a la crisis energética de las sociedades industrializadas?

En general hay dos posturas bien diferenciadas sobre esta problemática. Sus defensores afirman que es mucho más económica y su precio más estable comparado con la energía que procede de los combustibles fósiles. Además, su uso evita la emisión de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases tóxicos que contaminan la naturaleza.

Por otro lado, sus opositores alertan sobre el peligro de los escapes radiactivos de las centrales nucleares (como el accidente de Chernobyl ocurrido en 1986), y los problemas del almacenamiento y tratamiento de los residuos nucleares.

Las centrales nucleares

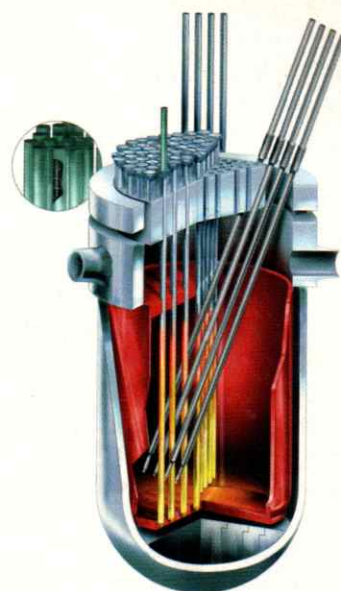
Las centrales nucleares son instalaciones que usan como fuente de energía o combustible el uranio, en lugar de los combustibles fósiles como las centrales termoeléctricas. El uranio es un elemento de elevada masa atómica que cuando es bombardeado por algunas partículas, como los neutrones, se fisiona, es decir, se separa en fragmentos. Se produce, así, la ruptura del núcleo que emite, a su vez, otros neutrones y produce grandes cantidades de energía.

La emisión de neutrones puede provocar, en determinadas condiciones, nuevas fisiones de otros núcleos. Este proceso se conoce como **reacción nuclear en cadena**.

En los reactores nucleares se logran estas fisiones en forma controlada, a partir de un conjunto de dispositivos preparados para producirlas. En estas reacciones se liberan grandes cantidades de energía. Para este fin algunos reactores utilizan uranio natural que contiene un 0,7% de uranio 235 y un 99,3% de uranio 238. También existen reactores que utilizan el uranio enriquecido (artificial) y llegan a obtener un 3% de uranio 235 y un 97% de uranio 238.

Los principales componentes de un reactor nuclear son:

- un **núcleo** compuesto básicamente por el combustible, el moderador y el refrigerante,
- un **sistema de control y seguridad** para regular la cantidad de energía que se produce;
- un **contenedor hermético**, dentro del cual se encuentra el material nuclear, que tiene un blindaje para la protección de los trabajadores;
- un **sistema de extracción de energía o de enfriamiento** para transportar o liberar la energía producida.



Reactor nuclear.



Los elementos químicos se caracterizan por su número atómico que en el caso del uranio es 92, es decir que su núcleo tiene 92 protones.

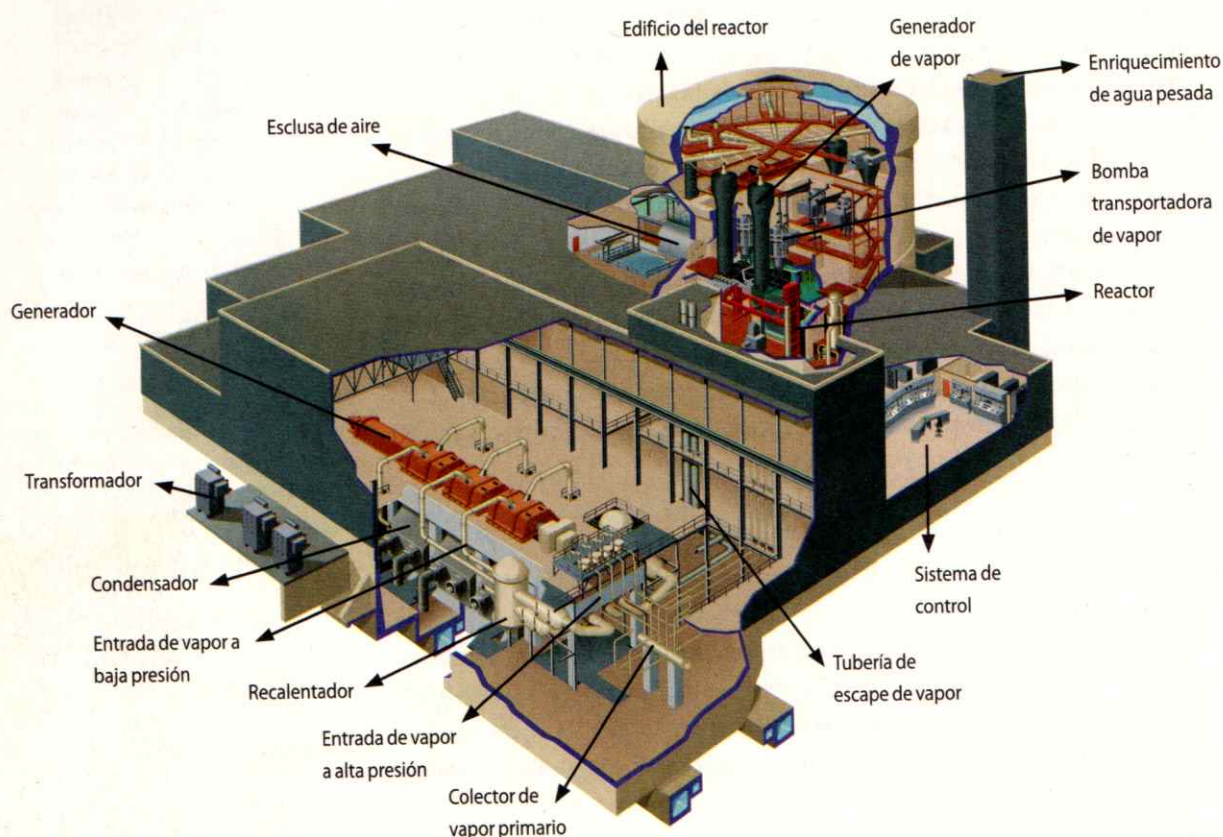
Cuando dos o más núcleos tienen igual número de protones pero difieren en el número de neutrones, se los denomina **isótopos** y sus masas atómicas son distintas.

Central atómica Atucha I.



Para que se produzca la reacción nuclear, el uranio se coloca en el núcleo de un reactor. El moderador es un material que produce una desaceleración de los neutrones provenientes de las fisiones a velocidades convenientes para la prosecución del proceso. En muchos casos, el material moderador actúa como refrigerante. También se colocan en el núcleo barras de control para absorber cantidades convenientes de neutrones y, si fuera preciso, cortar la reacción.

Las centrales nucleares de la Argentina –Atucha I, Embalse de Río III y Atucha II (en proceso de construcción)– utilizan como moderador agua pesada (D_2O) en la que el isótopo 1 de hidrógeno es reemplazado por el 2 (deuterio).



Una planta nuclear de 1000 mwh no emite virtualmente CO_2 y produce aproximadamente 35 toneladas por año de residuos de alta actividad en forma de elementos combustibles quemados. Si este combustible usado se reprocesara, el volumen sería de aproximadamente $2,5 m^3$ por año. Esta cantidad puede ser gestionada y almacenada de manera segura en depósitos geológicos profundos, protegidos por múltiples barreras que los aíslan completamente del medio ambiente. El ciclo completo de combustible para esta planta (incluyendo desde la minería hasta la operación final) generaría, además, $200 m^3$ de residuos de actividad intermedia y $500 m^3$ de residuos de baja actividad.

En comparación, una planta de 1000 mwh alimentada a carbón, con equipos optimizados de limpieza, emite por año aproximadamente 6 500 000 toneladas de CO_2 , 5000 toneladas de SO_2 , 4000 toneladas de NO_2 y 400 toneladas de metales pesados (incluyendo elementos tan venenosos como cadmio, plomo, arsénico y mercurio). Además se producirán aproximadamente 500 000 toneladas de residuos sólidos de la remoción de SO_2 que deberán ser reciclados o almacenados en piletas de desperdicios. (Fuente: CNEA, Comisión Nacional de Energía Atómica.)

La energía solar

La vida cotidiana de todas las civilizaciones del planeta está ligada a diversas fuentes de energía. Por tanto, la energía eléctrica se torna imprescindible para el funcionamiento de maquinarias con las cuales el hombre toma contacto a diario, por ejemplo, para la iluminación de los hogares y las ciudades. Del mismo modo, el gas natural, el carbón o el vapor de agua, permiten ambientar viviendas y poner en funcionamiento grandes centrales eléctricas térmicas. La energía que se utiliza a diario proviene principalmente del agua, el petróleo, el gas natural, el carbón y la leña.

En realidad, prácticamente toda la energía que se usa es de origen solar, es decir, es energía que comenzó siendo energía nuclear. La **energía solar** ingresa en el ecosistema mediante el proceso de fotosíntesis que realizan las plantas, y a través de la cadena alimentaria llega a todos los seres vivos. Los restos de plantas y microorganismos que fueron fosilizados durante el transcurso de miles de años, constituyen actualmente reservas de carbón, petróleo o gas, y proporcionan un tipo de energía que puede ser aprovechada como combustible. También la energía que viene del Sol origina los movimientos de aire que pueden producir energía eólica.

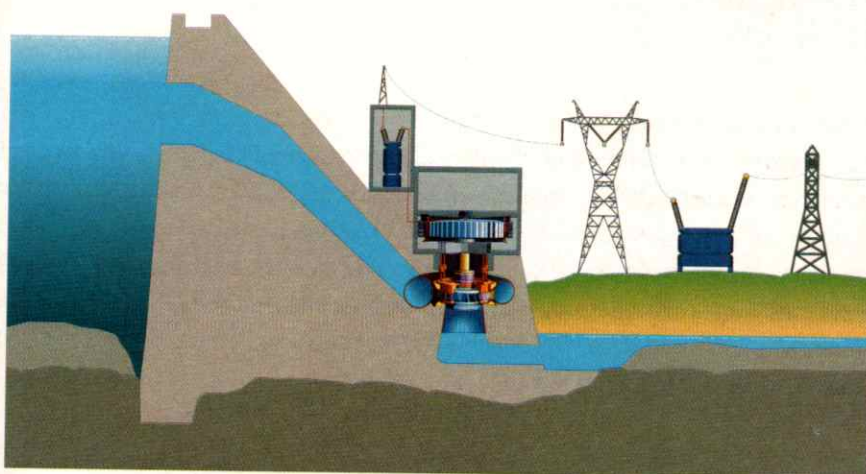
Otro importante proceso debido a la energía solar es el ciclo del agua. Esta energía produce la evaporación del agua en grandes superficies, la eleva y produce luego las precipitaciones. Cuando el agua se sitúa a cierta altura, es posible aprovechar su energía potencial de diversas maneras y eso es lo que hacen las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas

La finalidad de una central hidroeléctrica es aprovechar la energía potencial del agua retenida, por ejemplo, en un embalse. Si se provoca un salto en el curso de agua es posible transformar la energía potencial del agua (situación inicial del sistema) en energía eléctrica (situación final del sistema).

Cuando el agua fluye a través de las tuberías que llegan hasta las turbinas, las hace girar. Aquí la energía potencial se convierte en cinética. La energía que pone en funcionamiento las turbinas se transmite a un alternador que genera electricidad.

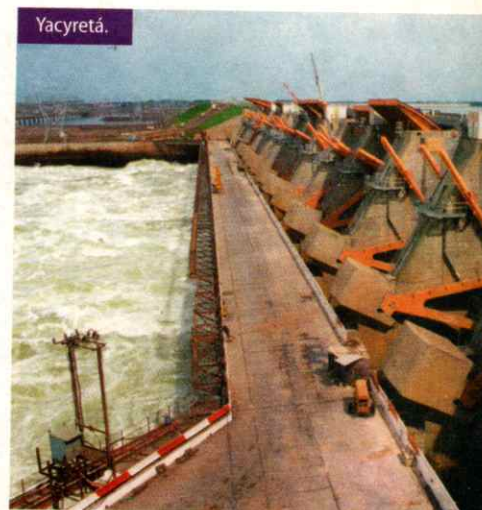
Por medio de transformadores, sistemas que elevan la tensión a miles de voltios, se



transmite la corriente eléctrica por líneas aéreas de alta tensión hasta los centros de consumo. Nuevamente, por medio de transformadores se disminuye la tensión (media y/o baja según su uso) y se distribuye a través de líneas aéreas o subterráneas.

Complejo hidroeléctrico Salto Grande

Salto Grande es el primer aprovechamiento hidráulico de uso múltiple en América latina. Fue construido por la República Oriental del Uruguay y la República Argentina. Su influencia directa e indirecta alcanza una región que suma, entre los dos países, 19 000 000 de habitantes, en un área de 128 000 km² de suelos muy permeables, ricos en materia orgánica y nutrientes, por lo que resulta apta para la ganadería, la agricultura y la forestación. En esa extensa planicie se realiza casi el 80% de las actividades industriales y agropecuarias de la Argentina y el 100% de las del Uruguay.



Complejo hidroeléctrico Yacyretá

La presa está situada a unos 2 km aguas abajo de los rápidos de Apipé; 70 km al oeste de Posadas (R. Argentina) y Encarnación (Paraguay); 300 km al sudeste de Asunción y 1000 km al norte de Buenos Aires. Es un aprovechamiento binacional compartido entre la República del Paraguay y la República Argentina. La potencia efectiva a la que operan los grupos generadores es de 3000 Mw.

Según datos aportados por la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) en la actualidad, a nivel mundial, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas contribuyen con un 63% de la producción eléctrica; la hidroeléctrica representa alrededor del 19%, la nuclear; 17%, la geotérmica 0,3%, mientras que la solar, eólica y biomasa suman menos del 1%.

Existen otras formas alternativas de energía no convencionales, aún no muy utilizadas, y que significan una alternativa a los sistemas energéticos usuales, frente a la demanda de una población en crecimiento.

Energía eólica

La energía eólica es la que se obtiene del viento, recurso natural que el hombre siempre utilizó. Los primeros molinos de viento europeos aparecieron en el siglo XIII y se empleaban para moler granos y bombear agua.

Sin embargo, el aprovechamiento del viento para la generación a gran escala de energía eléctrica tiene un desarrollo relativamente reciente. Hacia fines del siglo XIX se construyeron las primeras turbinas eólicas para la producción eléctrica: los aerogeneradores.

Esta energía es limpia e inagotable, pero la irregularidad del viento perjudica su sistema de almacenaje.

Energía fotovoltaica

El Sol emite energía radiante como resultado de reacciones nucleares de fusión. Cuatro átomos de hidrógeno se fusionan para formar un átomo de helio. Esta energía llega a la Tierra a través de las ondas electromagnéticas y puede ser capturada por paneles solares o placas fotovoltaicas que permiten la producción de energía eléctrica.

Energía geotérmica

La energía del interior de la Tierra se manifiesta en algunas zonas volcánicas o en contacto con capas rocosas y porosas, que permiten la afluencia de agua caliente o vapor de agua a altas temperaturas.

La energía geotérmica es una fuente de energía renovable ligada a volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas geológicamente recientes, es decir, con actividad en los últimos diez o veinte mil años en la corteza terrestre.

Los países que actualmente están produciendo más electricidad de las reservas geotérmicas son los Estados Unidos, Nueva Zelanda, Italia, México, Filipina, Indonesia y Japón.

Energía mareomotriz

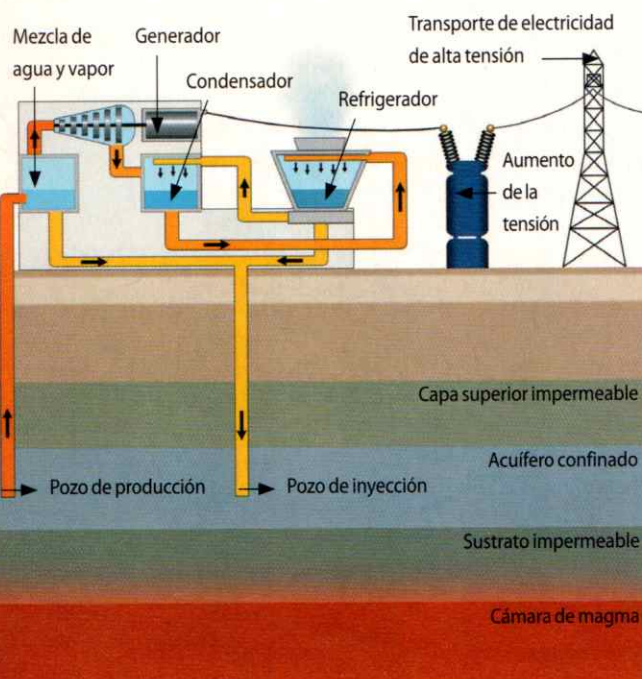
El mar es una enorme reserva energética. La energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso de las mareas (flujo y reflujo) se aprovecha para producir energía eléctrica.

Francia y Rusia tienen experiencia práctica en centrales eléctricas accionadas por mareas. La energía mareomotriz podría aportar unos 635 000 gigawatt · hora (gw · h) anuales, equivalentes a aproximadamente 1 045 000 000 de barriles de petróleo o 392 000 000 toneladas de carbón por año.

Biogás

El gas biológico o biogás se forma cuando las bacterias liberan energía al actuar sobre desechos orgánicos. Esta acción produce un gas llamado metano que se acumula en tanques denominados digresores y puede ser utilizado como combustible.

Este gas se utiliza frecuentemente en países de Oriente, pero en Occidente, su uso es escaso.



Energía geotérmica.

Una cuestión de impacto ambiental

Es importante señalar que con estas alternativas energéticas se busca reducir el grave impacto sobre el ambiente y el desequilibrio ecológico que se produce debido a los altos niveles de contaminación, principalmente por la combustión de los recursos fósiles.

Cada año, se liberan en el ambiente millones de toneladas de dióxido de carbono (CO_2), gases contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y metales pesados como el cadmio, el plomo, el arsénico y el mercurio.

Las consecuencias ambientales y los cambios en la naturaleza son muchos, y en la actualidad todas las personas son responsables y a la vez víctimas de la falta de límites en las acciones del hombre sobre el ambiente.

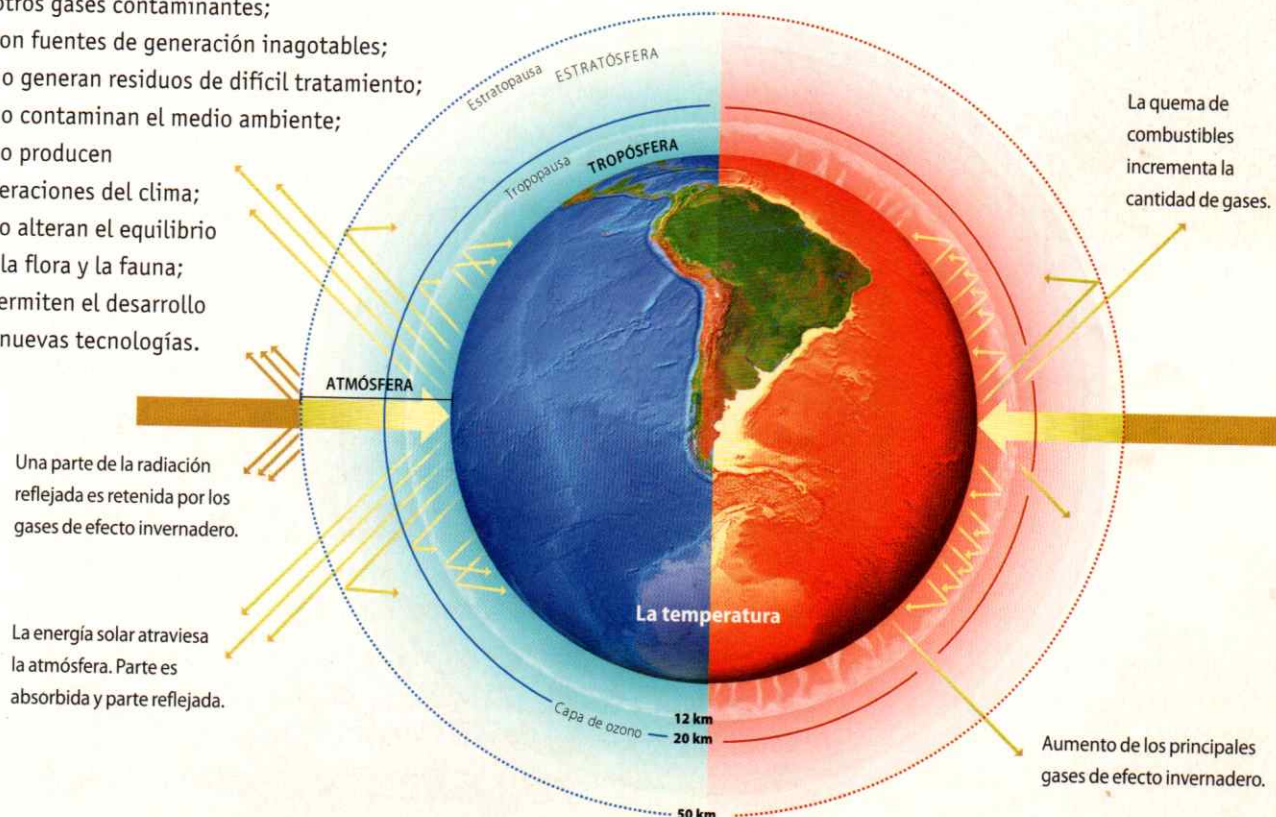
Algunos factores negativos que influyen sobre la naturaleza son:

- las distintas formas de contaminación del agua y el suelo;
- la contaminación del aire que provoca diversos efectos sobre los seres vivos;
- la lluvia ácida que se forma en las nubes por la reacción del agua con contaminantes provenientes de los combustibles fósiles, como óxidos de azufre y nitrógeno, y origina ácidos sulfúrico y nítrico que al precipitar afectan las construcciones y los seres vivos;
- el efecto invernadero y el calentamiento global por aumento de las temperaturas promedio del planeta, que producen innumerables cambios en el entorno natural. El efecto neto de estos incrementos podría provocar un aumento promedio de la temperatura global del planeta, estimado entre 2 y 6 °C en los próximos 100 años.

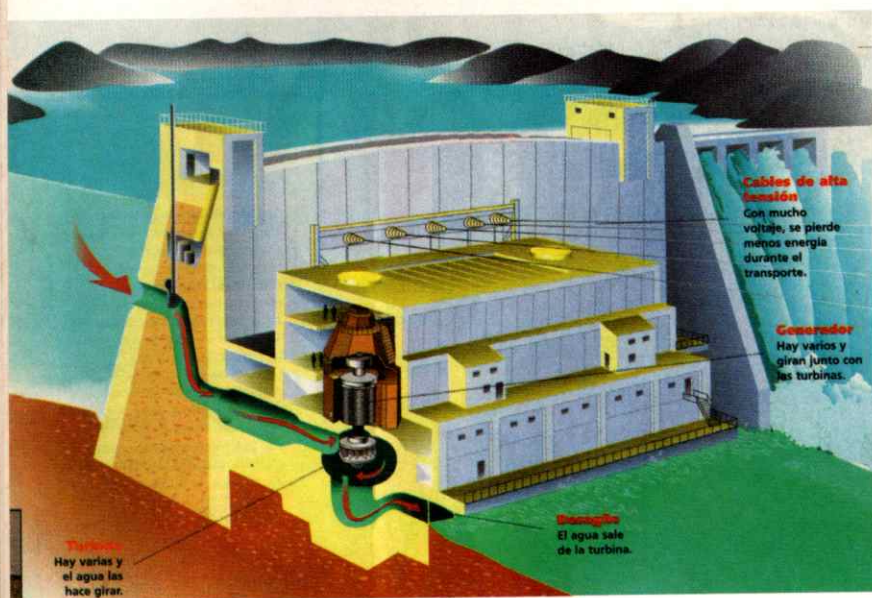
Frente a esta situación, las energías no convencionales como la eólica, solar, mareomotriz, geotérmica y la proveniente del biogás presentan algunas ventajas con respecto a las energías tradicionales. Algunas de estas ventajas son:

- no producen emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes;
- son fuentes de generación inagotables;
- no generan residuos de difícil tratamiento;
- no contaminan el medio ambiente;
- no producen alteraciones del clima;
- no alteran el equilibrio de la flora y la fauna;
- permiten el desarrollo de nuevas tecnologías.

El calentamiento global.



Uso racional de la energía: un problema de actual debate mundial



Central hidroeléctrica.

La producción de energía es uno de los aspectos decisivos para el desarrollo y crecimiento de toda sociedad, especialmente de las sociedades industrializadas. Los debates sobre su producción y uso racional se han convertido en una problemática mundial pendiente de una pronta resolución, dado que se podría generar una lucha por la subsistencia.

El excesivo uso de la fuentes energéticas y los modos de utilizarla, no siempre equitativos, generan preocupación permanente y es por esto que se habla de la **crisis energética**. Es un problema mundial que requiere de estrategias de resolución en manos de distintos organismos oficiales, políticos, científicos, asociaciones ambientalistas y de todos los ciudadanos. Esta inquietud genera diversas hipótesis, algunas controvertidas, otras más pesimistas que optimistas, pero todas forman parte de este debate actual.

En nuestro país, algunas de las opciones se dirigen a la búsqueda de mayores recursos en el área de hidrocarburos y a su posible sustitución en algunos usos. En ese sentido se orientan dos leyes recientes:

■ *El Congreso, esta semana, se abocará a los temas energéticos: apurará la ley de promoción de la exploración petrolera y aprobará la norma que promueve el uso del hidrógeno como combustible.*

(Fuente: Clarín.com, "El Congreso, con foco en la energía", sábado 13 de mayo de 2005.)

■ *... La Cámara de Diputados de la Nación había aprobado en general el proyecto de ley de biocombustibles y se aprestaba a tratarlo en particular.*

El proyecto que propicia la producción de biodiésel y alcohol a partir de vegetales, para mezclarlos con gasoil y nafta, para reducir la contaminación y sustituir recursos no renovables, establece un régimen promocional por 15 años contados desde la aprobación de la ley, que incluye al biodiésel, bioetanol y biogás.

(Fuente: Clarín.com, "Diputados aprobó la ley de biodiésel", jueves 23 de marzo de 2006.)

Existen además propuestas centradas en un mayor desarrollo de las llamadas energías no convencionales. En ese sentido un grupo de entidades propone estudios para lograr entre otros:

■ un plan de desarrollo eólico de 3000 Mwh hasta el año 2013. En este aspecto, se debe contemplar la propuesta de la Cámara Argentina de Generadores Eólicos de 300 Mwh para los próximos tres años;

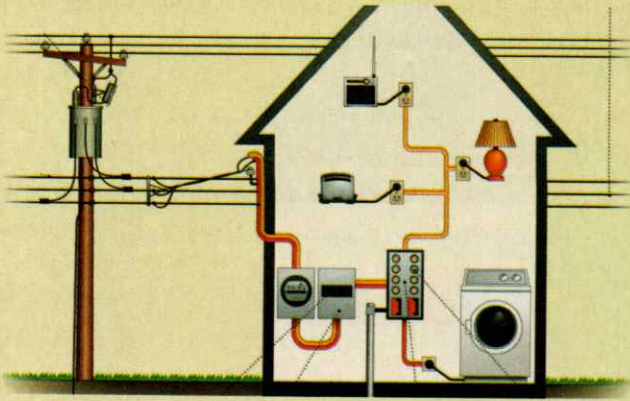
■ un plan de desarrollo de pequeñas centrales hidráulicas. La Secretaría de Energía posee una lista de más de 150 posibles aprovechamientos en distinto estado de avance, que se deben llevar a cabo realizando el análisis de impacto socioambiental por cada caso y analizando integralmente las cuencas hidrográficas;

■ el desarrollo del resto de fuentes alternativas, como la geotérmica, la mareomotriz, la captura de metano de rellenos, adoptando para cada una criterios de sustentabilidad social, ambiental y económica.

(Fuente: "Crisis y oportunidad energética", publicación en www.lexia.com.ar/energias.)

Cuidado de la energía eléctrica

TODOS LOS CIUDADANOS PUEDEN CONTRIBUIR DE ALGUNA MANERA CON EL CUIDADO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE USO DIARIO.



Algunas recomendaciones para tener en cuenta pueden ser las siguientes.

■ Cada casa tiene un promedio de 14,6 lámparas incandescentes. El 15% de ellas tiene un consumo superior a los 200 wh por día. Si se reemplazan dos lámparas comunes por otras de bajo consumo, el ahorro sería de 150 wh por día, es decir 4,5 kwh por mes.

■ Las lámparas de bajo consumo son más costosas que las comunes pero gastan 4 veces menos energía y duran entre 5 y 10 veces más.

■ Las luces de los frentes de las casas pueden accionarse mediante células fotoeléctricas para evitar que estén encendidas innecesariamente toda la noche.

■ Conviene planchar toda la ropa de una vez, no dejar la plancha enchufada ya que es

uno de los electrodomésticos que más energía utiliza: una hora de planchado equivale a 20 horas de televisión, a 7 horas de computadora, a 10 horas de una lámpara común o a 50 horas de una lámpara de bajo consumo.

■ Es conveniente mantener apagados los electrodomésticos como el reproductor de DVD, las videograbadoras, los equipos de música cuando no están en uso, porque siempre hay un consumo mínimo de energía.

Tabla de comparación de los electrodomésticos con una lamparita de 60 W encendida durante el mismo lapso.

Equipo de música	1 lámpara
Televisor	2 lámparas
Computadora	3 lámparas
Licuadora	4 lámparas
Enceradora	8 lámparas
Lavarropas	15 lámparas
Plancha	17 lámparas
Microondas	20 lámparas
Secador de cabello	20 lámparas

Potencia en kw de algunos aparatos:

Horno microondas	1,520
Plancha de vapor	1,070
Heladera 380 dm ³ de capacidad	1,020
7 lámparas de 60 W	0,420
Lavarropas 6 kg	0,330
Computadora	0,230
Videojuego 27"	0,101
Videojuego 19"	0,088
TV 14"	0,053
Radio AM/FM	0,009

Las propuestas descriptas apuntan a aumentar las reservas de hidrocarburos, reemplazarlos por algunos de origen vegetal, utilizar el hidrógeno como combustible y recurrir a las energías no convencionales. Busquen información y analicen los aspectos positivos y negativos de cada una de ellas. Pueden recurrir a las siguientes fuentes: Secretaría de Energía: <http://energia3.mecon.gov.ar>, Consejo Federal de Energía Eléctrica: <http://www.cfee.gov.ar>, Comisión Nacional de Energía Atómica: <http://www.cnea.gov.ar>, o también a páginas de Internet de empresas comerciales de producción de petróleo y energías alternativas.



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Todos los cuerpos tienen energía interna.
- La **energía** puede producir cambios o transformaciones en las condiciones o características iniciales de un sistema.
- La energía puede transferirse desde un cuerpo a otro o desde un sistema a otro.
- La energía se manifiesta o se evidencia en diversas formas.
- Una propiedad de la energía es la capacidad de transformarse.
- En un sistema cerrado, la cantidad total de energía se conserva.
- La energía se degrada; esto significa que si bien se conserva, tras los procesos de transformación resulta menos útil que la energía inicial del sistema.
- Las máquinas facilitan las tareas del hombre y muchas de ellas se utilizan para aprovechar energía.
- Los **combustibles fósiles** constituyen los principales recursos energéticos en la actualidad.
- La **energía nuclear** puede resultar una de las alternativas energéticas de uso masivo en un futuro inmediato, aunque su uso genera opiniones a favor y en contra.
- Las controversias más importantes sobre el uso de la energía nuclear radican en el peligro de los materiales radiactivos y en el almacenamiento de los residuos nucleares.
- Algunas fuentes de energía tienden a agotarse con el correr del tiempo y con su uso ilimitado.
- Existen formas llamadas no convencionales de la **energía**, como la **solar, eólica, geotérmica, biogás, mareomotriz**, etc.
- Las **energías no convencionales** resultan más limpias y en consecuencia menos contaminantes. En la actualidad hay proyectos o propuestas en evaluación para usos de gran envergadura.
- Frente a un uso no racional de los recursos energéticos y al consumo poco equitativo de la energía disponible, el mundo se encuentra ante un problema que exige una urgente resolución: la crisis energética.
- Es importante que todos los ciudadanos tomen conciencia del cuidado de la energía.

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. **a.** Busquen diez palabras relacionadas con el término energía.
- b.** Armen diez frases con las palabras del punto anterior.
- c.** Armen un esquema gráfico conceptual, un mapa o red que incluya los términos utilizados en las frases que escribieron.

2. Analicen las transferencias de energía que se dan en los siguientes casos y completen el cuadro.

En el caso de	Sistema fuente de energía	Sistema receptor de energía	Evidencia de la transferencia de energía
un cohete espacial.			
un barco de vela.			
un martillo.			
una olla con comida sobre una hornalla de cocina.			
una batería de auto.			

3. Analicen y describan las transformaciones e intercambios de energía que se producen en cada caso. Tengan en cuenta las condiciones energéticas iniciales y finales del sistema, así como sus características observables.

- a.** Un automóvil detenido que se pone en marcha y se mueve.
- b.** Un alpinista que sube una montaña desde su pie hasta la cima.
- c.** Una maceta que está en un balcón y se cae.
- d.** Una chimenea que esta apagada y se enciende con leña para calentar una habitación.

4. **a.** Confeccionen una lista de problemas que podrían aparecer si se agotara el petróleo en todo el mundo.
- b.** Evalúen junto a sus compañeros las problemáticas que consideren más graves.

5. Elijan una forma no convencional de energía. Busquen más información sobre sus características y usos. Confeccionen una lista de sus ventajas y desventajas como forma energética en un futuro no muy lejano.

6. Greenpeace se opone al uso de energía nuclear. Lean la siguiente argumentación y luego respondan.

La actual actividad energética tiene enormes impactos: lluvias ácidas, contaminación de mares y suelos, destrucción de bosques, residuos radiactivos, el cambio climático global y el agotamiento de recursos no renovables.

La energía nucleoelectrónica representa una enorme amenaza para la salud humana y los ecosistemas. Sus riesgos e impactos se extienden desde la minería de uranio, la fabricación de los combustibles nucleares, la propia operación de las plantas atómicas y la incesante generación de residuos altamente radiactivos.

Su vínculo con la industria de armamentos y sus problemas técnicos y económicos no resueltos hacen necesario un rápido abandono de la opción nuclear. Greenpeace propone un cambio hacia las energías renovables y limpias.

- a.** ¿Qué es Greenpeace? ¿Cuáles son los fines que persigue esta organización internacional?
- b.** ¿Están de acuerdo o no con su postura? ¿Por qué?
- c.** Mencionen usos de la energía nuclear.
- d.** ¿Cuáles creen que son más importantes, las ventajas o las desventajas? ¿Por qué?

7. ¿Qué es un reactor nuclear? Hagan un esquema gráfico y expliquen las transformaciones energéticas que se producen en ese sistema.

8. Describan y expliquen las transferencias y transformaciones de energía que se producen en una central termoeléctrica.

9. Indiquen las energías asociadas a cada uno de los siguientes sistemas. Justifiquen las respuestas.

Sistema	Formas de energía asociadas
Cocina microondas	
Cuerpo humano	
Radio	
Encendedor	

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

10. ¿Qué centrales nucleares tiene la Argentina? Averigüen cuál es la producción de energía eléctrica de origen nuclear en la República Argentina. ¿Qué expectativas se tienen respecto de su uso a largo plazo?

11. Busquen en diarios, publicaciones y otras fuentes de información cuál es la postura del gobierno de la Argentina frente a la crisis energética. Averigüen cuáles son los planes por seguir.

12. Busquen una factura de consumo de electricidad de sus casas. Efectúen su lectura y análisis. Respondan a las preguntas:

- a. ¿Cuál fue el consumo total?
- b. ¿A qué período corresponde?
- c. ¿Cuánto cuesta el kwh?
- d. ¿Cómo saben si el consumo indicado es correcto?

13. Confeccionen una lista de recomendaciones para el cuidado de la energía que se usa en sus casas (en todas sus formas) y que amplíen las aportadas en este capítulo.

14. Lean el siguiente informe sobre el peligro que producen las pilas descartadas a modo de basura desechable.

PILAS: energía que contamina.

Las pilas y baterías usadas y agotadas, provenientes mayormente del uso de distintos artefactos: juguetes, electrodomésticos pequeños, equipos de música, relojes, computadoras, etc., forman parte de la generación habitual de residuos domésticos o domiciliarios.

Algunas clases de pilas y baterías contienen compuestos químicos que, en el caso de ser dispuestas incorrectamente una vez agotadas, podrían afectar negativamente al ambiente, incluidos los seres vivos.

Estos residuos cuya generación no se limita exclusivamente al ámbito industrial o comercial, sino que involucra principalmente al uso hogareño y, que además poseen características peligrosas, están incluidos dentro de los que genéricamente se denominan residuos peligrosos universales.

¿Qué es un residuo peligroso universal?

Los llamados residuos peligrosos universales o masivos, son residuos de origen domiciliario, comercial o industrial, que en virtud de presentar alguna característica de peligrosidad es conveniente su recolección diferenciada de los residuos sólidos urbanos.

Ejemplos de estos residuos son: pilas, baterías de telefonía celular, tubos fluorescentes, tubos de neón (de alta presión de sodio y halógenos), cartuchos de toner, baterías de automóviles, entre otros.

(Fuente: Ministerio de Salud y Ambiente – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, <http://medioambiente.gov.ar>)

a. Busquen información sobre esta problemática.

b. Respondan las siguientes preguntas:

i. ¿Qué es una pila?

ii. ¿Qué es una batería?

iii. ¿Cuáles son los componentes de una pila?

iv. ¿Qué tipos de pilas y baterías son las más utilizadas? ¿Por qué?

v. ¿Por qué las pilas y baterías contaminan el ambiente?

vi. ¿Cuáles son los daños que pueden ocasionar los componentes de las pilas en la salud?

vii. ¿Es conveniente utilizar pilas recargables? ¿Por qué?

viii. ¿Qué tipo de pilas son menos contaminantes, las recargables o las no recargables? ¿Por qué?

c. ¿Existen campañas de tratamiento, reciclado y prevención sobre el uso de pilas?

d. ¿Qué medidas o acciones propondrían tomar frente a esta problemática ambiental?

15. a. Intenten construir una pila con los siguientes elementos: cuatro limones, alambres finos de cobre, clips o trozos pequeños de chapas de cobre y zinc, foco o lamparita de linterna (hasta 1,5 volt).

b. Expliquen qué transformaciones energéticas se producen en este sistema.

16. a. Construyan una pila con los siguientes elementos: diez monedas plateadas y doradas, papel secante embebido en vinagre, alambres finos de cobre, una lamparita de linterna (1,1 volt ó 1,2 volt).

b. Expliquen el funcionamiento de la pila que armaron.

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	Los cuerpos en reposo no tienen energía interna.	F
2	La transferencia de energía de un sistema a otro, o en un mismo sistema, provoca cambios en las condiciones energéticas iniciales.	V
3	Todas las fuentes naturales de energía son inagotables.	F
4	La energía de un sistema se intercambia y se transforma.	V
5	Una piedra que está ubicada en la cima de una montaña cae libremente. La piedra tiene más energía en la montaña, antes de caer, que al llegar al suelo luego de su caída.	F
6	En todos los procesos de transformación de energía de un sistema hay degradación.	V
7	La energía se degrada. Es decir, aunque la cantidad total de energía se conserva, la energía disponible luego de las transformaciones es menos útil o aprovechable.	V
8	La energía total de un sistema cerrado se conserva.	F
9	El Sol es la principal fuente de energía de la Tierra.	V
10	Actualmente existen algunas formas alternativas de energía no convencionales que cubren las demandas masivas de la población.	F
11	Se puede obtener gas metano de la combustión de algunos desechos naturales, es decir a partir del uso del biogás.	V
12	La Argentina no utiliza la energía eólica en ningún proyecto energético.	F
13	Las posibilidades del uso de la energía nuclear como recurso masivo son remotas, debido a las controversias y debates sobre los riesgos que implica.	V
14	La Argentina no produce energía eléctrica a partir de materiales nucleares.	F
15	La problemática sobre la crisis energética implica que pronto la energía total de la Tierra se agotará.	V
16	Muchos países parecen no tomar conciencia sobre el uso racional de la energía.	V
17	Se produce energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas, térmicas y nucleares.	V
18	En la actualidad se puede reemplazar la energía eléctrica de uso diario y masivo con otras formas no convencionales, como la energía solar.	V
19	En algunos años más todos los combustibles fósiles se habrán agotado por completo.	V
20	Es posible contribuir con la problemática energética, cuidando la energía que se utiliza en los hogares.	V

El placer más noble es el júbilo de comprender
Leonardo da Vinci

CONTENIDOS

- Temperatura
- Escalas termométricas
- Los termómetros
- Dilatación
- Calor
- Calor específico
- Propagación del calor
- Los cambios de estado
- Calor de fusión y calor latente de vaporización

8

CALOR Y TEMPERATURA

Conceptos como los de calor y temperatura forman parte de nuestro lenguaje cotidiano y están presentes en la explicación de muchos fenómenos de la naturaleza. Acercarse a la construcción de estos conceptos científicos permitirá una mejor comprensión del funcionamiento de numerosos aparatos de uso habitual.

Es posible explicar con ellos, por ejemplo, qué ocurre con los cuerpos de distintas temperaturas cuando se ponen en contacto, por qué los materiales generalmente se dilatan al calentarse o cómo puede transmitirse el calor en sólidos, líquidos y gases, entre otros conceptos.

Cuando se habla de las condiciones térmicas de un sistema, es habitual utilizar indistintamente calor o temperatura. Se suele decir, por ejemplo, que el agua para preparar el café está demasiado caliente o que el helado que se saca del congelador está frío, cuando lo que realmente se intenta expresar es que la temperatura del agua es elevada o que el helado del congelador se encuentra a baja temperatura.

También suele decirse que en verano hace calor o en invierno frío, pero lo que se percibe en realidad no es el calor sino la sensación térmica.

En este capítulo se analizarán las diferencias entre los conceptos de temperatura y calor.





El Glaciar Perito Moreno, Provincia de Santa Cruz.

Temperatura

La palabra temperatura es muy familiar para todos, pero es necesario precisar en términos científicos este concepto para diferenciarlo del concepto de calor.

A nuestro alrededor existen muchos cuerpos u objetos formados por distintos tipos de materiales. Cada uno de estos materiales puede caracterizarse si se analizan sus propiedades. La madera, el plástico, los metales, el cemento, el papel, etc. son distintos tipos de materiales, con diferentes características propias (densidad, punto de fusión, resistencia, etc.). En términos químicos, los materiales pueden clasificarse y estudiarse de acuerdo con los elementos que los componen.

Para analizar las características de un cuerpo o de una sustancia, es necesario conocer ciertos parámetros, o variables de estado, que de alguna forma permiten determinar sus propiedades.

Un cuerpo o una sustancia están formados por **materia**. Ésta a su vez está formada por **partículas** que están en permanente movimiento. Cuanto más rápido se muevan, mayor será la temperatura del cuerpo o de la sustancia.

La **temperatura** es, entonces, una variable de estado de la materia relacionada con la energía cinética promedio de sus partículas.

Conocer la temperatura de un cuerpo o una sustancia, así como también otras variables de estado como la presión, la densidad, el punto de ebullición, la resistencia eléctrica, la resistividad o la conductividad, aporta mayor información sobre sus propiedades físicas. Es importante remarcar entonces, que los cuerpos no tienen calor ni frío, sino una determinada temperatura que los caracteriza, y que si este parámetro varía, pueden modificarse algunas de sus propiedades.

La **temperatura** es una magnitud que se relaciona con la velocidad promedio del movimiento molecular de la materia. Cuanto mayor es el movimiento de sus moléculas, mayor es la energía cinética (energía de movimiento), ya que estas moléculas se trasladan y rotan con mayor rapidez. En este caso, también la temperatura es mayor.



La sensación térmica

Materiales

Tres recipientes. Agua fría, tibia y caliente.

Procedimiento

1. Tomen los tres recipientes y coloquen cantidades iguales de agua fría en uno de ellos, tibia en otro y caliente en el tercero.
2. Pongan una mano en el agua caliente y otra en el agua muy fría por 30 segundos.
3. Pasen ambas manos al recipiente con agua templada.



Contesten las siguientes preguntas.



1. ¿Cómo se siente el agua en la mano que estaba antes en el agua fría?
2. ¿Cómo se siente el agua en la mano que estaba antes en el agua caliente?
3. ¿Qué pueden decir respecto de la temperatura del agua tibia?

¿Qué es la sensación térmica?

Se denomina **sensación térmica** a la temperatura detectada por la piel de cada persona, frente a determinadas condiciones climáticas que no solo dependen de la temperatura del aire, sino también de la velocidad del viento, y de la humedad o vapor de agua que contiene el aire. Aunque la sensación térmica es una medida muy subjetiva, es posible calcularla y tabularla teniendo en cuenta los parámetros señalados.

La sensación de frío está relacionada con la velocidad de transferencia o intercambio de energía desde la piel expuesta al aire. De esta manera, si la temperatura es baja y hay viento, éste aumenta la disipación de calor del cuerpo, haciendo que la sensación sea la que se experimentaría en un ambiente con una temperatura menor. De igual modo, si hace calor y hay viento, éste contribuye a evaporar más rápidamente la transpiración, provocando la sensación de una temperatura menor que la real. También la humedad del aire es un factor a tener en cuenta. Así, por ejemplo, si la temperatura del aire es 27 °C, la sensación térmica es igual a esa temperatura si la humedad relativa es 40%. Sin embargo, si la humedad aumenta a 80% la persona se siente como si estuviera en un ambiente a 32 °C.

Escalas termométricas

En la vida cotidiana resulta útil conocer la temperatura del aire, ya que brinda información sobre el estado del tiempo y las condiciones climáticas. También puede resultar útil controlar la temperatura corporal en los enfermos, o la temperatura de conservación de algunos alimentos. Para medir la temperatura es necesario disponer de un instrumento llamado **termómetro**. Los termómetros pueden tener distintas escalas que permiten asignar un número a cada estado térmico. Para calibrar un termómetro se deben considerar dos puntos de referencia, llamados **puntos fijos**. Algunas variantes en su determinación son las siguientes.

Escala Fahrenheit

A principios del siglo XVIII, Gabriel Fahrenheit (1686-1736) creó la escala que lleva su nombre. El punto fijo inferior de esta escala corresponde a la temperatura de fusión de una solución de cloruro de amonio en agua, a la que asignó el valor 0 °F. El punto fijo superior corresponde a la temperatura de agua en ebullición a la que asignó el valor 212 °F. Un termómetro así graduado indica que la temperatura de fusión del hielo a presión normal es 32 °F. Esta escala es muy utilizada en algunos países, como los Estados Unidos.

Escala Celsius

En 1743, Anders Celsius (1701-1744) creó la escala Celsius. En esta escala se asignó al punto de fusión del hielo a una temperatura de 0 °C y al punto de ebullición del agua 100 °C, ambos valores a presión normal. Es utilizada en la mayoría de los países de Europa y América latina.

Como en la escala Fahrenheit el punto de fusión del hielo corresponde a 32 °F, se tiene que 0 °C corresponde a 32 °F. Con lo cual, mientras en la escala Celsius el intervalo entre los puntos de fusión y ebullición del agua queda dividido en 100 partes iguales, la escala Fahrenheit divide al mismo intervalo en 180 partes iguales (de 32 °F a 212 °F). Puede deducirse entonces que:

$$\frac{T_c}{100^\circ\text{C}} = \frac{T_f - 32^\circ\text{F}}{180^\circ\text{F}} \Rightarrow T_c = \frac{5^\circ\text{C}}{9^\circ\text{F}} (T_f - 32^\circ\text{F}) \text{ y } T_f = 32^\circ\text{F} + \frac{9^\circ\text{F}}{5^\circ\text{C}} T_c$$

donde T_c es la temperatura medida en la escala Celsius y T_f es la temperatura medida en la escala Fahrenheit.

Escala Kelvin

Fue nombrada así en honor a William Thomson, el que más tarde sería Lord Kelvin (1824-1907), quien a los 24 años creó una escala termométrica de gran uso en muchos países del mundo. Esta escala se calibra en términos de la energía de los cuerpos, de modo tal que existe un límite de la temperatura mínima posible, que corresponde al menor estado térmico que puede alcanzar la materia. A este límite se lo denominó 0 K o cero absoluto.

Las unidades de la escala Kelvin se dimensionan de igual forma que los grados de la escala Celsius; esto significa que una variación de temperatura de diez grados Kelvin es lo mismo que una variación de 10 grados Celsius. Luego, sobre la base de la escala Celsius se asigna 273,15 K a la temperatura de fusión del hielo, es decir 0 °C, y 373,15 K para la temperatura de ebullición del agua, o sea 100 °C. De este modo el 0 K coincide con el -273,15 °C.

Esta escala es la única utilizada por los científicos para desarrollos teóricos y es la que se toma como la unidad de temperatura en el Sistema Internacional de Unidades (SI) y en el Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA). Se representa con la letra K, y no °K.

Se tiene además que:

$$T_K = 273,15\text{ °C} + T_C$$

donde T_C es la temperatura medida en la escala Celsius y T_K es la temperatura en la escala Kelvin.

Aplicaciones de las escalas termométricas

1. Un periodista del estado de California en EEUU anuncia el pronóstico del día, y dice que la temperatura máxima será de 50 °F. ¿Aconsejará a los habitantes llevar abrigo?

Para saber si hará frío o no, es necesario transformar la temperatura medida en la escala Fahrenheit a la escala Celsius, para ello, como

$$T_C = \frac{5\text{ °C}}{9\text{ °F}} \cdot (T_F - 32\text{ °F}) = \frac{5\text{ °C}}{9\text{ °F}} \cdot (50\text{ °F} - 32\text{ °F}) = 10\text{ °C}$$

la temperatura es de 10 °C, es decir, hay que llevar algo de abrigo.

2. La temperatura normal del cuerpo es de 37 °C, ¿cuál es esa temperatura medida en °F?

$$\text{Como } T_F = 32\text{ °F} + \frac{9\text{ °F}}{5\text{ °C}} \cdot T_C, \text{ entonces } T_F = 32\text{ °F} + \frac{9\text{ °F}}{5\text{ °C}} \cdot 37\text{ °C} = 98,6\text{ °F}$$

la temperatura normal del cuerpo es 98,6 °F.

3. La temperatura ambiente del aula es 22 °C. ¿Cuál será la temperatura en la escala Kelvin?

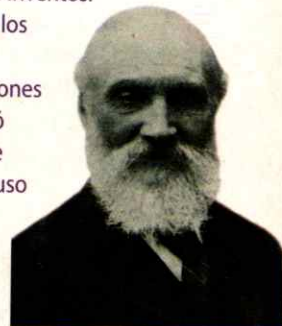
Como $T_K = 273,15\text{ °C} + T_C$, entonces:

$$T_K = 273,15\text{ °C} + 22\text{ °C} = 295,15\text{ K}$$

William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) fue

uno de los grandes maestros de la termodinámica del siglo XIX. Nació en Belfast y se hizo famoso por sus teorías y rico con sus inventos.

Como físico, esbozó los fundamentos de la teoría de las oscilaciones eléctricas, propugnó la escala absoluta de temperaturas, y repuso la doctrina de la disipación de la energía.



1. La temperatura de una habitación aumenta 6 °C. ¿Cuál fue el aumento medido en las escalas absoluta y Fahrenheit?

2. a. ¿Puede haber algún estado térmico para el que su temperatura en la escala Fahrenheit sea positiva y en Celsius negativa?

b. ¿Hay estados en los que ocurra lo contrario?

3. ¿Cuál es el valor para el cual la temperatura medida en grados Celsius y en grados Fahrenheit está representada por el mismo número?

Los termómetros como el de la imagen permiten medir la temperatura en grados Celsius y en grados Fahrenheit.



Los termómetros

Existen diversos tipos de termómetros que se construyen para fines específicos. Tanto los termómetros clínicos que sirven para medir la temperatura corporal, como las termocuplas que regulan la temperatura de algunos procesos industriales, o los termómetros de alcohol coloreado usados en meteorología, basan su funcionamiento en distintas variables termométricas.

Los termómetros clínicos

Constan de un tubo de vidrio que contiene mercurio (metal líquido de fácil dilatación) con un estrangulamiento cerca del bulbo para impedir que el mercurio descienda a él luego de dilatarse, lo cual facilita la lectura de la temperatura.

La escala de los termómetros clínicos se extiende por lo general desde 35,5 °C hasta 42 °C con una división mínima de la escala de 0,1 °C.



Las termocuplas

Constan de dos alambres de diferentes materiales que están soldados en un extremo, y terminan en una ficha especial en el otro.

Cuando aumenta la temperatura en la unión de los metales, se produce una fuerza electromotriz que se mide con instrumento llamado voltímetro. Si se calibra adecuadamente la escala, se puede establecer una comparación entre el registro del instrumento y la temperatura de la unión entre estos metales.



Los metales utilizados pueden ser aleaciones de níquel-cromo, níquel-aluminio, hierro y cobre, etc. Estos termómetros permiten medir temperaturas dentro de un rango aproximado de -150 °C a 1500 °C.

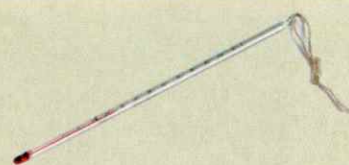
Los termorresistores

Son termómetros contruidos con un material que presenta una significativa variación de su resistencia eléctrica con la temperatura. Los más usuales son los termorresistores de platino, que son alambres finos o láminas delgadas encapsuladas en un material cerámico. Se trata de sensores de gran sensibilidad y especificidad.

Los termómetros de alcohol

Estos termómetros se utilizan en meteorología para medir la temperatura del aire.

Permiten medir temperaturas inferiores a los -39 °C, lo cual resulta ideal para los registros de bajas temperaturas del aire. En estos casos el mercurio se solidifica y es por ello que se usa el alcohol.



Dilatación

Generalmente la variación de temperatura de un cuerpo provoca un cambio en sus dimensiones. Si la temperatura aumenta, se produce un aumento del volumen del cuerpo. En ese caso se dice que el cuerpo sufrió una **dilatación**.

Las amplias variaciones de la temperatura ambiente pueden provocar cambios en casi todos los cuerpos. Éstos se dilatan o se contraen ante un aumento o disminución importante de la temperatura.

Para evitar que estos fenómenos produzcan daños, por ejemplo, en las vías de los ferrocarriles, en las grandes estructuras metálicas o de concreto armado, se dejan **juntas de dilatación** que son simplemente espacios que permiten la expansión de estos materiales.

Los puentes, las calles asfaltadas y otras grandes estructuras se construyen en bloques que se unen entre sí con algún tipo de material, como el alquitrán, que se acomoda o adapta a los espacios libres y no impide la expansión térmica, evitando así, una rotura importante.

Los vidrios comunes pueden romperse fácilmente si se los somete a un aumento de temperatura. Por este motivo, los elementos de un laboratorio, o los que se usan en hornos de cocina, están compuestos por un vidrio especial conocido como **Pyrex** (marca de este tipo especial de vidrios) que soporta más las altas temperaturas. Este material se dilata casi tres veces menos que el vidrio común ante igual variación de temperatura.

No solo los sólidos se dilatan, también este fenómeno se da en los líquidos y gases.

El aumento de la temperatura del aire hace que aumente su volumen y por lo tanto disminuya su densidad. Las masas de aire caliente tienden a elevarse desplazando las masas de aire de menor temperatura.

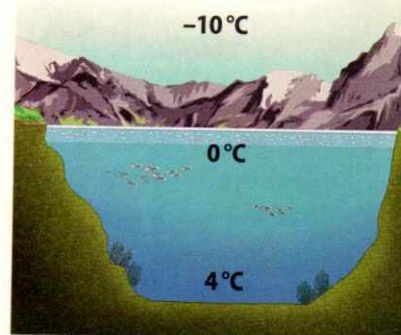


En esta imagen puede verse una junta de dilatación de las vías del ferrocarril.

Dilatación anómala del agua

Generalmente los líquidos se dilatan al aumentar su temperatura, pero el agua se comporta de una manera anómala. Cuando su temperatura aumenta desde 0°C a 4°C , se contrae, y más arriba de los 4°C comienza a dilatarse hasta llegar al punto de ebullición.

Este comportamiento poco habitual del agua es muy importante en la naturaleza ya que si se comportara como los demás líquidos, la vida de las especies acuáticas no sería posible. Por ejemplo, el fondo de un lago se cubriría de gran cantidad de hielo lo cual dificultaría la vida de seres que habitan este ecosistema.



Dilatación de los gases

Materiales

Vaso de precipitados. Agua. Mechero Bunsen. Jeringa.

Procedimiento

1. Coloquen el agua en el vaso de precipitados.
2. Pongan el vaso en contacto con el mechero hasta que el agua llegue al punto de ebullición.
3. Introduzcan la jeringa dentro del

recipiente dejando un poco de aire en su interior.

Contesten las siguientes preguntas.

1. ¿Hacia donde se desplaza el émbolo de la jeringa luego de unos minutos?
2. ¿Por qué creen que ocurre esto?



El coeficiente de dilatación lineal de un sólido indica cual es la variación de su longitud inicial, por unidad de longitud y por unidad de temperatura. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T}$$

donde ΔL es la variación de longitud luego de la dilatación, L_0 es la longitud inicial del cuerpo y ΔT la variación de temperatura. La unidad de α es $\frac{m}{m \cdot ^\circ C} = \frac{1}{^\circ C}$ o bien $^\circ C^{-1}$.

Si el coeficiente de dilatación lineal del hierro es $1,2 \cdot 10^{-5} ^\circ C^{-1}$ significa que por cada metro de hierro, este material se dilata $1,2 \cdot 10^{-5} m$ cuando su temperatura varía en $1 ^\circ C$.

Tabla de coeficientes de dilatación lineal de algunos materiales

Material	$\alpha (^\circ C^{-1})$
Concreto	$0,7 - 1,2 \cdot 10^{-5}$
Plata	$2,0 \cdot 10^{-5}$
Oro	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Invar	$0,04 \cdot 10^{-5}$
Plomo	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Zinc	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Hielo	$5,1 \cdot 10^{-5}$
Aluminio	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Latón	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Vidrio	$0,4 - 0,9 \cdot 10^{-5}$
Hierro	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Cuarzo	$0,04 \cdot 10^{-5}$
Acero	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Algo más sobre la dilatación

No todas las sustancias dilatan de igual forma frente a un mismo aumento de temperatura. La mayor o menor dilatación depende de distintos factores como por ejemplo las características de cada material, su composición y su estructura molecular o cristalina. Iguales volúmenes de hierro y de vidrio sufren dilataciones distintas frente a un mismo aumento de temperatura. Además, la dilatación de un cuerpo es directamente proporcional a la variación de temperatura y al volumen inicial. En dos cuerpos de distinto volumen e igual material que sufren un mismo aumento de temperatura, se observará mayor dilatación en el cuerpo de mayor volumen inicial.

Lo expuesto se puede resumir en la siguiente expresión matemática que permite el cálculo de la dilatación de un cuerpo:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T$$

donde ΔV es la variación del volumen producida durante la dilatación, V_0 es el volumen inicial, es decir el volumen del cuerpo antes de este fenómeno, γ es el coeficiente de dilatación, que depende de cada material, y ΔT variación de temperatura que sufre el cuerpo.

Muchas veces se considera una sola dimensión para los cálculos de dilatación. Por ejemplo puede resultar necesario conocer las variaciones de la longitud del cuerpo que prevalece sobre otras de sus dimensiones. Por esto se habla de la dilatación lineal de los cuerpos.

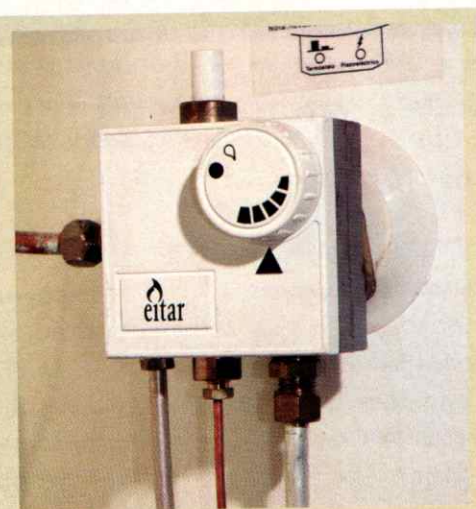
La expresión matemática para el cálculo de la dilatación lineal es:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

donde ΔL es la variación de longitud producida durante la dilatación, L_0 es la longitud inicial, α es el coeficiente de dilatación lineal y ΔT es la variación de temperatura.

La dilatación térmica de algunos materiales se aprovecha para fabricar termostatos que son unos aparatos diseñados para el control de variables o procesos dependientes de la temperatura. Pueden encontrarse en planchas, calventores, radiadores, etc.

Los termostatos están contruidos por bandas o cintas bimetalicas formadas por la unión o soldadura de dos láminas de metales distintos. Cuando la cinta se calienta, uno de los metales dilata más que el otro, y esto hace que la banda se flexione en forma de curva. En cambio, cuando se enfría, vuelve a la posición inicial. Este movimiento de las bandas puede accionar por ejemplo una válvula o cerrar un interruptor de suministro de energía eléctrica.



Aplicaciones del coeficiente de dilatación lineal

¿En cuánto se incrementa la longitud de una barra de hierro de 100 m de largo cuando su temperatura aumenta 15 °C?

En el lateral de la página 146 se puede observar que el coeficiente de dilatación lineal del hierro es de $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, por lo tanto:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T = 100 \text{ m} \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot 15 \text{ }^{\circ}\text{C} = 0,018 \text{ m} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Cuando la temperatura aumenta 15°C la barra de hierro de 100 m aumenta entonces 0,018 m.

Calor

Las personas suelen decir frases como las siguientes; *¿Qué caliente que está el agua!; ¡Hoy hace mucho calor, hay más de 30 grados!; Cerremos la ventana que entra frío, El calor hizo que la puerta de hierro se hinchara, El calor de la estufa subió a las habitaciones de la parte superior de la casa,* etc. Si bien forman parte de un lenguaje cotidiano, estas expresiones tienen poca precisión científica, y es necesario aproximarse a una definición de los conceptos físicos que permita interpretar y diferenciar el significado de cada término que se utiliza desde el lenguaje científico.

Cabe señalar que algunas de estas manifestaciones personales están muy próximas a las ideas científicas que se manejaron sobre el calor entre mediados del siglo XVIII y las primeras décadas del siglo XIX, bajo la teoría del calórico.

El calor era considerado como un fluido material, llamado **calórico** que estaba en el interior de los cuerpos. Esta especie de sustancia capaz de pasar desde los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura, explicaba el enfriamiento de los cuerpos por pérdida del calórico, y calentamiento por su ganancia.

Las primeras críticas de la teoría del calórico, que ponen en duda la existencia de dicho fluido, surgen cuando en 1798 Benjamin Thompson (1753-1814), conde de Rumford y ministro de Guerra de Baviera, observó que al taladrar grandes piezas de metal para fabricar cañones, se desprendían importantes cantidades de calor por frotamiento. El conde dudó de la existencia del calórico, pues si se trataba de una sustancia debería acabarse en algún momento de ese proceso de frotamiento, sin embargo, esto no ocurría.

Mucho tiempo después, las ideas del calórico como sustancia en movimiento fueron sustituidas por una nueva concepción científica, que plantearía la posibilidad de unificar los fenómenos mecánicos, luminosos, eléctricos, magnéticos, térmicos, y químicos bajo el concepto de **energía**.

El calor como intercambio de energía

Todos los cuerpos o sistemas materiales tienen asociada una **energía interna** que permite conocer y caracterizar sus propiedades. El **calor** es una forma de intercambio de energía desde el cuerpo de mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

Por ejemplo, cuando se deja olvidada una taza con café recién preparado sobre la mesa de la cocina, luego de un cierto tiempo se enfría dado que entre el café y el aire que rodea la taza se produjo un intercambio de energía. El café recién preparado a mayor temperatura que el aire del ambiente que rodea a la taza transfirió energía (en forma de calor) al medio.

■ Todos los cuerpos tienen asociada una cierta energía interna como consecuencia del movimiento de sus partículas. Esta energía interna puede variar cuando se intercambia energía con el medio o con otros cuerpos. Si dos o más cuerpos a distintas temperaturas se ponen en contacto térmico, intercambian espontáneamente energía en forma de calor. Así el **calor** es una forma de transferencia de energía, aunque existen otras maneras de intercambio de energía no asociadas a las diferencias de temperaturas, sino a las fuerzas y a las ondas electromagnéticas. Estas dos formas se denominan respectivamente, **trabajo** y **radiación**.

Una forma de intercambiar energía entre dos cuerpos o sistemas materiales es por calor. Siempre que dos o más cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas se ponen en contacto térmico, se produce un intercambio de energía en forma de calor. En los fenómenos espontáneos este proceso continúa hasta que dichos cuerpos alcanzan el **equilibrio térmico**, es decir igualan sus temperaturas.

Los cuerpos no tienen frío o calor sino que poseen cierta energía interna que puede variar, por ejemplo cuando entran en contacto con otros cuerpos de diferentes temperaturas.

Otras formas de intercambio de energía

Además del calor, existen otras dos formas básicas de transferencia de energía.

Por trabajo

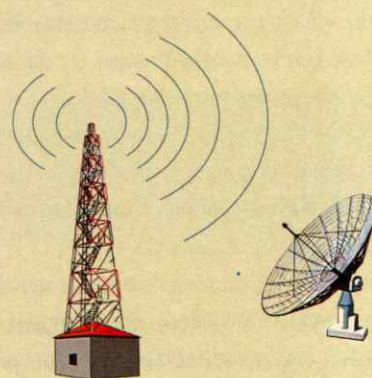
Si una persona empuja una mesa, ejerce una fuerza sobre la mesa, de tal manera que logra desplazarla de su posición inicial. Se produce un intercambio de energía entre la persona y la mesa. La mesa aumenta su energía cinética ya que la persona le transfiere cierta cantidad de energía como consecuencia de ejercer una fuerza sobre dicha mesa. Se dice que los cuerpos intercambiaron energía por trabajo cuando interactúan entre sí mediante fuerzas.



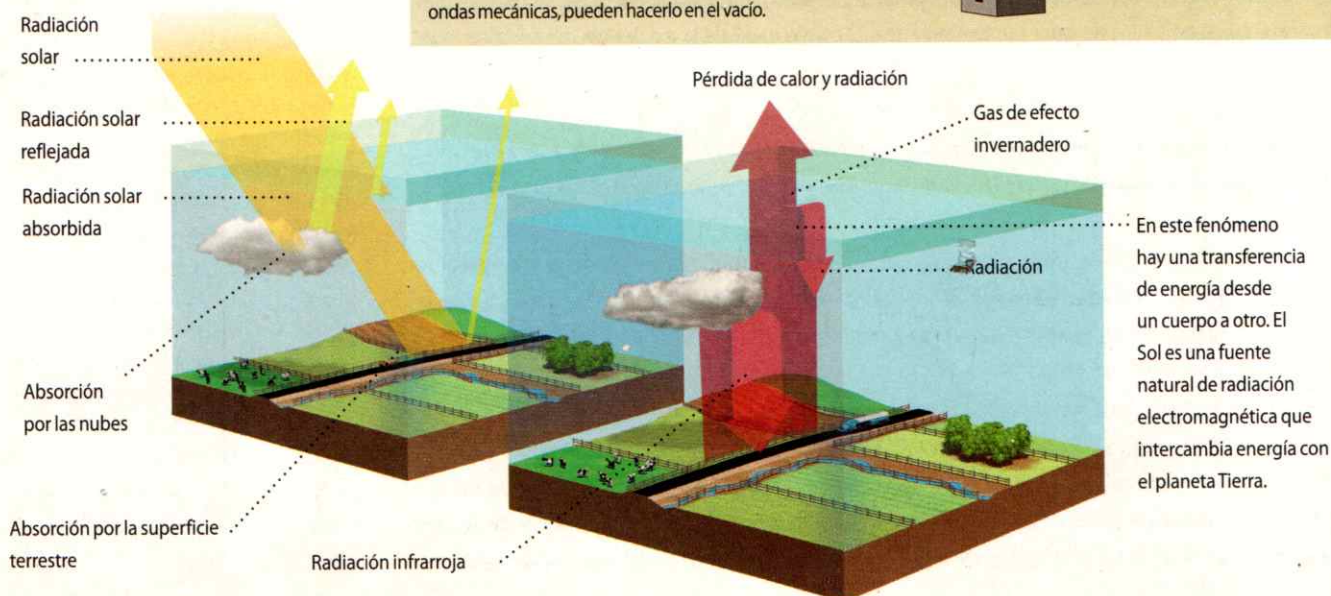
Por radiación

Cuando una señal que transporta información llega a una antena como, por ejemplo, la señal satelital que recibe la antena de un celular, se produce un intercambio de energía, pero en este caso no hay acción de fuerzas ni calor.

La radiación emitida por una fuente emisora es captada por un receptor que decodifica la señal según el tipo de información que se transmite. En este caso, la energía se transfiere desde la fuente al receptor por ondas electromagnéticas que se caracterizan porque no necesitan un medio material de propagación. A diferencia de las ondas mecánicas, pueden hacerlo en el vacío.



La Tierra absorbe el 70% de la energía que proviene del Sol. Parte de esta energía es absorbida por el suelo, y parte por los gases de la atmósfera. A su vez, el suelo terrestre emite también radiación que en parte es reflejada por algunos gases presentes en la atmósfera, lo que genera el efecto invernadero.



Calor específico

Las sustancias tienen distintas capacidades de absorber energía en forma de calor, ya que frente a la misma cantidad de calor, sus temperaturas varían en formas diferentes.

Por ejemplo, si se entrega igual cantidad de calor a una cuchara de aluminio y a una masa equivalente de agua, al cabo de un cierto tiempo se podrá observar que la cuchara registra un mayor aumento de temperatura que el agua.

Las sustancias tienen capacidades distintas de almacenamiento de energía, y esto es muy evidente con los alimentos.

Si se colocan en un horno al mismo tiempo una fuente de papas y una cantidad de masa equivalente de pollo, se advierte que las papas tardan más tiempo en llegar a la temperatura en equilibrio. Esto ocurre porque diferentes sustancias requieren distintas cantidades de calor para alcanzar una misma temperatura. Se dice que estos alimentos tienen distintas capacidades caloríficas específicas o calores específicos.

El **calor específico** o **capacidad calorífica específica**, c , de una sustancia es la cantidad de calor necesaria para variar su temperatura en una unidad por unidad de masa. Por ejemplo, el calor específico del agua es $1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$, lo que significa que cada gramo de agua necesita intercambiar una caloría para variar su temperatura un grado Celsius. El agua tiene una mayor capacidad de almacenar energía que muchas otras sustancias. Por tal razón, una pequeña masa de agua absorbe una gran cantidad de calor, con un aumento relativo de temperatura bastante pequeño. Por el mismo motivo se puede explicar que el agua se enfría más lentamente que otras sustancias. Es por esto que el agua se usa como refrigerante en muchas maquinarias o sistemas, como por ejemplo los automóviles.

Calorimetría

Se denomina **calorimetría** a la medición y el cálculo de las cantidades de calor que intercambia un sistema.

Intuitivamente se sabe que cuanto mayor sea la cantidad de calor suministrada, el cuerpo alcanzará una mayor variación de la temperatura. Es posible verificar experimentalmente que entre el calor y la temperatura existe una relación de proporcionalidad directa. La constante de proporcionalidad depende tanto de la sustancia que constituye el cuerpo como de su masa, y resulta el producto del calor específico por la masa del cuerpo.

Por lo tanto la ecuación que permite calcular intercambios de calor es:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

donde Q es el calor intercambiado por un cuerpo de masa m , constituido por una sustancia cuyo calor específico es c , siendo ΔT la variación de temperatura experimentada

Por convención, se adopta el signo positivo para Q cuando la variación de temperatura es mayor que cero, es decir cuando el cuerpo aumenta su temperatura. En caso contrario, cuando la variación de temperatura es menor que cero, el cuerpo disminuye su temperatura y el signo de Q será negativo.

Es decir que la cantidad de calor que intercambian dos cuerpos del mismo material, pero de masas diferentes, para variar de igual manera sus temperaturas, depende de sus masas.

Por ejemplo, si se entrega la misma cantidad de calor a 500 g de agua y luego a 1000 g de agua que inicialmente se encuentran a temperatura ambiente, se espera que la variación de temperatura de la masa menor de agua sea mayor que la correspondiente a la masa mayor de agua.

La unidad elegida para medir la cantidad de energía es el **joule**, J , aunque existe otra unidad muy utilizada, la **caloría (cal)** que se define como la cantidad de calor necesario para que un gramo de agua pura pase de $14,5^\circ\text{C}$ a $15,5^\circ\text{C}$. En alimentación y nutrición se suelen usar mucho las calorías para medir el valor energético de los alimentos. Se utiliza la Cal (escrita con mayúscula) donde:

$$1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}$$

La relación entre los joules y las calorías es la siguiente:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}, \text{ o bien } 1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}$$

Algunos cálculos de calorimetría

Es importante tener en cuenta que en esta transferencia se cumple el Principio de Conservación de la Energía ya que se puede afirmar que:

Si dos cuerpos o sistemas aislados intercambian energía en forma de calor, la cantidad recibida por uno de ellos es igual a la cantidad cedida por el otro cuerpo.

Es decir, la energía total intercambiada se conserva. Esto se puede escribir matemáticamente de la siguiente forma $\Sigma Q = 0$.

Si se consideran dos cuerpos de masas diferentes m_1 y m_2 que se encuentran a diferentes temperaturas T_1 y T_2 respectivamente y se colocan en contacto térmico, al cabo de un tiempo equiparán sus temperaturas a una cierta temperatura final T_f , es decir, alcanzarán el **equilibrio térmico**. En este intercambio se cumple el principio de conservación de la energía, es decir, la cantidad de energía que absorbe un cuerpo es igual a la cantidad de energía que cede el otro, por lo cual se puede escribir que:

$$Q_2 = -Q_1 \text{ que es lo mismo que escribir que: } c_2 \cdot m_2 \cdot (T_f - T_2) = -c_1 \cdot m_1 \cdot (T_f - T_1)$$

La temperatura final alcanzada luego del intercambio es:

$$T_f = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}$$

Aplicación de cálculos calorímetros

1. Se colocan 500 gramos de agua líquida a 10 °C en un calorímetro ideal (se desprecia el intercambio de calor del calorímetro) y se la mezcla con 1000 gramos de agua a 70 °C. Calculen la temperatura de equilibrio de esta mezcla.

Como

$$T_f = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot T_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}$$

entonces,

$$T_f = \frac{500 \text{ g} \cdot 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \cdot 10^\circ\text{C} + 1000 \text{ g} \cdot 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \cdot 70^\circ\text{C}}{1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \cdot (500 \text{ g} + 1000 \text{ g})}$$

Se obtiene como resultado:

$$T_f = 50^\circ\text{C}$$

La temperatura de equilibrio de la mezcla es de 50 °C.

Un **calorímetro** es un recipiente adiabático o térmicamente aislado en el que se puede calcular la cantidad de energía en forma de calor que se intercambia cuando se colocan en contacto térmico sustancias de diferentes masas y a diferentes temperaturas. También puede utilizarse para calcular el calor específico de una determinada sustancia.



2. Calculen la cantidad de calor necesaria en kcal y J que deben ceder 1500 gramos de agua que se encuentra en su punto de ebullición para disminuir su temperatura hasta 20 °C.

Como $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ entonces:

$$Q = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1500 \text{ g} \cdot (20^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}) = -120\,000 \text{ cal} = -120 \text{ kcal}$$

Como además $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ entonces $-120\,000 \text{ cal} = -120\,000 \cdot 4,18 \text{ J} = -501,600 \text{ J}$. Es decir, la cantidad de calor necesaria es -120 kcal o -501,600 J.

3. ¿Cuál será el aumento de temperatura de una barra de 3 kg de hierro si se coloca en un horno industrial que le suministra 30 kcal? Consulten la tabla de calores específicos.

Como $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$, si se despeja ΔT se obtiene que:

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = \frac{30\,000 \text{ cal}}{0,113 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 3000 \text{ g}} = 88,5^\circ\text{C}$$

porque $Q = 30 \text{ kcal} = 30\,000 \text{ cal}$, $m = 3 \text{ kg} = 3000 \text{ g}$ y en la tabla de calores específicos, se observa que el calor específico del hierro es de $0,113 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$.

Luego, la variación de temperatura es aproximadamente $\Delta T = 88,5^\circ\text{C}$.

4. Calculen el calor específico de una sustancia que constituye un cuerpo de 20 g de masa, sabiendo que para elevar su temperatura 6°C se necesitan 96 cal.

Como $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$, si se despeja c , se obtiene:

$$c = \frac{Q}{\Delta T \cdot m} = \frac{96 \text{ cal}}{6^\circ\text{C} \cdot 20 \text{ g}} = 0,8 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

5. El sistema de refrigeración de un camión contiene 20 litros de agua. ¿Cuál es la variación de la temperatura del agua si se debe extraer una cantidad de energía en forma de calor de 836 000 J?

La energía extraída en forma de calor por el sistema refrigerante pasa al agua. Como $1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}$ entonces $836\,000 \text{ J} = 836\,000 \cdot 0,24 = 200\,640 \text{ cal}$.

Por otro lado, $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$, con lo cual si se despeja ΔT se obtiene:

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} = \frac{200\,640 \text{ cal}}{1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 20\,000 \text{ g}} = 10^\circ\text{C}$$

La temperatura del agua aumenta en 10°C .

Tabla de calores específicos de algunas sustancias

Sustancia	$c \left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$
Agua	1,00
Agua de mar	0,945
Aire	0,000053
Alcohol	0,58
Aluminio	0,212
Arena	0,20
Bronce	0,092
Cobre	0,093
Hielo	0,55
Hierro	0,113
Lana de vidrio	0,00009
Latón	0,094
Mercurio	0,033
Oro	0,031
Plata	0,060
Plomo	0,031
Vidrio	0,199
Zinc	0,092

Determinación del calor específico de un metal



Determinación del calor específico de un metal

Materiales

Un termo o sistema aislado (como los recipientes para conservar la comida) con un termómetro. 200 g de agua a temperatura ambiente, por ejemplo 20 °C. 70 g de cobre o de algún otro metal. Un calentador eléctrico de inmersión de 500/600W. Un recipiente de vidrio (tipo Pyrex). Pinzas de madera. Vasos de precipitado o probetas graduadas. Una balanza.

Procedimiento

1. Midan con la balanza la masa de agua a temperatura ambiente necesaria para realizar este experimento.

2. Coloquen el agua a temperatura ambiente dentro del termo.

3. Midan, usando la balanza, la masa del trozo de cobre.

4. Calienten el trozo de cobre dentro de un recipiente de vidrio (tipo Pyrex) con agua hasta 100 °C, en ese caso el cobre tendrá la misma temperatura.

5. Extraigan con las pinzas de madera rápidamente la masa de cobre y colóquenla dentro del termo con el agua a temperatura ambiente.

6. Mezclen los contenidos del termo para asegurarse la obtención de una temperatura uniforme.

7. Efectúen la lectura de la temperatura de equilibrio.

8. Realicen los cálculos necesarios para obtener el calor específico del cobre.

Contesten las siguientes consignas.

a. Expliquen en términos físicos qué sucedió en esta mezcla de sustancias dentro del termo.

b. ¿Qué calor específico obtuvieron?

c. Comparen con la tabla de valores aportada en este capítulo. ¿Coincide con el registrado?

d. Si no coincide, ¿a qué factores atribuyen las diferencias entre los resultados obtenidos?

e. ¿Cómo podrían mejorar estos resultados? Propongan algunas hipótesis para optimizar el diseño experimental.

4. En un calorímetro hay 200 g de agua a 20 °C. Se agregan 100 g de agua y se obtiene una temperatura de equilibrio de 30 °C. Calculen la temperatura de la masa de agua agregada.

5. Se toma un trozo de 50 g de un metal desconocido a 100 °C y se lo coloca en un calorímetro en el que hay 150 g de agua a 20 °C. El sistema llega a una temperatura de equilibrio de 25,3 °C. A partir de los datos de la tabla de la página 151 determinen de qué metal podría ser el trozo analizado.

6. Se colocan dentro de un horno de microondas dos vasos idénticos. Uno contiene 100 g de agua y el otro 100 g de alcohol, ambos a una temperatura de 15 °C. Al hacer funcionar el horno durante medio minuto, suministra a cada uno de ellos 1500 calorías. Determinen las temperaturas finales del agua y del alcohol.

7. Se colocan en un horno dos cubos de iguales masas, uno de aluminio y el otro de plomo, a iguales temperaturas de 20 °C. Al encenderse el horno, ¿cuál de ellos alcanzará primero la temperatura de 150 °C? Justifiquen su respuesta.

Propagación del calor ✕

La transmisión de energía por diferencia de temperatura entre cuerpos o sistemas que interactúan entre sí se produce a través de diferentes procesos como la conducción, o la convección.

Conducción

Si se coloca un extremo de una cuchara de aluminio en contacto con una hornalla encendida de la cocina rápidamente se advierte que el calor se transmite hasta el otro extremo.

En el sector de la cuchara en contacto con el fuego se produce un aumento de la temperatura, que hace que las partículas comiencen a vibrar con mayor energía cinética (energía de movimiento), y esta energía se transfiere a las restantes partículas de la región de menor temperatura.

Esta transferencia de energía sin desplazamiento de materia desde zonas de un cuerpo que se encuentra a mayor temperatura a las de menor temperatura se denomina **conducción**.

Algunos materiales presentan la propiedad de ser mejores **conductores** del calor que otros. Los malos conductores del calor se denominan **aislantes** (aunque cabe aclarar que la aislación nunca es perfecta).

Los metales en general son mejores conductores del calor que otros materiales como la madera, el vidrio, el corcho, el telgopor, etc.

Es por eso que, por ejemplo, se suele usar madera en los mangos de los utensilios de cocina para minimizar la transferencia de calor y evitar quemaduras en la piel.



Se denomina **conducción** a la transferencia de energía sin desplazamiento de materia de un cuerpo que se encuentra a mayor temperatura a otro que se encuentra a menor temperatura.

Se llama **aislantes** a los materiales que son malos conductores de calor.

El corcho, el telgopor, la lana de vidrio son utilizados en las construcciones de viviendas como aislantes del calor y para mantener una temperatura ambiente agradable. Algunos de estos materiales son bastante porosos, lo que implica que tienen espacios con mayor cantidad de aire que es un buen aislante.



Lana de vidrio



Corcho



Telgopor



Vidrio

También algunas prendas de abrigo, como las camperas o los cubrecamas, utilizan dos recubrimientos, entre los cuales se colocan algunos materiales porosos como goma espuma, plumas, telas entramadas que contienen una buena cantidad de aire que permite la aislación térmica del medio.



Algunos materiales conducen el calor con mayor facilidad que otros, así los metales tienen alta conductividad térmica comparada, por ejemplo con la capacidad de transmitir el calor de la madera, algunos plásticos, cerámicas, etc. La conductividad térmica del cobre es de $330 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$, la de la madera es de 0,1 a $0,3 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$ y la del telgopor $0,03 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$.

¿De qué factores depende la transferencia de calor por conducción en los materiales sólidos?
¿Se puede calcular?

No todos los materiales conducen el calor de igual forma. La conductividad térmica es una medida de la capacidad de conducir el calor de cada material.

Cuando una persona se encuentra en una habitación cuya temperatura ambiente es, por ejemplo, 20°C y toca con una mano un cenicero de cobre y con la otra un mantel, tiene

la sensación de que el cenicero está más frío que el mantel. Esto ocurre dado que como el cobre es un buen conductor térmico, el calor entregado por la mano a la zona de contacto del material se transmite rápidamente al resto del objeto. En cambio, como el mantel no es un buen conductor térmico, cuando se lo toca, la transferencia de calor al resto del material es muy lenta; la temperatura de la zona de contacto aumenta hasta equipararse con la piel y esto da la sensación de estar más caliente.



El cálculo es, por lo general, complicado. Pero si la transferencia de calor se produce en una sola dirección y la temperatura varía solo en esa dirección, se simplifica. Por ejemplo, si se considera un vidrio plano (como el de una ventana) se puede conocer qué cantidad de energía transferida

a través del vidrio va desde la superficie o cara de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. Para esto es necesario tener en cuenta el tipo de vidrio, ya que no todos tienen la misma conductividad térmica.

La cantidad de calor que se transmite por unidad de tiempo en este caso se puede simbolizar mediante la siguiente expresión matemática:

$$\frac{Q}{\Delta \tau} = K \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

donde τ es el tiempo (para no confundirlo con T de temperatura) $\frac{Q}{\Delta \tau}$ es la cantidad de calor transmitida a través del vidrio por unidad de tiempo; K es el coeficiente de conductividad térmica, que depende del material, en este caso del vidrio; S es la superficie perpendicular a la dirección de propagación, y $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ la variación de temperatura entre las caras dividida por el espesor del vidrio.

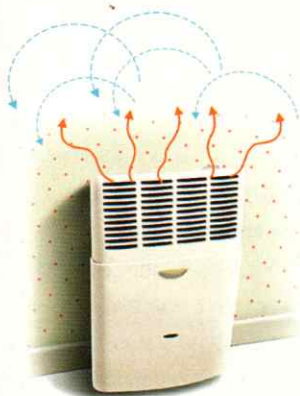


Se puede decir entonces que la cantidad de calor que atraviesa por unidad de tiempo una placa de vidrio, es mayor cuanto mayor sea la superficie considerada y la variación de temperatura entre sus caras, y cuanto menor sea el espesor o distancia entre dichas caras.

Convección

Se si desea colocar estufas en las habitaciones de una casa para calefaccionarla hay que decidir cuál es el lugar más adecuado para que se aproveche la energía de la mejor manera posible.

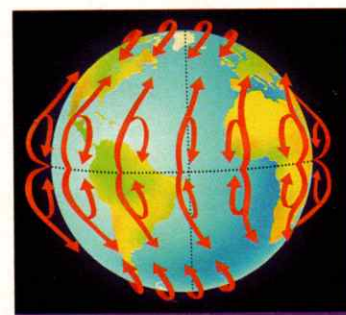
Es necesario tener en cuenta no solo las dimensiones de las habitaciones que se desean calefaccionar sino también el fenómeno físico que se denomina transmisión de calor por **convección**.



La masa de aire cercana a la estufa aumenta su temperatura, por lo cual el aire se torna menos denso que el resto de aire alejado de la estufa.

Se origina así, un movimiento ascendente y descendente de la masa de aire y se generan las denominadas **corrientes convectivas** con un permanente desplazamiento de materia.

Este fenómeno se puede observar también en las capas de aire que rodean la Tierra que provocan cambios climáticos según sus características. Estas masas de aire pueden ser más cálidas en ciertas zonas que en otras, más húmedas (por contener mayor cantidad de vapor de



agua), más secas, de mayor o menor presión.

La temperatura del aire puede ser influida por la propiedad de la superficie terrestre, hecho que es muy relevante para algunos estudios meteorológicos.

Estas corrientes convectivas que naturalmente se forman en la atmósfera son factores que tienen en cuenta por ejemplo las aves, los aladeltistas, y otros deportistas que aprovechan las condiciones del aire para elevarse. Esto ocurre dado que al encontrarse con una masa de aire caliente ascienden con más facilidad, y de esta forma "ahorran" energía y pueden mantenerse en vuelo planeando sin tanto esfuerzo.

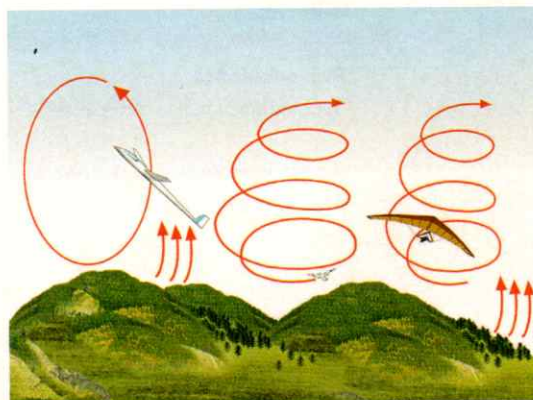
La convección se produce tanto en los gases como en los líquidos.

Es sencillo observar que cuando se calienta agua en algún recipiente



de vidrio transparente, se produce un movimiento ascendente desde la parte inferior, en contacto con la llama de fuego hacia la parte superior del recipiente.

La masa líquida de mayor temperatura se dilata, por lo que disminuye su densidad, asciende dentro del recipiente y tiende a desplazar hacia la parte inferior a la masa de agua líquida de menor temperatura.



¿Otra forma de transmisión del calor?

Algunos científicos consideran que más que una forma de transmisión del calor, la **radiación**, a la que ya se ha hecho referencia anteriormente, implica una manera de intercambio de energía más general.

Esta transferencia de energía no se da por intercambio de calor entre cuerpos que se encuentran a distintas temperaturas, ni por trabajo. Involucran transferencias de energía por medio de ondas electromagnéticas. Así por ejemplo, entre dos antenas se transfiere energía por radiación.



¿El agua es un buen conductor térmico?

Materiales

Tubo de ensayo. Trocitos de hielo. Una moneda. Agua. Mechero o calentador.

Procedimiento

1. Coloquen en el tubo de ensayo los trocitos de hielo cubiertos por la moneda.

2. Agreguen un poco de agua.

3. Acerquen la parte superior del tubo al mechero o calentador.

Resuelvan las siguientes consignas.

a. ¿Qué ocurre cuando el agua hierve?

b. Describan este fenómeno en términos físicos.

Corrientes convectivas en líquidos

Materiales

Agua. Recipiente. Trocitos de tiza de color o yerba mate. Mechero o calentador.

Procedimiento

1. Coloquen agua en un recipiente.

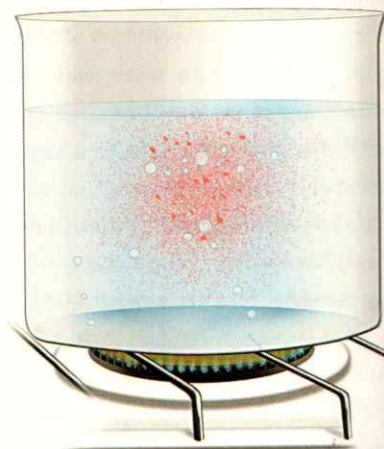
2. Agreguen trocitos de tiza de color o un poco de yerba mate.

3. Coloquen el recipiente al fuego hasta que hierva el agua.

Resuelvan las siguientes consignas

a. ¿Qué ocurre cuando el agua hierve?

b. Describan este fenómeno en términos físicos.



Transmisión de energía por radiación

Materiales

Dos latitas de gaseosa vacías. Un poco de agua. Pintura o cartulina negra. Mechero o calentador. Termómetro.

Procedimiento

1. Tomen una de las latas y píntenla de negro o fórrenla con la cartulina negra.

2. Anoten la temperatura inicial del agua.

3. Coloquen la misma cantidad de agua en las dos latas.

4. Pongan a calentar las dos latas a igual distancia del fuego.

5. Controlen la temperatura del agua en cada lata cada 10 minutos.

Resuelvan las siguientes consignas.

a. ¿Coinciden los registros de temperatura de ambas latas?

b. ¿Por qué? Justifiquen su respuesta.



Los cambios de estado

Los materiales se presentan básicamente en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Estos estados no son una característica invariable de los cuerpos ya que pueden modificarse, por ejemplo si se varía la temperatura y la presión a la que están sometidos dichos cuerpos. Por ejemplo, se puede fundir hierro si se lleva su temperatura a más de 1500 °C.

Una característica de los líquidos es la relativa libertad de movimiento de sus moléculas. Si se suministra calor a un líquido y se logra aumentar la temperatura, también aumentará el movimiento de sus moléculas, las que pueden escapar de la superficie líquida. Este proceso que se da en la superficie del líquido se llama **evaporación** y puede ocurrir a cualquier temperatura.

A medida que aumenta la temperatura se modifica la estructura de enlace entre las moléculas. Ellas no pueden mantenerse lo suficientemente cerca entre sí para que la sustancia continúe líquida, lo que provoca que las moléculas escapen aún más fácilmente al aire. Este es el fenómeno de **ebullición**, y es conveniente resaltar que la temperatura en la que este proceso ocurre, llamada **temperatura de ebullición**, se mantendrá estable en determinadas condiciones de presión.

Todo este proceso corresponde al cambio de estado denominado **vaporización**.

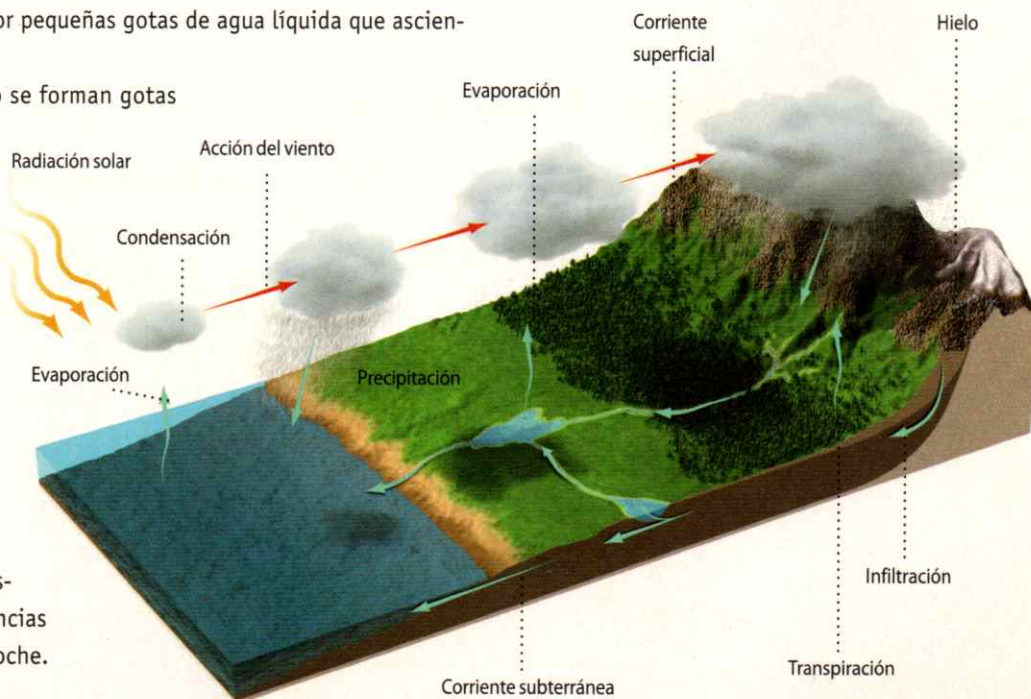
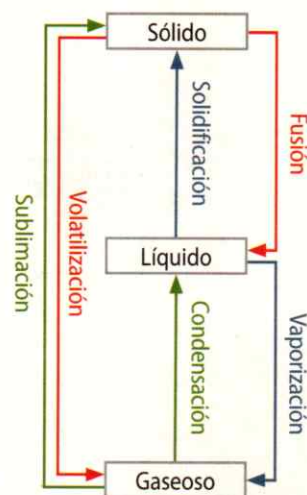
Cada sustancia tiene su propio punto de ebullición, punto de fusión y punto de solidificación que corresponden a las temperaturas y presiones en que se producen los cambios de estado.

El ciclo del agua, o ciclo hidrológico

Es muy común ejemplificar los cambios de estado con el agua, para lo que suele aprovecharse el llamado **ciclo hidrológico** o **ciclo del agua**, que se produce en la naturaleza y en el que se diferencian los siguientes fenómenos.

- El agua se evapora continuamente, pasando de estado líquido a gaseoso.
- Las nubes están formadas por pequeñas gotas de agua líquida que ascienden por las corrientes de aire.
- La lluvia se produce cuando se forman gotas más grandes que precipitan.
- La nieve y el granizo se forman cuando la temperatura es muy baja y se solidifican las gotas de agua líquida.
- La niebla se produce en lugares con altos porcentajes de humedad y trae aparejada una disminución en las temperaturas.
- El rocío o la escarcha se producen por la condensación o solidificación del agua de la atmósfera debido a las marcadas diferencias de temperatura entre el día y la noche.

Las posibles transformaciones de un estado a otro son las siguientes:



Calor de fusión y calor latente de vaporización

Cada cambio de estado se acompaña de un intercambio de energía entre el sistema y el medio exterior. Por ejemplo, se necesita energía para fundir el hielo. De esta forma se pueden contrarrestar los efectos de las fuerzas que mantienen las moléculas de agua en posición fija en el sólido.

Si las moléculas de un sólido absorben suficiente energía, es posible que las fuerzas de atracción entre moléculas ya no puedan mantener su unión, entonces se produce el pasaje de estado sólido a líquido.

La vaporización también necesita energía, y sucede algo similar con las fuerzas de atracción que mantienen las moléculas cercanas entre sí en la superficie del líquido.

Un aumento de energía puede ocasionar que las moléculas escapen del líquido para transformarse en moléculas de vapor.

En la medida en que aumentan las fuerzas intermoleculares, la cantidad de energía necesaria para generar un cambio de fase también se incrementa.

En otros casos, para poder cambiar de estado, el sistema tiene que ceder energía al medio. Por ejemplo, el agua líquida debe ceder calor al medio para solidificarse.

Se denomina **calor latente de vaporización** a la energía intercambiada por unidad de masa para producir ese cambio de estado.

Por ejemplo, cada gramo de agua líquida a 100 °C y presión normal debe absorber 540 cal para convertirse en un gramo de agua en estado de vapor a la misma temperatura.

La evaporación se acompaña de un efecto de enfriamiento: en la medida que el agua se evapora absorbe calor del cuerpo del cual se evapora.

El alto calor latente de vaporización del agua, 540 cal/g, permite el enfriamiento de las plantas por evaporación, desde la superficie foliar, las que reciben gran cantidad de calor por efecto de la radiación solar. La transpiración es un importante fenómeno en la regulación de la temperatura de muchos seres vivos.

El calor latente de fusión del hielo es de 80 cal/g, esto significa que cada gramo de hielo a 0 °C debe absorber 80 cal para convertirse en un gramo de agua líquida a 0 °C.

De manera análoga, al ceder 80 cal cada gramo de agua líquida se transforma en hielo sin modificarse la temperatura.

Se puede decir que el calor latente l indica una medida de la cantidad de calor por unidad de masa que se necesita para cambiar de estado sin modificar la temperatura.

Esto puede expresarse mediante la siguiente fórmula:

$$l = \frac{Q}{m} \quad \text{o lo que es equivalente} \quad Q = l \cdot m$$

donde l es el calor latente, Q es el calor y m la masa del cuerpo.

Sustancia	Pto.de fusión (°C)	Calor de fusión (cal/g)	Pto.de ebullición (°C)	Calor de vaporización (cal/g)
Hidrógeno	-259,1	13,9	-262,7	106,7
Oxígeno	-218,4	3,3	-183,0	51
Agua	0,0	80	100,0	359,4
Mercurio	-38,9	2,8	359,9	69,7
Plomo	327,4	5,9	1620	-

Sustancia	Pto.de fusión (°C)	Calor de fusión (cal/g)	Pto.de ebullición (°C)	Calor de vaporización (cal/g)
Plata	960,5	26	1950	552
Cobre	1038,0	48,9	2595	1145
Hierro	1535	63,7	3200	1110
Tungsteno	3390	45,7	5900	460

El intercambio de calor en una casa

El hombre puede vivir en diversas regiones de la Tierra, desde los trópicos hasta los polos, en los bosques y en el desierto, en las llanuras o montañas. Aun cuando las condiciones climáticas resulten hostiles, el ser humano diseña y construye sus viviendas para protegerse de las inclemencias del tiempo aprovechando los materiales de la zona.

La historia, la tradición y las modas arquitectónicas contribuyen a determinar la forma y el tipo de las construcciones.

¿Con qué materiales se construye una casa?

¿Por qué para un determinado uso y función se requieren distintos tipos de materiales?

En los últimos años, la preocupación de los arquitectos, y también de los científicos a la hora de proyectar un edificio se manifiesta en la obtención y aprovechamiento de los materiales con el fin de optimizar el uso de energía en las viviendas.

La sociedad moderna requiere grandes cantidades de energía para su funcionamiento normal, pero es importante reflexionar sobre el uso óptimo y racional de las fuentes de energía como el carbón, el gas natural, el petróleo y todos sus derivados, ya que no son renovables.

Se estima que el petróleo y el gas natural alcanzarán para unos 50 a 100 años más, mientras que el carbón para unos 200 a 300 años más. Mantener las viviendas calefaccionadas durante el invierno forma parte del bienestar de las personas y optimizar la energía disponible

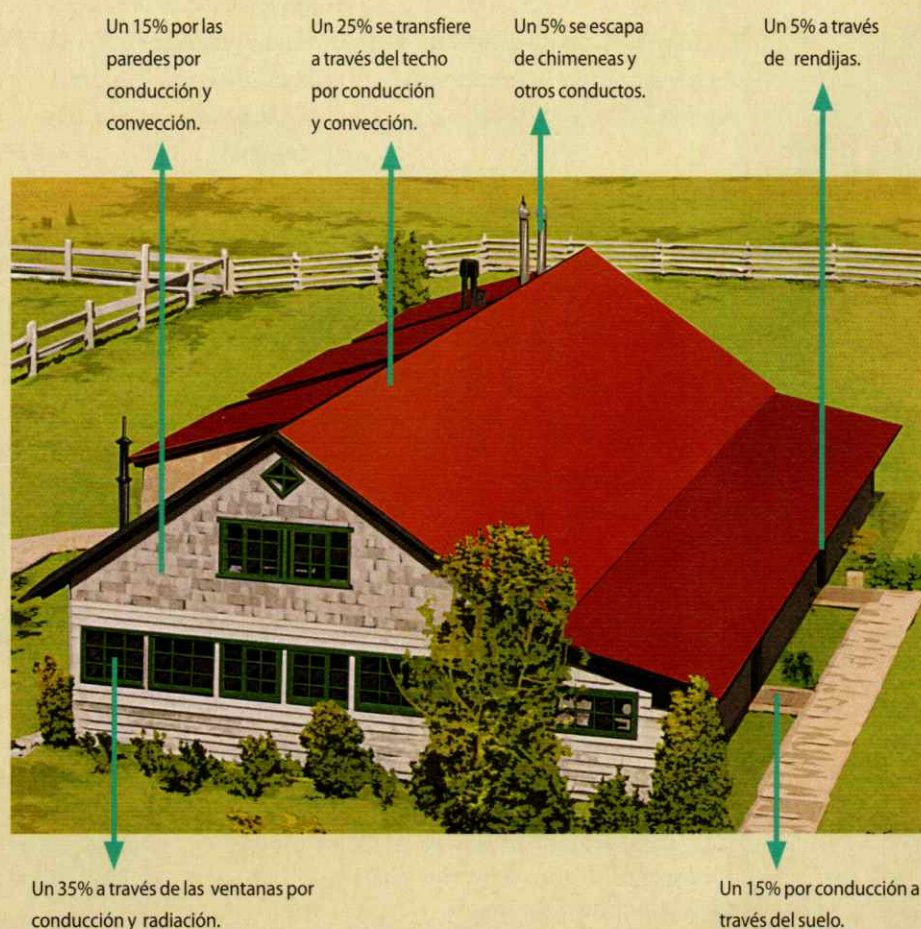
en una casa depende del cuidado de los recursos utilizados para este fin. Es importante tener una adecuada aislación térmica en todos los lugares posibles de fuga o pérdida de calor, sobre todo del techo, dado que el aire caliente es más liviano y tiende a subir. Existen actualmente en el comercio variedades de aislantes térmicos que reducen esas pérdidas y permiten ahorrar

energía. Entre ellos el telgopor, las maderas, los plásticos, las planchas de corcho, las fibras de vidrio, los ladrillos huecos, refractarios, etc.

¿Cuáles son los intercambios de energía en forma de calor que se dan en una casa?

¿Cuánta energía se transfiere al exterior?

En una casa típica se disipa calor al exterior según se muestra en el siguiente esquema.



¿De qué depende la mayor o menor cantidad de energía transferida?

Los arquitectos e ingenieros consideran que la transferencias de energía desde el interior hacia el exterior dependen fundamentalmente de los siguientes factores.

■ La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la habitación.

Cuanto mayor es esta diferencia, mayor es el flujo de energía y más rápido se produce el intercambio.

■ Las superficies de los distintos materiales que componen la habitación.

Cuanto mayor es la superficie, mayor transferencia de energía al exterior.

■ El tipo de material empleado.

La energía en forma de calor que se transfiere por segundo, desde cualquier habitación a otra se puede calcular mediante la siguiente expresión, que es similar a la presentada en conductividad térmica.

$$P = K \cdot S \cdot \Delta t$$

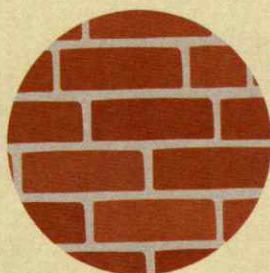
donde P es la energía en forma de calor transmitida por unidad de tiempo, Δt es la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior de la habitación, S es la superficie de los materiales que componen la habitación, y K es un coeficiente característico del material utilizado.

Los profesionales utilizan tablas con los valores K de algunas estructuras utilizadas habitualmente en la construcción de una casa como las de la tabla.

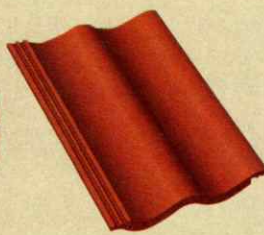
Típos de estructura	Valores K (w (m ² · °C))
Techo de tejas sin aislamiento.	2,2
Techo de tejas con aislamiento.	0,45
Ventanas con vidrio de 6 mm.	5,6
Ventanas con vidrios dobles con 20 mm de separación.	2,8
Pared de ladrillos con yeso (114 mm).	13,24
Doble pared de ladrillos con cámara de aire de 280 mm.	1,7
Doble pared de ladrillos con aislamiento en el hueco.	0,6
Piso de cerámica sobre viguetas.	4,2
Piso de madera sobre viguetas.	1,7



Espuma aislante.



Muro de ladrillos.



Tejas para techo.



Casa construida.



Luego de la lectura del texto:

a. Sugieran posibles soluciones para prevenir las transferencias de energía desde el interior de las viviendas hacia el exterior.

b. Confeccionen una lista de las partes de una casa que pueden llevar aislantes térmicos y averigüen con qué materiales están fabricados.

c. Realicen un diseño experimental para calcular la energía que se transfiere del interior al exterior de su casa.

d. Describan sus diseños y busquen información sobre uso de materiales en la construcción de viviendas según sus propiedades y usos.

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ La **temperatura** es una variable de estado del cuerpo relacionada con la energía cinética del movimiento de sus partículas.

■ Los cuerpos no tienen frío ni calor, tienen bajas o altas temperaturas.

■ Un **termómetro** es un instrumento que se utiliza para medir la temperatura.

■ Generalmente los cuerpos se **dilatan** cuando aumenta su temperatura, y se **contraen** cuando disminuye su temperatura.

■ Se denomina **calor** a la forma de intercambio de energía entre dos cuerpos de distintas temperaturas que se ponen en contacto térmico.

■ La transferencia de calor se da espontáneamente desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura.

■ Dos cuerpos de distintas temperaturas que intercambian energía logran el equilibrio térmico cuando equiparan sus temperaturas.

■ El **calor específico** o capacidad calorífica específica, c , de una sustancia es la cantidad de calor necesaria para variar su temperatura en una unidad por unidad de masa.

■ El calor se propaga por tres formas básicas: **conducción**, **convección** y **radiación**.

■ La **conducción** se produce cuando se transfiere energía en forma de calor desde las moléculas o partículas que se encuentran en zonas de mayor temperatura a las que se encuentran en zonas de menor de temperatura, sin desplazamiento de materia.

■ En los líquidos y gases se generan **corrientes convectivas** con desplazamiento de materia.

■ A los malos conductores del calor se los llama **aislantes** térmicos.

Fórmulas

$$T_c = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C} (T_F - 32^{\circ}\text{C})$$

Escala Celcius

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Dilatación líneal

$$T_F = 32^{\circ}\text{F} + \frac{9}{5}^{\circ}\text{F} T_c$$

Escala Farenheit

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t$$

Calorimetría

$$T_K = 273,15 + T_c$$

Escala termométrica

$$\frac{Q}{\Delta \tau} = K \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Cantidad de calor que se transfiere por conducción de un sólido.

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Si se colocan 1000 g de agua en un recipiente y 2000 g de agua en otro, ambos a 20 °C y se les entrega igual cantidad de calor en iguales condiciones de presión normal, ¿alcanzarán el mismo punto de ebullición? ¿Por qué?
2. ¿Por qué algunos vidrios como los llamados Pyrex no se rompen cuando se someten a elevadas temperaturas?
3. ¿Qué ocurriría si usamos un termómetro de mercurio contenido en un recipiente cuyo coeficiente de dilatación fuera similar al del mercurio?
4. ¿Por qué el agua no se emplea como sustancia termométrica?
5. Si colocan en un horno dos cuerpos de igual masa pero diferente calor específico, ¿cuál alcanzará primero la temperatura del horno? ¿Por qué?
6. ¿Por qué generalmente las estufas y radiadores se colocan en la parte inferior de la pared?
7. Los habitantes del desierto suelen cubrirse con varias capas de telas a modo de túnicas, por lo general claras. ¿Por qué razón se cubren tanto?
8. Si se saca un recipiente del horno con un trozo de tela mojado es probable que se sienta más "caliente" que si lo tomamos con una tela seca. ¿Qué explicación física tiene este hecho?
9. Algunos alimentos que compramos en los negocios de venta al público como restaurantes, se colocan en recipientes aislantes. ¿Por qué? ¿De qué material están hechos estos recipientes?
10. ¿Qué función cumple un termo? Justifiquen sus respuestas en términos físicos.
11. La temperatura de un día de invierno en la Antártida puede ser inferior a -50 °C. ¿A cuántos grados Fahrenheit corresponde?
12. Un termómetro está graduado en una escala °X tal que 20 °C corresponden a 30 °X, y 120 °C corresponden a 300 °X. ¿Cuál es el valor en la escala °X que corresponde a 50 °C? Justifiquen sus respuestas.
13. ¿Qué cantidad de calor absorbe un cuerpo de 50 g de hierro que se encuentra a una temperatura de 25 °C cuando su temperatura aumenta a 100 °C?
14. Calculen el calor específico de una sustancia sabiendo que una masa de 10 g absorbe 250 calorías cuando su temperatura varía 200 °C.
15. Una dieta normal para una persona adulta en actividad es de aproximadamente 2500 kcal diarias. ¿A cuántos joule equivale este valor energético?
16. Se mezclan 50 g de agua a 30 °C con 25 g de agua a 20 °C en un recipiente aislado. ¿Qué temperatura final tiene esa mezcla?
17. La longitud de un cable de acero es de 40 m a 22 °C. Determinen su longitud en un día en que la temperatura es de 34 °C. Consulten la tabla de coeficientes de dilatación lineal de la página 146.
18. Una barra de metal de longitud L_0 a 0 °C sufre un aumento de longitud de un centésimo de su longitud inicial cuando su temperatura es de 500 °C. ¿Cuál es el coeficiente de dilatación del metal?
19. ¿Cómo podrían comprobar que la cantidad de calor que intercambia un cuerpo para modificar su temperatura depende de la masa del cuerpo? Diseñen un experimento, describanlo y justifiquen sus hipótesis.
20. Según la teoría del calórico, el calor era considerado como una sustancialidad de los cuerpos. Teniendo en cuenta esta teoría diseñen un experimento que permita comprobar o refutar la siguiente hipótesis: "El calor que tienen los cuerpos pesa".
21. El valor calórico de una barra de 100 g de chocolate es 550 kcal. Supongan que se utilizara toda esa energía para elevar la temperatura del agua desde los 15 °C con que sale de la canilla hasta 100 °C, ¿cuánta agua se podría calentar?
22. Se le suministra a un cuerpo de masa m de cierto material, energía por valor de 100 joule y el cuerpo incrementa su temperatura en Δt . ¿Cuánta energía habrá que suministrarle a un cuerpo del mismo material cuya masa es el triple de la del primero para que el aumento de temperatura sea la mitad que en el primer caso?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	La temperatura es una medida del grado de calor que tienen los cuerpos.	V	X
2	Existe un límite para el descenso de la temperatura y es el 0 grado absoluto.	F	
3	Masas iguales de diferentes sustancias a iguales temperaturas requieren distintas cantidades de calor para alcanzar una misma temperatura.	V	
4	La sensación térmica que proporciona la piel es una variable muy precisa si se quiere conocer la temperatura de algún objeto.	F	X
5	El frío significa en términos físicos, que el cuerpo no tiene calor.	V	X
6	El calor es la energía que intercambian los cuerpos que se encuentran a distinta temperatura.	V	X
7	El calor se transfiere espontáneamente desde los cuerpos a menor temperatura hacia los de mayor temperatura.	F	X
8	Siempre que varios cuerpos a distintas temperaturas se pongan en contacto térmico suficiente tiempo, se logra una temperatura de equilibrio.	V	X
9	La radiación es el intercambio de energía en forma de calor.		X
10	La energía no se propaga en el vacío.	F	
11	No todas las sustancias absorben o ceden calor de igual forma.	V	
12	La dilatación es un fenómeno que se da solo en los sólidos.		X
13	En la propagación del calor por conducción se desplaza materia.	F	
14	La capacidad calorífica de una sustancia es la cantidad de calor necesaria por unidad de masa para variar su temperatura un grado Celsius.	V	
15	Cuando los líquidos y los gases se dilatan aumentan su densidad, ascienden y desplazan materia a menor temperatura.	V	
16	El aire es un buen conductor del calor.	F	
17	Los materiales aislantes son aquellos que minimizan el intercambio de energía con el medio.	F	
18	Para que se produzca un cambio de estado en la materia es necesario aumentar su temperatura.	F	X
19	El punto de ebullición del agua en condiciones normales de presión y temperatura es 100 °C. Variando estas condiciones, este punto puede cambiar.	V	
20	El agua en estado líquido absorbe calor del medio para solidificarse.	F	X

La ciencia es una tentativa en el sentido de lograr que la caótica diversidad de nuestras experiencias sensoriales corresponda a un sistema lógicamente ordenado.

Albert Einstein

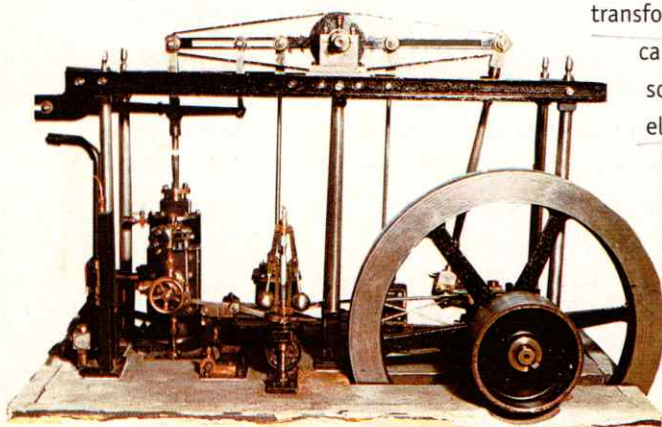
CONTENIDOS

- Termodinámica
- Los gases y la teoría cinético-molecular
- Energía interna de un sistema
- Relación entre trabajo, calor y energía interna
- Primer Principio de la Termodinámica
- Procesos termodinámicos
- Máquinas térmicas
- Segundo Principio de la Termodinámica
- Entropía
- Ciclo de Carnot
- Máquinas frigoríficas

9

TERMODINÁMICA

En la máquina de Watt el vapor se condensa en un recipiente especial llamado condensador y se conecta a un cilindro mediante un tubo que se cierra en sus extremos.



El mecánico inglés Tomás Savery (1650-1715), construyó en 1698 una máquina para bombear agua de las profundidades de las minas. Utilizó la presión del vapor para generar energía mecánica con fines industriales. La máquina de Savery fue perfeccionada por Thomas Newcomen (1663-1729) y se utilizó en muchos países europeos durante casi un siglo. El mecánico escocés James Watt (1736-1819), mientras reparaba una máquina de Newcomen, se dio cuenta de que el rendimiento de este sistema era poco satisfactorio. Por lo tanto, en 1765 construyó su propia máquina perfeccionando el mecanismo anterior.

Esa época fue decisiva para la física, ya que los científicos comprendieron que muchos fenómenos mecánicos, ópticos, eléctricos o magnéticos podían interpretarse con el mismo concepto de energía. En todos estos procesos se producen intercambios y transformaciones de energía en un mismo sistema o entre sistemas. Se desarrolló así la **termodinámica** como ciencia a fines del siglo XVIII y principios del XIX, debido a la necesidad de aprovechar las transformaciones de energía térmica y mecánica. Los aportes de la termodinámica son muy amplios si se desean conocer los principios energéticos de diversos sistemas, como por ejemplo, un motor, una máquina, un ecosistema, o el universo.

En el siglo XVII se aceptaba que el calor era una manifestación del movimiento. Los científicos de la época mantuvieron la idea de Galileo, que opinaba que el calor estaba asociado con la agitación de las pequeñas partículas de materia que componen a todos los cuerpos. Con la llegada del siglo XVIII se produjo un cambio de concepción sobre la teoría de la combustión, basada en la hipótesis de la existencia de una *materia ígnea*, sin peso, que poseerían la madera, el carbón y la pólvora, a la que llamaron **flogisto**.



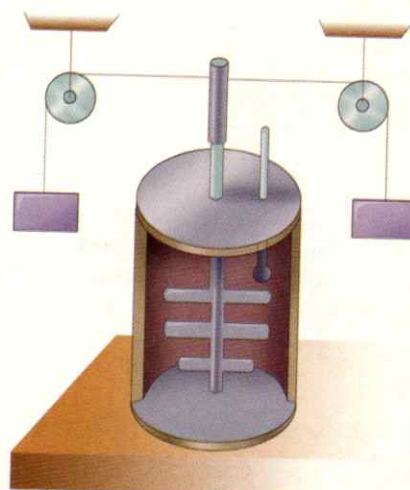
Cámara frigorífica.

Años más tarde, alrededor de 1787, el químico Joseph Louis Lavoisier (1736-1813) llamó **calórico** a esa sustancialidad de la materia que fluiría desde los cuerpos de mayor temperatura a los de menor temperatura. Sin embargo, la teoría del calórico fue fuertemente criticada en 1798 por Benjamin Thompson (1753-1814), quien contempló la gran cantidad de calor liberada al fabricar los cañones de guerra. Ordenó que se preparara un cañón de latón que introdujo en dos galones de agua fría que giraban contra una fresa de acero despuntada. La temperatura del agua aumentó hasta llegar a hervir. Los defensores de la teoría del calórico sostenían que el calórico era extraído del latón por la fresa, pero Thompson demostró que se podía seguir generando calor mientras se realizaba el trabajo. No era posible que el latón tuviese una cantidad inagotable de una sustancia como el calórico. Julius Robert Mayer, en su primer ensayo escrito en 1842, desafió también a la teoría del calórico y propuso que las distintas formas de energía eran cuantitativamente indestructibles y cualitativamente convertibles. Así comenzó a imponerse el concepto de energía sobre el del calórico.

Alrededor del 1850 el rigor de las investigaciones de James Prescott Joule (1818-1889), junto con la aceptación creciente de la teoría cinética, pusieron de manifiesto la equivalencia del trabajo y el calor, y dejaron atrás las ideas sobre el calórico. Joule utilizó un aparato con unas pesas que, al caer, hacían girar un conjunto de paletas sumergidas en agua. La disminución de la energía mecánica debida al rozamiento se calculaba a partir del peso de las pesas y las alturas de las cuales caían. Conociendo la masa de agua y el aumento de su temperatura pudo determinar la cantidad de calor equivalente al trabajo realizado por las pesas. Los resultados aportados fueron traducidos a las actuales unidades:

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

Es decir 4186 joule de energía, o 1000 cal, elevan 1°C la temperatura de 1 kg de agua.



Aparato utilizado por Joule para medir el equivalente mecánico del calor.

Los gases

Una masa de gas ocupa un volumen que depende de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentra. Las leyes de los gases estudian el comportamiento de un gas si se mantienen constantes algunas magnitudes y se varían las restantes. Estas leyes, junto con la teoría cinético-molecular, permitieron establecer un modelo de partículas que se empleó para comprender y explicar la naturaleza de la materia.

Ley de Boyle: evolución de un gas a temperatura constante

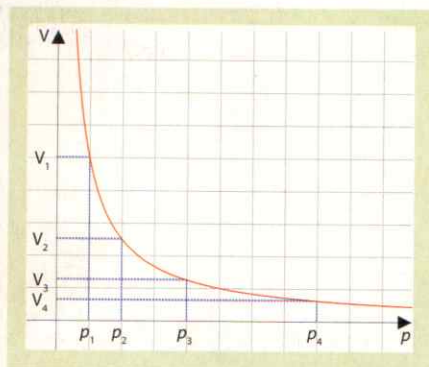
Robert Boyle (1627-1691) observó que si se comprime o se expande un gas a temperatura constante cuando la presión aumenta, el volumen se reduce y viceversa. Sus mediciones concluyeron en la ley que lleva su nombre y dice:

En una evolución a temperatura constante el volumen de una determinada masa de gas, es inversamente proporcional a la presión de ese gas.

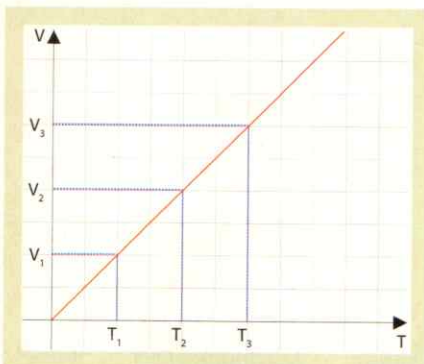
La expresión matemática de esta ley es:

$$p \cdot V = K \quad \text{o bien} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

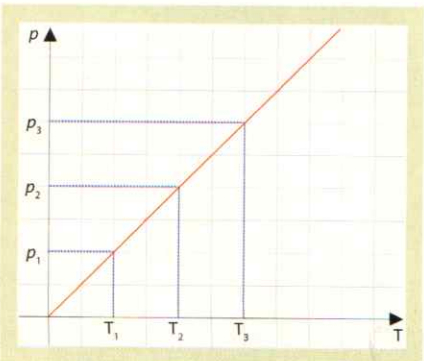
donde p indica la presión del gas, V su volumen y K es una constante.



Representación gráfica de la evolución de un gas a temperatura constante o isotérmica.



Representación gráfica de la evolución de un gas a volumen constante o isobárica.



Representación gráfica de la evolución de un gas a presión constante o isocórica.

Ley de Charles y Gay-Lussac: evolución de un gas a presión constante

Jacques Charles (1746-1823) y Joseph Gay-Lussac (1778-1850) observaron que el volumen de un gas a presión constante disminuye a medida que desciende la temperatura. Las mediciones efectuadas llevaron a enunciar la ley que vincula el volumen con la temperatura absoluta:

En una evolución a presión constante el volumen de una determinada masa gaseosa es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

La expresión matemática es la siguiente:

$$\frac{V}{T} = K \quad \text{o bien} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

donde V es el volumen del gas, T la temperatura y K es constante.

Ley de Charles y Gay-Lussac: evolución de un gas a volumen constante

Cuando se encierra un gas en un recipiente de tal manera que su volumen se mantiene fijo y varía su temperatura, se observan variaciones de presión. La ley que describe esta situación indica que:

En la evolución de un gas a volumen constante, la presión de una determinada masa gaseosa es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

La expresión matemática es la siguiente:

$$\frac{p}{T} = K \quad \text{o bien} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

donde p es la presión del gas, T la temperatura y K es constante.

Aplicación de las leyes de los gases

Un recipiente contiene 10 litros de gas a una presión de 1,5 atm. ¿Cuál será su volumen si manteniéndose la temperatura constante, la presión se eleva a 2 atm?

De este sistema se conocen: el estado inicial $V_1 = 10$ litros, $p_1 = 1,5$ atm y la presión en el estado final $p_2 = 2$ atm. Es necesario calcular el volumen del estado final, es decir, V_2 . A temperatura constante, según la ley de Boyle, se cumple que $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$.

Entonces, el volumen V_2 que se desea conocer es: $V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2}$

Como un litro equivale a $1 \text{ dm}^3 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ y una atmósfera de presión normal equivale a 101 300 Pa o bien 101 300 N/m², entonces:

$$V_2 = \frac{1,5 \cdot 101\,300 \text{ N/m}^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{2 \cdot 101\,300 \text{ N/m}^2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 7,5 \text{ litros}$$

Ecuación general de los gases ideales

Se dice que un gas se comporta como un **gas ideal** cuando cumple con las tres leyes anteriores. Un gas real se aproxima a uno ideal cuando se encuentra a baja presión y a alta temperatura. Siempre que la masa permanezca constante y la temperatura se exprese en escala Kelvin, la ecuación matemática, que combina los resultados de las tres leyes de los gases enunciadas, llamada **ecuación general de estado** es:

$$\frac{p \cdot V}{n \cdot T} = R \quad \text{o bien} \quad \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

donde P es la presión, T la temperatura, V el volumen, n es el número de moles y R es constante.

Como un mol de cualquier gas a 1 atm de presión y 273 K de temperatura ocupa un volumen de 22,4 litros, se pueden reemplazar estos valores en la ecuación anterior y se obtiene:

$$R = \frac{p \cdot V}{n \cdot T} = \frac{1 \text{ atm} \cdot 22,41 \text{ l/mol}}{1 \text{ mol} \cdot 273 \text{ K}} = 0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

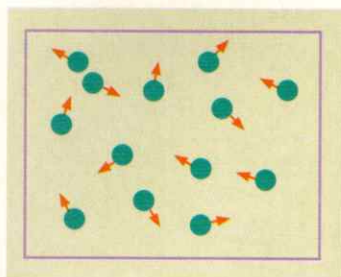
Como 1 litro = $1 \text{ dm}^3 = 0,001 \text{ m}^3$ y 1 atmósfera de presión normal es equivalente a 101 300 Pa o a 101 300 N/m², luego la constante en el sistema internacional se expresa como:

$$R = \frac{0,082 \cdot 0,001 \text{ m}^3 \cdot 101300 \text{ N/m}^2}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8,31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

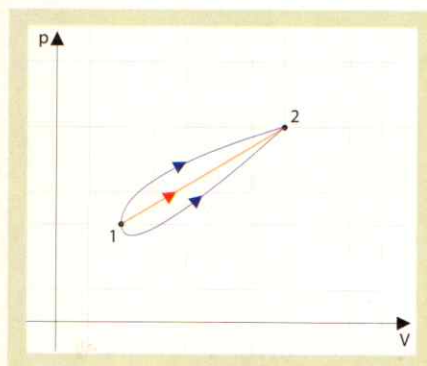
se abrevia **R** y se llama **constante universal de los gases ideales**.

La **ecuación general de los gases ideales** para n moles es entonces:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$



Modelo molecular de un sistema gaseoso, según la teoría cinético-molecular.



Representación gráfica de la evolución de un sistema al pasar de un estado inicial a otro estado final. La variación de la energía interna del sistema no depende de la transformación necesaria para cambiar su energía interna.

La teoría cinético-molecular

En 1868 el físico escocés James C. Maxwell (1831-1879) y el físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) retomaron una idea que había desarrollado en 1738 el suizo Daniel Bernoulli (1700-1782). Según este modelo los gases están formados por una gran cantidad de moléculas que se mueven al azar. Desarrollaron, así, la **teoría cinético-molecular** de los gases cuyos postulados principales son los siguientes.

- Las moléculas de los gases están muy separadas entre sí y entre ellas no existen fuerzas de atracción ni de repulsión. Las moléculas tienen masa, pero su volumen se considera despreciable comparado con el volumen total del gas. Las moléculas se mueven continuamente en línea recta y al azar, y chocan entre sí o bien con las paredes de los recipientes que las contienen. Se dice que están en permanente estado de agitación térmica. En un sistema gaseoso, las moléculas tienen diferentes velocidades y por lo tanto distintas energías cinéticas. La energía cinética promedio de dichas partículas es proporcional a la temperatura absoluta del gas. Es decir, a una misma temperatura, las moléculas de cualquier gas tienen la misma energía cinética media.

- La presión que el gas ejerce sobre el recipiente se debe a los choques de las moléculas con el recipiente en todas direcciones. Como los choques entre moléculas son elásticos, la energía cinética total del sistema se conserva; es decir, no cambia por efecto de estos choques.

La energía interna de un sistema

Los sistemas materiales están formados por partículas que poseen cierta cantidad de energía relacionada con sus movimientos y posiciones. La suma de todas las energías de todas las partículas que lo integran se denomina **energía interna** del sistema. Por ejemplo, en un proceso de combustión, la energía química de la sustancia combustible se transforma en energía interna de sus partículas. Se produce, entonces, un aumento de la velocidad de dichas partículas; o sea, aumenta la energía cinética de cada una, lo que implica un incremento de la temperatura. La variación de la energía interna del combustible se transfiere al mismo sistema o a otros sistemas en contacto. La energía interna depende del estado de cada sistema y no del estado de cada partícula, ya que es imposible medir la energía de cada una de las partículas que forman el sistema, pero se pueden analizar las variaciones de energía del sistema, al pasar de una situación o estado inicial a otra situación o estado final. Es importante señalar que: *la variación de la energía interna del sistema entre dos estados considerados es siempre la misma*; es decir, no depende de la transformación necesaria para pasar de un estado a otro.

Si un sistema sufre una transformación desde un estado a otro y después vuelve al estado inicial, la variación de la energía interna del sistema es cero. El estado de un sistema está determinado por las posiciones y movimientos de sus partículas. Si se llama U_1 a la energía interna de un sistema en el estado 1 y U_2 a la energía interna en el estado 2, la variación de la energía interna ΔU que sufre el sistema es siempre la misma, independientemente de las transformaciones necesarias para cambiar del estado 1 al estado 2.

Se puede expresar esta variación de energía interna de la siguiente forma:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$



1. ¿Cuántos moles de oxígeno ocupan un volumen de 10 litros cuando su presión es de 4 atmósferas y su temperatura de 27 °C?
2. Un tubo de 20 litros de volumen contiene 4 moles de gas a 300 K de temperatura. ¿Cuál es el valor de su presión?

3. Una masa de 0,1 mol de gas se encuentran en un recipiente con un émbolo. Se lo calienta hasta una temperatura de 400 K manteniéndose su presión en 1 atmósfera. ¿Cuánto vale su volumen en estas condiciones?

Cálculo de trabajo en la evolución de un gas

Los conceptos trabajo, calor y energía son muy importantes en el estudio de cualquier proceso termodinámico. Cuando se trabaja sobre un sistema, por ejemplo, cuando se comprime un gas o un resorte, la energía interna del sistema por lo general aumenta. En cambio, cuando el sistema trabaja sobre el medio -por ejemplo, al expandirse el gas-, la energía interna del sistema disminuye. Es importante señalar que en ciertos procesos el trabajo se hace sobre el sistema y en otros el trabajo es realizado por el sistema. De igual forma ocurre con el intercambio de energía en forma de calor. Se denominan **procesos exotérmicos** a aquéllos en los que un sistema libera calor al medio, y **procesos endotérmicos** a aquéllos en los que el sistema absorbe calor del medio.

Cuando un sistema intercambia energía en forma de calor y trabajo, se utiliza la siguiente convención de signos.

■ En un proceso endotérmico, es decir, si el sistema recibe calor del medio, el signo del calor (Q) es positivo. En los procesos exotérmicos -o sea, si el sistema cede o libera calor al medio- el signo es negativo.

■ Si el sistema realiza trabajo sobre el medio -se expande-, el trabajo (W) es positivo. Si, en cambio, el medio realiza trabajo sobre el sistema, o sea, si el sistema se contrae, el signo de trabajo es negativo.

Al analizar el sistema formado por un gas que está contenido dentro de un dispositivo provisto con una tapa móvil o émbolo, de manera que el volumen pueda variar, puede observarse que el gas ejerce presión sobre la superficie interior del recipiente y sobre el émbolo debido a los choques constantes de sus moléculas que están en continuo movimiento. Si el sistema se encuentra en equilibrio, la presión y la temperatura dentro del recipiente se consideran uniformes en todos sus puntos. Si se ejerce una fuerza sobre el émbolo y éste baja, el gas se comprime disminuyendo su volumen. Las moléculas del gas chocarán con mayor frecuencia y aumentan de este modo la presión. El sistema recibe energía del medio en forma de trabajo o por la acción de la fuerza externa y se produce un aumento de la energía interna del sistema.

El trabajo necesario para comprimir el gas es:

$$W = F_{\text{ext}} \cdot \Delta x \quad (1)$$

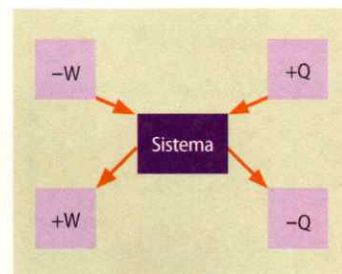
donde F_{ext} es la fuerza ejercida sobre el émbolo del sistema, Δx la distancia que se desplaza el émbolo, y W el trabajo.

Como además se sabe que $p = \frac{F}{S}$, siendo p la presión, F la fuerza y S la superficie, se puede escribir $F = p \cdot S$ y reemplazando en la expresión del trabajo (1) queda que: $W = p \cdot S \cdot \Delta x$

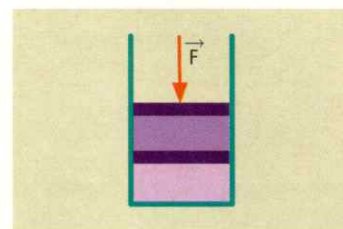
Pero $S \cdot \Delta x$ es el volumen desplazado, por lo cual el trabajo que produjo la variación de volumen en el gas es igual al producto de la presión por la variación de volumen, o sea:

$$W = p \cdot \Delta V \quad \text{o bien} \quad W = p \cdot (V - V_0)$$

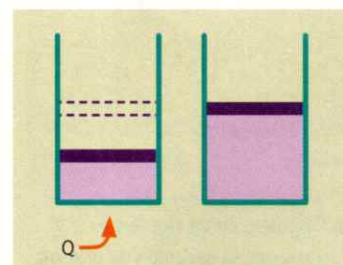
Según la convención adoptada, este trabajo es positivo cuando el sistema entrega energía al exterior y se expande, y negativo cuando la recibe y se comprime.



Convención de signos del calor y el trabajo.



Si se ejerce una fuerza sobre el émbolo, el gas se comprime.



Si se entrega calor al gas, éste se expande.

4. ¿Qué trabajo realiza sobre el medio una masa de gas contenida en un dispositivo cerrado, que se expande a una presión constante de 2 atm, desde un volumen de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ hasta $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$?



Primer principio de la termodinámica

Hay situaciones en las que la energía mecánica de un sistema se mantiene constante; por ejemplo, si un cuerpo asciende por un plano inclinado libre de rozamiento. En ese caso, la energía mecánica en la parte inferior tiene el mismo valor que en la parte superior o en cualquier otro punto de la trayectoria.

Aun en los casos en los que por acción del rozamiento la energía mecánica no se conserva, resulta posible hacer un balance energético de la situación anterior. Por ejemplo, si el cuerpo tiene 500 joule de energía mecánica en la parte inferior del plano y al llegar a la parte superior ese valor es de 400 joule, se puede afirmar que 100 joule de energía mecánica se han transformado en otra forma de energía, la energía interna del cuerpo y del piso que se han calentado por el frotamiento.

El **Primer Principio de la Termodinámica** constituye la extensión general del Principio de Conservación de la Energía. Y dice que si se considera la energía total intercambiada entre un sistema y el medio existe, un balance energético. O sea:

La energía intercambiada por un sistema es igual a la variación de su energía interna.

Este principio se expresa en forma matemática mediante la expresión:

$$Q - W = \Delta U \quad \text{o bien} \quad Q - W = U_2 - U_1$$

donde Q representa la energía intercambiada en forma de calor por el sistema, W representa la energía intercambiada en forma de trabajo por el sistema (en ambos casos se utiliza para su cálculo la convención de signos indicada anteriormente) y $\Delta U = U_2 - U_1$ es la variación de energía interna experimentada por el sistema si, debido al intercambio de energía, pasa del estado (1) al estado (2).

Como se ha indicado, la energía interna es una función de estado. Quiere decir que depende solo del estado inicial (1) y del final (2) para cualquier evolución que lleve al sistema de un estado al otro.

Cálculo de la evolución de la energía interna de un sistema

Calculen qué ocurre con la energía interna de un sistema al pasar de un estado (1) a otro (2) si para hacerlo absorbe 500 cal y realiza un trabajo de 600 J.

Como $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ entonces $500 \text{ cal} = 2090 \text{ J}$. Es decir que al sistema ingresan en forma de calor 2090 joule que, según la convención, se toman como positivos. El sistema realiza además un trabajo de 600 joule que por la misma convención resulta también positivo. El cálculo de lo que ocurrió con su energía interna se hace aplicando la expresión del primer principio de la termodinámica: $\Delta U = Q - W$.

Al reemplazar los valores se obtiene:

$$\Delta U = 2090 \text{ J} - 600 \text{ J} = 1490 \text{ J}$$

O sea, el sistema aumenta su energía interna en 1490 J como resultado del intercambio de energía con el medio.



5. Calculen, en las siguientes situaciones, la variación de energía interna de un sistema que evoluciona entre dos estados. Analicen en cada caso el significado del signo.

a. El sistema absorbe 500 calorías en forma de calor y el medio realiza un trabajo sobre el sistema de 800 joule.

b. El sistema absorbe 600 calorías en forma de calor y el sistema realiza un trabajo sobre el medio de 3000 joule.

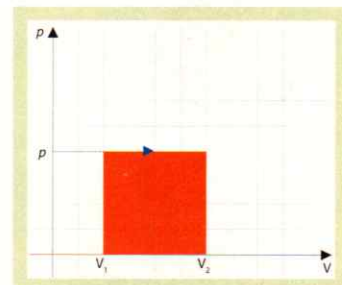
c. El sistema absorbe 1000 joule en forma de calor, cede al medio también en forma de calor 300 joule y el medio realiza un trabajo sobre el sistema de 600 joule.

Evolución isobárica

En un sistema formado por un gas encerrado en un dispositivo con un émbolo que puede desplazarse sin rozamiento, si se entrega calor, la temperatura del gas aumenta provocando que el émbolo se desplace desde una posición inicial a otra posición final. Al permanecer constante la presión del gas encerrado se produce una **evolución isobárica**. Por ejemplo, si el volumen inicial de un gas es $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ (es decir, equivalente a 1 litro de capacidad) a 2 atmósferas de presión (1 atmósfera de presión es equivalente a 101 300 Pa), y se expande hasta $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ manteniéndose constante la presión, el trabajo realizado por el gas sobre el émbolo es:

$$W = p \cdot \Delta V = 2 \cdot 101\,300 \text{ Pa} \cdot (3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 - 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) = 405,2 \text{ N} \cdot \text{m} = 405,2 \text{ J}$$

Este proceso isobárico se puede representar gráficamente en los ejes cartesianos considerando la presión en función del volumen. Como la presión se mantiene constante en todo el proceso, se obtiene una recta paralela al eje del volumen, llamada **isobara**. El trabajo está representado por el área de la figura obtenida.



Proceso isobárico.

Evolución isotérmica

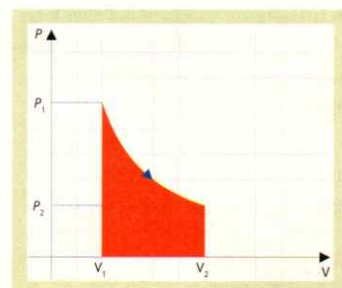
En un sistema formado por un gas encerrado en un dispositivo con un émbolo que puede desplazarse sin rozamiento, si la temperatura del gas permanece constante y se entrega calor al sistema, el gas se expande a medida que disminuye su presión.

En los gases ideales la variación de energía interna solo depende de la variación de la temperatura, por lo que para una evolución isotérmica $\Delta U = 0$, y la expresión del primer principio queda entonces:

$$Q = W$$

O sea, si la temperatura se mantiene constante durante una evolución, el calor intercambiado por el sistema es igual al trabajo.

El trabajo realizado está representado por el área de la figura que queda determinada bajo la curva que representa gráficamente esta situación.



Proceso isotérmico.

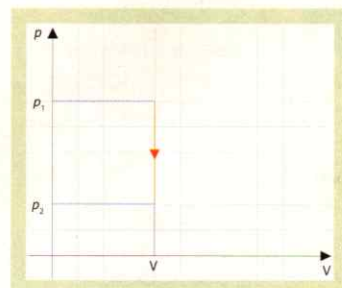
Evolución isocórica

En un sistema formado por un gas que no se expande encerrado en un dispositivo con un émbolo, el volumen permanece constante. Como no hay variación de volumen el sistema no realiza trabajo. Por lo tanto:

$$W = 0$$

Esto significa que todo el calor intercambiado produce variaciones en la energía interna del sistema. O sea, $Q = \Delta U$.

El trabajo es cero y se puede observar que no hay área encerrada bajo la curva que representa esta situación.



Proceso isocórico.

6. Calculen el trabajo realizado para comprimir un gas mediante una presión constante de 200 000 pascal desde un volumen de 50 litros a otro de 20 litros. Representen esta evolución en un sistema de ejes presión-volumen.

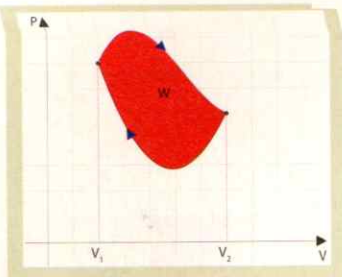
7. Calculen la energía en forma de calor que hay que entregarle a un gas para que a temperatura constante realice un trabajo de expansión de 5000 joule.

8. Si se le entrega a un gas encerrado en una garrafa energía en forma de calor por valor de 10 000 joule, ¿cuál es la variación de su energía interna?



Procesos termodinámicos especiales

Transformaciones cíclicas



Transformación cíclica. El trabajo realizado por el sistema es proporcional al área encerrada por la figura en el gráfico presión-volumen.

Cuando un sistema evoluciona de un estado inicial (1) a otro estado final (2) y regresa al estado inicial, se describe un **ciclo**. Si se desea calcular la variación de energía interna en ese ciclo, se obtiene: $\Delta U = U_2 - U_1 = U_1 - U_1 = 0$. Esto significa que la variación de energía interna es cero. Por lo tanto, si se considera la ecuación del Primer Principio de la Termodinámica, se deduce que como $Q - W = \Delta U$:

$$Q - W = 0 \quad \text{o bien} \quad Q = W$$

Esto significa que:

En una transformación cíclica completa, el trabajo realizado por el sistema es igual al calor total absorbido y la variación de su energía interna es cero.

Por ejemplo, las máquinas térmicas funcionan de modo tal que el sistema realiza transformaciones cíclicas. Durante cada ciclo se entrega calor a la máquina, ésta trabaja sobre algún otro cuerpo o sistema y luego vuelve al estado inicial. Si no ocurrieran estas transformaciones cíclicas, las máquinas térmicas serían muy grandes o realizarían muy poco trabajo.

Transformaciones adiabáticas

Una transformación se denomina **adiabática** cuando el sistema no absorbe ni cede calor al medio. En este caso, como $Q = 0$, de la ecuación del Primer Principio de Termodinámica se deduce que:

$$\Delta U = Q - W = 0 - W \quad \text{o bien} \quad \Delta U = -W$$

Esto significa que:

En una transformación adiabática la energía interna del sistema disminuye o aumenta una determinada cantidad que es igual al trabajo realizado por el sistema o sobre el sistema.

O sea, si el sistema trabaja sobre el medio, disminuye su energía interna. Esto ocurre porque, al no recibir calor del medio, el sistema realizará trabajo utilizando su propia energía. Si el sistema considerado es un gas ideal, una expansión adiabática provoca un descenso de la temperatura. En cambio, si el sistema recibe trabajo en forma adiabática, éste aumenta su energía interna. Si se tratara de un gas, éste aumentará su temperatura.

Transformaciones isométricas

Cuando un sistema no realiza trabajo, la variación de su energía interna es igual al calor absorbido; es decir, $\Delta U = Q$.

En un proceso a volumen constante -por ejemplo, cuando se calienta un sólido o líquido-, el trabajo de expansión es despreciable. Todo el calor absorbido produce un aumento de la energía interna. En consecuencia, también aumenta la temperatura.



9. Un sistema realiza una evolución cíclica completa y en ella recibe del medio exterior energía en forma de calor por valor de 1000 joule. ¿Cuánto vale el trabajo realizado durante el ciclo? ¿El trabajo es realizado por o sobre el sistema?



La disminución de la temperatura de un gas en una transformación adiabática tiene aplicaciones prácticas, como el funcionamiento de algunos sistemas de refrigeración. Por ejemplo, al producirse la rápida expansión de un gas, éste prácticamente no intercambia calor con el medio. Se puede suponer, entonces, una evolución adiabática. Realiza el trabajo a expensas de su propia energía interna, que al disminuir baja su temperatura.

Las máquinas térmicas

Una **máquina térmica** es un dispositivo capaz de transformar de manera cíclica parte del calor que recibe en trabajo mecánico. Para este fin, una máquina térmica requiere una fuente a alta temperatura, de la cual absorbe energía en forma de calor Q_1 , y un depósito a baja temperatura al cual entrega la energía restante Q_2 luego de transformar el calor en trabajo. De esta forma, el trabajo realizado por la máquina es $W = Q_1 - Q_2$.

Por ejemplo, los motores de combustión interna que utilizan la gran mayoría de los automóviles son máquinas térmicas que usan como combustible principalmente nafta o gasoil.

El principio de funcionamiento de los motores que utilizan nafta como combustible es el siguiente.

Una mezcla de aire y vapores de nafta (que se produce en una cámara de combustión) se enciende como producto de una chispa a muy alta temperatura. El calor que se genera se transmite al cilindro (el motor puede tener varios cilindros), que es un recipiente en el cual se desplaza un pistón. El pistón tiene forma de vaso invertido y está unido a la biela mediante un bulón. La biela está unida a un eje llamado cigüeñal que transmite el movimiento lineal de la biela en un movimiento rotatorio. Este dispositivo se cierra herméticamente mediante algunos segmentos o aros en su parte superior.

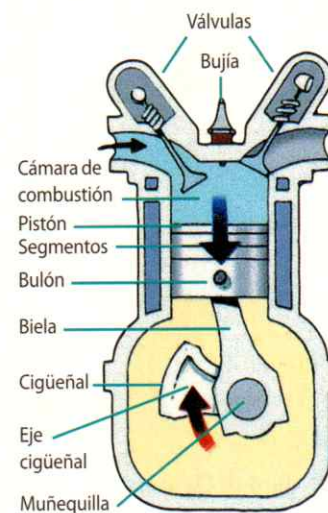
La mezcla de combustible y aire caliente se expande y empuja el pistón, así transforma su energía interna en mecánica.

Los motores tienen, además, válvulas de admisión y escape que permiten el ingreso del combustible y el egreso de los gases luego de la combustión. Los movimientos de apertura y cierre de las válvulas están controlados por un sistema mecánico sincronizado.

Para obtener energía mecánica en forma continua, el motor debe volver a su condición inicial, para lo cual expulsa la mezcla caliente y renueva el aire que utiliza. El pistón regresa a la parte superior del cilindro. Este proceso se repite cíclicamente.

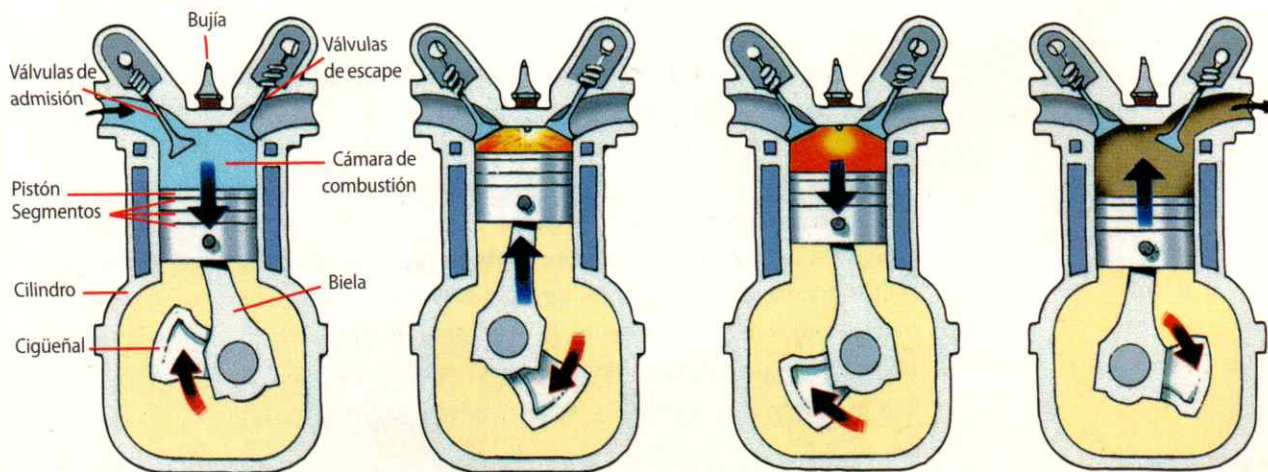
No todo el calor que recibe este sistema se convierte en trabajo mecánico. Los gases eliminados calientan el aire exterior y se libera también calor del motor al medio.

Todas las máquinas térmicas liberan calor. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía total intercambiada por el sistema y el medio es igual a la suma de la energía mecánica producida y el calor liberado.



Partes de un motor de combustión interna.

Los cuatro tiempos de un motor de explosión interna.



 **Rudolf Clausius** (1822-1888) fue uno de los fundadores de la Termodinámica. En 1850 enunció el Segundo Principio de la Termodinámica como la imposibilidad de flujo espontáneo de calor de un cuerpo frío a otro caliente sin la aplicación de un trabajo externo. En 1865 introdujo el término *entropía*, y demostró que la entropía del sistema se incrementa en un proceso irreversible. Llevó a cabo investigaciones sobre la teoría cinética de los gases y los fenómenos electroquímicos.

Segundo principio de la termodinámica

Cuando dos cuerpos que están a distintas temperaturas se ponen en contacto térmico, la energía pasa en forma de calor espontáneamente desde los cuerpos a mayor temperatura hacia los de menor temperatura.

Si, por ejemplo, en invierno se coloca un vaso de agua caliente sobre una mesa, el calor se transmite desde el agua hacia el aire, de forma tal que el agua se enfría y el aire se calienta. Nunca se ha observado el proceso inverso; esto es, que el agua se caliente y el aire se enfríe aún más.

Muchos hechos y fenómenos de la vida diaria ocurren de manera natural en un sentido y, si sucedieran en forma contraria, sin duda asombrarían. Nadie se asombra si al tomar una cuchara metálica y colocarla en contacto con la llama de una cocina encendida, el calor se propaga hasta el otro extremo de la cuchara en contacto con la mano. Sin embargo, llamaría mucho la atención si al tocarla se sintiera frío. Del mismo modo, el aire caliente que libera una estufa tiende a expandirse. Sería raro que el gas se concentrara en un volumen reducido cercano a la estufa.

Si estos fenómenos ocurrieran así, no se contradicen con el Primer Principio de la Termodinámica porque el calor cedido por un cuerpo tiene que ser el mismo que el calor que gana el otro cuerpo.

Estas situaciones no solo ocurren en intercambios de calor sino también cuando se producen procesos que impliquen variaciones de otras formas de energía. Por ejemplo, cuando una pelota es pateada, después de recorrer algunos metros queda detenida. La energía cinética con que partió la pelota se fue transformando en energía interna de la pelota, el piso y el aire. Sin embargo, no se da la situación que lleve el proceso al revés aunque esto no estaría en contradicción con el Primer Principio de la Termodinámica. En esa supuesta situación, la pelota detenida comenzaría a moverse hacia el que la ha pateado, enfriándose y enfriando el piso y el aire para llegar a sus pies con la misma energía cinética con que había partido.

En muchos casos puede ocurrir que aun cuando la energía se conserva los fenómenos no son posibles.

El Segundo Principio de la Termodinámica establece el sentido posible en que se producen los hechos y fenómenos. Este principio puede ser enunciado de distintas formas. Se puede afirmar entonces que en los procesos espontáneos la transferencia de calor siempre se da desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura.

El físico alemán Rudolf Clausius (1822-1888) propuso en 1850 el siguiente enunciado:

No existe ningún proceso cuyo único efecto sea el pasaje de calor desde un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.

Para poder explicar por qué algunos fenómenos se dan espontáneamente y otros no, Clausius propuso el concepto de **entropía**. La variación de la entropía de un sistema permite estudiar el sentido en que se produce un fenómeno o transformación espontáneo.

Los procesos naturales ocurren en la dirección en la cual aumenta la entropía total del sistema más la del medio exterior. De esta forma, la entropía y el Segundo Principio de la Termodinámica pueden interpretarse como manifestaciones de la probabilidad de que un evento ocurra.

Entropía

Cuando se dice que una máquina térmica transforma parte del calor en trabajo y cede el resto de la energía a las fuentes más frías, se dice, de algún modo, que la energía no se perdió. O sea, se conserva la energía del sistema constituido por la máquina más las fuentes, pero esa energía cedida ya no es útil para hacer funcionar la máquina otra vez en las mismas condiciones, con el mismo rendimiento o eficiencia.

El Segundo Principio de la Termodinámica hace hincapié en la calidad de la energía, ya que sostiene que la energía sufre deterioros en las sucesivas transformaciones que pueden darse en un sistema. En ese caso, se dice que la energía del sistema se ha **degradado**.

Es posible decir, también, que la energía organizada y útil del sistema se transforma en energía con menor grado de organización y, por lo tanto, menos útil.

En los procesos naturales la energía útil de mayor calidad tiende a transformarse en energía menos útil y en consecuencia de menor calidad; o sea, el orden tiende al desorden.

De acuerdo con lo propuesto por Clausius, para prever si una evolución es posible, habría que calcular la **variación de entropía** que tendrá el universo. Es decir, el sistema que evoluciona más el medio que interactúa con él durante dicha variación. Si esa entropía del universo aumenta, la evolución es posible. Si la variación de entropía fuese cero, sería una **evolución ideal**, factible de ser pensada pero que no ocurriría espontáneamente. Si la variación es negativa, entonces el proceso no es posible.

La variación de la entropía se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

donde ΔS es la variación de la entropía que experimenta el sistema más el medio, ΔQ es el calor que intercambia el sistema con el medio y T es la temperatura absoluta medida en K.

La entropía se mide entonces en J/K. Cuando un sistema sufre una transformación termodinámica, se calcula la variación de entropía que sufre dicho sistema y se le suma la que también sufriría el medio exterior. Si la entropía aumenta, esta suma tendrá un signo positivo. En cambio, si la entropía disminuye, el resultado de esta suma será negativo.

Aplicación del concepto de entropía

Se coloca 1 kg de agua a 100 °C dentro de un horno que se encuentra a 450 K. Calculen la variación de entropía experimentada por el universo cuando toda la masa líquida se convierta en vapor.

El calor latente de vaporización del agua es de 540 cal/g. Por lo tanto, la energía que intercambia 1000 g de agua con el horno es: $\Delta Q = 540 \text{ cal/g} \cdot 1000 \text{ g} = 540\,000 \text{ cal}$. La variación de entropía que sufre el agua es entonces:

$$\Delta S_1 = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{540\,000 \text{ cal}}{373 \text{ K}} = 1447,72 \text{ cal/K}$$

Como el horno cedió la misma cantidad de calor, su entropía es

$$\Delta S_2 = - \frac{540\,000 \text{ cal}}{450 \text{ K}} = - 1200 \text{ cal/K}$$

Por lo tanto, la variación de entropía que experimenta el universo es:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 144,77 \text{ cal/K} - 120 \text{ cal/K} = 24,77 \text{ cal/K} = 103,54 \text{ J/K}$$

El fenómeno es posible ya que esta suma tiene signo positivo, con lo cual la entropía del universo aumenta.

El ciclo de Carnot

Según el Segundo Principio de la Termodinámica, no hay ninguna máquina térmica que transforme todo el calor que se le suministra en trabajo mecánico. Solo una fracción del calor se puede convertir en trabajo y el resto de la energía se libera al medio.

Se denomina **rendimiento de una máquina** (η) a la relación entre el calor suministrado al sistema y el trabajo neto que el sistema realiza. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

donde W es el trabajo realizado y Q es el calor que recibe el sistema.

Teniendo en cuenta que el trabajo realizado por una máquina es $L = Q_1 - Q_2$ se deduce que:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Generalmente este rendimiento se expresa en términos porcentuales. Por ejemplo, si una máquina térmica recibe en cada ciclo una cantidad de calor $Q_1 = 10\,000$ joule y realiza un trabajo de 4000 joule, tiene un rendimiento de 0,4 o del 40%. Es decir que transforma en trabajo mecánico el 40% de la energía que recibe.

Aunque el Segundo Principio enunciado por Clausius expresa la imposibilidad de tener una máquina térmica con un rendimiento del ciento por ciento, el físico francés Nicolás Sadi Carnot (1796-1832) se cuestionó cómo lograr una máquina térmica de mayor rendimiento. En su célebre trabajo *Reflexiones acerca de la potencia motriz del fuego* (1824), comparaba el funcionamiento de las máquinas térmicas con las ruedas hidráulicas. Para que estas ruedas funcionen es necesario un desnivel de agua. De la misma forma, el calor puede producir trabajo mecánico solo si existe un desnivel térmico.

Carnot enunció sus conclusiones en un ciclo especial que llamó el **ciclo de Carnot**. En ellas argumenta que:

Si fuera posible construir una máquina que funcione según su ciclo, el rendimiento sería mayor que el de cualquier otra máquina.

Esta máquina debería intercambiar calor con el medio y realizar procesos de expansión y compresión del gas en forma reversible.

Para este fin, el ciclo de Carnot ABCDA debería estar formado por una expansión isotérmica (AB), una expansión adiabática (BC), una compresión isotérmica (CD) y una compresión adiabática (DA).

Carnot concluyó que una máquina ideal sería como la que plantea y que en ella los calores Q_1 y Q_2 deben ser proporcionales a las temperaturas de las fuentes. Entonces, el rendimiento de la máquina sería:

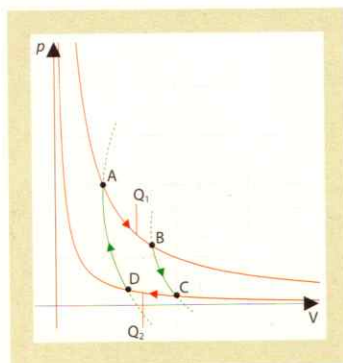
$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_{\text{frio}}}{T_{\text{cal}}}$$

En un ciclo reversible de Carnot siempre se cumple que:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Nicolás Sadi Carnot (1796-

1832) hizo un estudio del calor y del movimiento desde un punto de vista práctico. Publicó en 1824 el trabajo titulado *Reflexiones sobre la fuerza motriz del fuego*. Esta investigación despertó poco interés y fue aparentemente olvidada en la evolución de la ciencia. Sin embargo, fue resucitada 25 años después, y reconocida como una importante idea creadora. En la introducción a su trabajo, Carnot hacía notar que las máquinas de vapor de su tiempo habían adquirido una importancia vital para la industrialización del mundo, en aquel entonces en rápido desarrollo. También había logrado una gran mejora en la eficiencia de sus trabajos, gracias a diversas modificaciones de los diseños, y se propuso determinar hasta dónde podría llegar el límite si se continuaban logrando mejoras prácticas.



Ciclo de Carnot.

Aplicaciones del ciclo de Carnot

1. Calculen el rendimiento de un ciclo de Carnot que trabaja entre 1000 K y 500 K.

Como $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, entonces:

$$\eta = 1 - \frac{500 \text{ K}}{1000 \text{ K}} = \frac{1}{2}$$

Luego, $\eta = \frac{1}{2}$ o η es el 50 %. Esto significa que la mitad del calor va a la fuente fría.

2. ¿Cuál es el máximo rendimiento que puede alcanzar una máquina que realiza trabajo y toma calor de una fuente a 600 °C para calentar un depósito que se encuentra a 50 °C?

Las temperatura, en grados Kelvin, es: 600 °C = 873 K y 50 °C = 323 K, con lo cual el rendimiento η es:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{323 \text{ K}}{873 \text{ K}} = 1 - 0,37 = 0,63, \text{ es decir, } \eta \text{ es del orden del 63\%}.$$

3. Una máquina térmica funciona realizando un ciclo de Carnot. Las temperaturas de las fuentes son 500 K y 400 K. La máquina produce un trabajo neto de 1000 J.

- ¿Cuál es el rendimiento de la máquina?
- ¿Qué cantidad de calor cede la fuente caliente?
- ¿Qué cantidad de calor se cede a la fuente fría?

Para resolver el ítem **a.**, es necesario calcular η . Para ello:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{400 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 1 - 0,80 = 0,20, \text{ es decir } \eta \text{ es del 20\%}.$$

En el ítem **b.**, como $\eta = \frac{W}{Q_1}$ donde W es el trabajo realizado y Q_1 es el calor que recibe el sistema, resulta que $Q_1 = \frac{W}{\eta} = \frac{1000 \text{ J}}{0,20} = 5000 \text{ J}$. Es decir, la fuente caliente cede 5000 J.

En el ítem **c.**, $Q_2 = W - Q_1 = 1000 \text{ J} - 5000 \text{ J} = -4000 \text{ J}$. Es decir, que el sistema entrega 4000 J al medio exterior.

4. El esquema de la figura representa una máquina que intercambia calor con las fuentes de temperaturas T_1 y T_2 . La máquina entrega 200 cal de trabajo al exterior absorbiendo 1000 cal de la fuente T_1 (a 500 K) y entregando 800 cal a la fuente T_2 que se halla a 300 K. ¿Es posible una máquina con estas características?

Como $\eta = \frac{W}{Q_1}$ donde W es el trabajo realizado y Q_2 es el calor que recibe el sistema, resulta que $\eta = \frac{200 \text{ cal}}{1000 \text{ cal}}$. Luego, $\eta = 0,20$ o 20%.

El máximo rendimiento según el ciclo de Carnot es:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 1 - 0,60 = 0,40$$

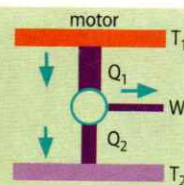
o bien η es del orden del 40%. Esta máquina térmica es factible, ya que su rendimiento es menor que el de una máquina de Carnot entre iguales temperaturas.

Procesos reversibles e irreversibles

Una transformación es **reversible** cuando puede invertirse su sentido sin modificar la magnitud del trabajo realizado ni el calor intercambiado entre el sistema y el medio.

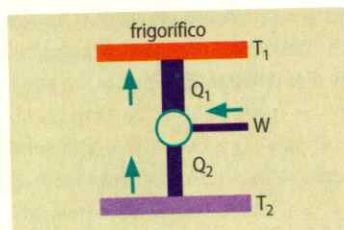
A nivel microscópico, pueden ocurrir ciertos desequilibrios internos pero cuyos resultados no afectan al equilibrio macroscópico del sistema. Por eso se dice que los procesos reversibles son ideales, pero existen procesos que pueden ser explicados mediante este concepto.

Cuando la entropía total de un sistema aumenta, el proceso inverso es imposible. Por eso el fenómeno se dice **irreversible**.



Las máquinas frigoríficas

El funcionamiento de las **máquinas refrigeradoras** o frigoríficas es inverso al de las máquinas térmicas. Estas últimas reciben del exterior una determinada cantidad de calor, parte del que transforman en trabajo y el resto entregan a la fuente fría. En cambio las máquinas refrigeradoras reciben desde el exterior trabajo que la máquina utiliza para transferir calor desde una zona de baja temperatura a otra de alta temperatura. Es como una bomba de calor que a través del trabajo bombea calor desde una fuente fría hacia otra fuente caliente. Por ejemplo, una heladera eléctrica es una máquina refrigeradora a compresor. El compresor accionado por un sistema eléctrico comprime un gas llamado **freón** que es un compuesto derivado de los gases clorofluorcarbonados, no tóxicos y que no contaminan los alimentos. Cuando estos gases escapan a la atmósfera no se descomponen si permanecen a bajas alturas, pero pueden reaccionar a varios kilómetros de la Tierra, y provocar la contaminación de la capa de ozono. Actualmente se encontraron nuevos compuestos gaseosos menos contaminantes para el ambiente, que no producen un aumento del calentamiento global de la Tierra.



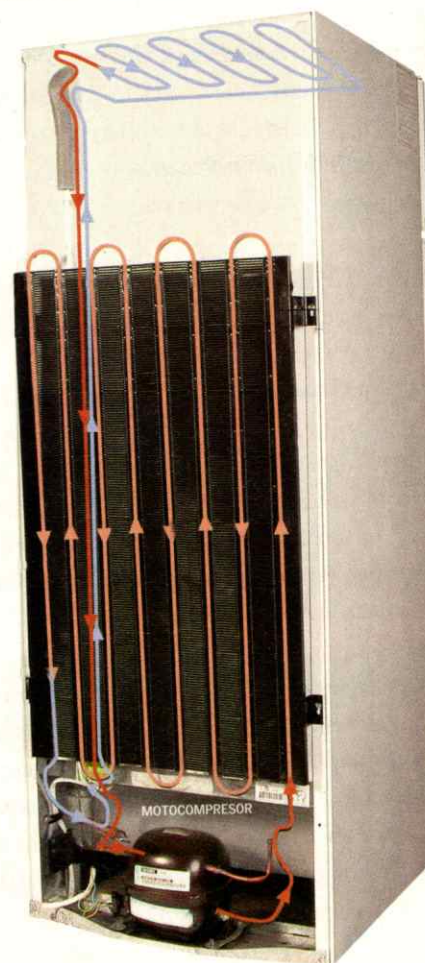
La máquina de Carnot también puede funcionar en sentido inverso, denominándose entonces ciclo frigorífico. En un frigorífico real, el motor conectado a la red eléctrica trabaja para extraer calor de la fuente fría (la cavidad del frigorífico) y cede calor a la fuente caliente, que es la atmósfera.

Al comprimirse, el gas aumenta su presión y pasa al condensador, que es una serpentina metálica en contacto con el ambiente. Al pasar por el condensador, el gas se licua y cuando pasa a estado líquido libera calor al medio.

El líquido circula por unos tubos de diámetro muy pequeño hacia el evaporador, que se encuentra dentro de la cabina de la heladera. El evaporador también tiene forma de serpentina pero con tubos de mayor diámetro. Esta variación en los diámetros de los conductos provoca una disminución de la presión del líquido el cual se evapora absorbiendo calor del interior de la heladera. El gas se encuentra a baja presión y pasa al compresor donde nuevamente se reinicia el ciclo. Los alimentos dentro de la heladera transfieren calor al freón, y éste los enfría a una temperatura de aproximadamente 4 °C.

En la parte exterior de la heladera, el freón transfiere calor al ambiente y se enfría nuevamente.

De acuerdo con el Primer Principio de la Termodinámica, la suma del calor transferido por los alimentos y el trabajo realizado por el motor es igual al calor liberado al exterior a mayor temperatura.



Un poco más de Sadi Carnot

Cuando el joven Nicolás Leonard Sadi Carnot publicó en 1824 su obra *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur machines propres à développer cette puissance*, las máquinas de vapor ya habían evolucionado bastante desde la primera fabricada en 1712, y se usaban para diversos fines. En 1807 ya había barcos impulsados con máquinas de vapor y el primer tren data de 1823. Sin embargo la física aún no tenía una justificación unánime para explicar el funcionamiento de estas máquinas.

En este contexto, Carnot enuncia las leyes fundamentales de la termodinámica y dice: "Dondequiera que exista una diferencia de temperatura, dondequiera pueda restablecerse el equilibrio del calórico, puede producirse también potencia motriz. El vapor de agua es un medio con el que es posible realizar esta potencia, pero no es el único: todos los cuerpos de la naturaleza pueden emplearse para este fin: todos son susceptibles al cambio de volumen, de contracciones y dilataciones sucesivas por las alternativas de calor y de frío. Todos son capaces de vencer, en sus cambios de volumen, ciertas resistencias y de desarrollar así

potencia motriz. Cuando se calienta y enfría alternativamente el agua, produce potencia motriz a la manera de los gases permanentes; o sea, sin volver jamás al estado líquido. La mayor parte de estos medios han sido propuestos, y muchos fueron ensayados, aunque sin éxito notable hasta ahora. Habíamos señalado que, en las máquinas de vapor, la potencia motriz se debe a un restablecimiento del equilibrio en el calórico: esto se da en la máquinas de vapor y en toda máquina de combustión. O sea, en toda máquina cuyo motor es el calor. El calor puede evidentemente ser una causa de movimiento no solo en virtud de los cambios de volumen o de forma que hace experimentar a los cuerpos. Estos cambios no se deben a una constancia de temperatura, sino a alternancias de calor y de frío. Para calentar cualquier sustancia, hace falta un cuerpo más frío. Necesariamente se toma calórico del primero de estos cuerpos para transmitirlo al segundo por medio de la sustancia intermediaria. Vale decir, se restablece o, por lo menos, se trata de restablecer el equilibrio calórico.

Es natural formularse aquí esta pregunta, a la vez curiosa

e importante: ¿es la potencia motriz del calor inmutable en cantidad, o varía con el agente que utiliza para realizarla, con su sustancia intermediaria elegida como sujeto de acción del calor?(...)

(...) Según las nociones establecidas hasta ahora, se puede comparar con bastante exactitud la potencia motriz del calor con la de una caída de agua: ambas tienen un máximo que no se puede sobrepasar, cualquiera que fuese la máquina empleada para recibir la acción del calor. La potencia motriz de una caída de agua depende de su altura y de la cantidad de líquido; la potencia motriz del calor depende también de la cantidad de calórico empleada, y de lo que llamaremos la altura de su caída. Es decir, la diferencia de temperatura de los cuerpos entre los cuales se hace el intercambio del calórico. En la caída del agua, la potencia motriz es rigurosamente proporcional a la diferencia de nivel entre el depósito superior y el depósito inferior. En la caída del calórico, la potencia motriz aumenta, sin duda, con la diferencia de temperatura entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío.(...)

Luego de leer el texto de Carnot, respondan.

- ¿Cuál es la concepción del calor que se expone en el texto?
- ¿Qué significado conceptual tiene la potencia motriz?

- ¿Cuáles son las hipótesis que intenta probar Carnot?
- Expliquen la analogía que utiliza para ejemplificar su postura.



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ Las leyes de los gases junto con la Teoría Cinético-Molecular permitieron establecer un modelo de partículas que ayuda a explicar la naturaleza de la materia.

■ Según la Teoría Cinético-Molecular, las moléculas de los gases se mueven continuamente en línea recta y al azar, chocando entre sí o bien con las paredes de los recipientes que las contienen.

■ La variación de la energía interna del sistema entre dos estados considerados es siempre la misma. Quiere decir que no depende de la transformación necesaria para pasar de un estado a otro.

■ El **Primer Principio de la Termodinámica** dice que la energía intercambiada por un sistema es igual a la variación de su energía interna.

■ En una **transformación cíclica**, el trabajo realizado por el sistema es igual al calor total absorbido por el sistema y la variación de su energía interna es cero.

■ En una **transformación adiabática**, la energía interna del sistema disminuye o aumenta una determinada cantidad que es igual al trabajo realizado por el sistema o sobre el sistema.

■ El **Segundo Principio de la Termodinámica** establece el sentido posible en que se producen los hechos y fenómenos.

■ La **entropía** es una función de estado de un sistema que indica una medida del desorden de dicho sistema.

■ El funcionamiento de las máquinas refrigeradoras es inverso al de las máquinas térmicas, pero cumple con el Segundo Principio de la Termodinámica.

Fórmulas

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Ley de Boyle

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Ley de Charles y Gay-Loussac.
Isobárica

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Ley de Charles y Gay-Loussac.
Isocórica

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Ecuación general de estado de los gases ideales

$$Q - W = \Delta U$$

Primer Principio de la Termodinámica

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

Variación de entropía

$$\eta = \frac{W}{Q}$$

Rendimiento de una máquina térmica

$$\eta = 1 - \frac{T_{frio}}{T_{cal}}$$

Rendimiento de una máquina de Carnot

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Si un gas se dilata o se contrae, ¿cuáles son las variables termodinámicas que aumentan o disminuyen? ¿Qué factores pueden producir estos cambios?
2. ¿Qué ocurre cuando a volumen constante un gas aumenta su temperatura? Expliquen según los fundamentos de la Teoría Cinético-Molecular.
3. Cuando un gas se comprime rápidamente, ¿por qué aumenta su temperatura?
4. ¿Qué ocurre con la energía interna de un sistema si absorbe una cantidad de calor igual al trabajo que realiza sobre el medio?
5. Analicen las siguientes opciones y decidan cuál es la correcta. Justifiquen sus respuestas. Dos sistemas están en equilibrio térmico si tienen:
 - a. la misma temperatura,
 - b. la misma energía interna,
 - c. la misma entropía.
6. ¿Es posible transformar una determinada cantidad de trabajo completamente en calor? ¿Y una cantidad de calor completamente en trabajo? Mencionen ejemplos.
7. ¿Es posible explicar a partir del Primer Principio de la Termodinámica el fenómeno por el cual se calientan las manos frotándolas muy rápido?
8. Mencionen cinco ejemplos de fenómenos irreversibles de la vida diaria.
9.
 - a. Una pelota de golf, ¿es un sistema con más energía interna antes (situación inicial) o después (situación final) de ser golpeada por el palo de golf?
 - b. Describan el sistema desde el punto de vista energético en la situación inicial.
 - c. Describan el sistema desde el punto de vista energético en la situación final.
 - d. ¿Cuáles son las transformaciones o cambios que sufre el sistema?
 - e. ¿La variación de la energía interna de este sistema depende de estas transformaciones?
10. Expliquen si el orden molecular aumenta o disminuye cuando el agua se solidifica.
11. ¿En qué caso el fenómeno tiene mayor entropía: un huevo sin romper o un par de huevos revueltos?
12. A partir del concepto de entropía expliquen qué sucede cuando una bala impacta una placa de acero y se frena al chocar con ella.
13. ¿Abrir la puerta de una heladera en un día caluroso ayuda a enfriar el ambiente de la cocina? ¿Por qué?
14. ¿Por qué disminuye la temperatura de un gas durante una expansión adiabática?
15. En una expansión reversible isotérmica de un gas ideal, el trabajo realizado es exactamente igual al calor absorbido por el sistema, es decir, el calor se convierte totalmente en trabajo. ¿Contradice esto al Segundo Principio de la Termodinámica?
16. Mediante un dispositivo térmico se logra que la transmisión de calor desde un cuerpo a alta temperatura a otro que está a baja temperatura se realice a una velocidad extraordinariamente lenta. ¿Es reversible este proceso?
17. Expliquen qué es el ciclo de Carnot y comenten su importancia en el estudio de las máquinas térmicas.
18. ¿Qué relación existe entre la entropía y el Segundo Principio de la Termodinámica?
19. ¿Cuál es la relación entre el concepto de orden y el de entropía?
20. ¿Se puede relacionar el concepto de entropía en la distinción entre el pasado y futuro?
21. ¿Nuestra sociedad gasta más combustible en la producción de calor, o de frío?
22. Confeccionen una lista de procesos en los que se produzca una disminución de la energía disponible del universo. Discutan con sus compañeros estos fenómenos.
23. Analicen y comenten la siguiente situación que se conoce como la muerte térmica del universo: "Si toda transformación produce un aumento de la entropía del universo y, en consecuencia, una degradación de la energía, entonces llegará un momento en que el universo estará a una temperatura uniforme. Esto significa que no se producirán procesos termodinámicos o transformaciones energéticas".
24. Busquen información sobre la contaminación térmica y expliquen qué hechos o situaciones provoca esta contaminación. Propongan posibles soluciones a estos problemas ambientales.

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

25. Una masa de gas ideal evoluciona manteniendo su temperatura constante. Si absorbe 400 J de una fuente térmica:

- a. ¿cuál es la variación de energía interna que experimenta el gas?;
- b. ¿cuál es el valor del trabajo intercambiado por el gas con el medio?;
- c. ¿qué signo tiene este trabajo? ¿Por qué?

26. Si un sistema absorbe del medio 200 J en forma de calor y efectúa un trabajo sobre el medio de 40 J, ¿cuál es la variación de energía interna del sistema?

27. a. Calculen la variación de la energía interna de 50 g de oxígeno cuando se lo calienta, a volumen constante, variando su temperatura de 50 °C a 70 °C sabiendo que su calor específico para esta evolución es $C_v = 0,656 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$.

b. Indiquen: ¿cuál es el trabajo realizado por el gas?

28. ¿Cuál es el volumen final de un gas ideal que al dilatarse realiza un trabajo de 3000 J a presión constante de 2 atm sabiendo que su volumen inicial era de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$?

29. Un gas ocupa un volumen de $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ a una temperatura de 20 °C. ¿Cuál será su volumen si se mantiene la presión constante y la temperatura disminuye a 5 °C?

30. Un recipiente contiene un gas a una presión de 3 atm y a una temperatura de 10 °C. Si se calienta el gas hasta llegar a una temperatura de 60 °C, ¿cuál será la presión de este sistema suponiendo que el volumen permaneció constante?

31. ¿A qué temperatura se encuentran 10 moles de un gas ideal contenido en un recipiente de $20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ a una presión de 4 atm?

32. ¿Cuál es el máximo rendimiento de una máquina que trabaja entre 100 °C y 400 °C?

33. Una máquina térmica absorbe 10 kcal de una caldera y cede al medio exterior 4 kcal en cada ciclo. Calculen el trabajo y el rendimiento realizado por la máquina en cada ciclo.

34. Una fuente térmica que se encuentra a 500 K suministra 8000 J por ciclo a una máquina de Carnot que lo cede a una fuente de 300 K.

- a. ¿Cuál es el trabajo que la máquina entrega al medio en cada ciclo?
- b. ¿Cuánto calor cede por ciclo a la fuente fría?

35. Una máquina absorbe en cada ciclo 5000 J de la fuente caliente y tiene un rendimiento del 25%. ¿Cuánto calor cede a la fuente fría en cada ciclo?

36. Un recipiente que contiene 100 gramos de agua a 100 °C se coloca dentro de un horno que se encuentra a una temperatura de 450 K. ¿Cuál es la variación de la entropía que experimenta el universo cuando toda la masa líquida se convierte en vapor?

37. Un ingeniero afirma haber desarrollado dos máquinas térmicas. Una funciona entre fuentes térmicas de 500 K y 200 K, y la otra entre 100 K y 40 K. ¿Cuál sería la más eficiente?

38. Un kilogramo de hielo a 0 °C absorbe calor para transformarse totalmente en agua líquida a 0 °C en un ambiente a 20 °C.

a. ¿Cuál es la variación de entropía que experimenta el hielo?

b. ¿Cuál es la variación de entropía del universo?

c. ¿Se podría realizar el mismo proceso pero en forma inversa?

39. Una máquina térmica funciona en forma cíclica. En cada ciclo absorbe 15 000 J de calor y cede a la atmósfera 5000 J. ¿Cuál es la variación de la energía interna del sistema que evoluciona cíclicamente al cabo de 10 ciclos completos?

40. Si la temperatura de un sistema gaseoso aumenta en 10 °C, ¿varía la energía interna del sistema? ¿Por qué?

41. ¿Una taza de café caliente y un iceberg tienen la misma cantidad de energía interna? Discutan esta situación.

42. Un recipiente que contiene 1 kg de agua se encuentra a temperatura ambiente. Si su temperatura varía 15 °C y luego de cierto tiempo vuelve a su temperatura inicial, ¿cuál es la variación de energía interna del sistema?

43. Según el Segundo Principio de la Termodinámica la naturaleza tiende a la máxima entropía o al máximo desorden molecular, pero los seres vivos tienden hacia el orden y la estructuración.

a. ¿Cumplen los sistemas biológicos con el Segundo Principio de la Termodinámica, o existe una contradicción en el funcionamiento de estos sistemas con las leyes físicas?

b. ¿Por qué los seres vivos disminuyen su entropía?

44. Actualmente muchas plantas que generan energía utilizan vapor a alta temperatura para mover turbinas. Averigüen cómo funcionan las turbinas de vapor. ¿Cuáles son las ventajas de su uso?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	A presión constante, si se entrega calor a un sistema formado por un gas ideal, éste se contrae.	☐
2	Los experimentos y aportes de Joule reforzaron la teoría del calórico.	☐
3	La variación de la energía interna de un sistema depende de la forma en que el sistema pasa de un estado inicial a un estado final.	☐
4	La cantidad de calor entregado a un sistema es igual al aumento de la energía interna del sistema más el trabajo externo efectuado por el sistema.	☐
5	El Primer Principio de la Termodinámica no tiene ninguna vinculación con la Ley de Conservación de la Energía.	☐
6	Cuando se entrega calor a un sistema, el calor Q se considera negativo, y el trabajo L es positivo cuando lo realiza el sistema sobre el medio.	☐
7	En un proceso adiabático, la variación de la energía interna es cero.	☐
8	Un proceso isobárico es aquel que se realiza a temperatura constante.	☐
9	Es posible convertir totalmente el calor en trabajo mecánico; éste es el principio del funcionamiento de las máquinas térmicas.	☐
10	El calor se transfiere espontáneamente desde los cuerpos a mayor temperatura hacia los cuerpos a menor temperatura.	☐
11	Según el Segundo Principio de la Termodinámica, en cada transformación que sufre el sistema, la energía resulta de menor calidad o menos útil.	☐
12	En los procesos naturales la energía desordenada del sistema tiende a formas más organizadas.	☐
13	La entropía es una medida del desorden de un sistema y tiende a aumentar.	☐
14	La ecuación de Carnot establece el límite del rendimiento de toda máquina térmica.	☐
15	Mientras mayor sea la temperatura de la fuente de operación de la máquina, comparada con la temperatura de la fuente de escape, menor será la eficiencia de la máquina.	☐
16	Una transformación es irreversible cuando puede invertirse su sentido sin modificar la magnitud del trabajo realizado ni el calor intercambiado entre el sistema y el medio.	☐
17	Las máquinas frigoríficas reciben del exterior una cantidad de calor, parte del que transforman en trabajo, y el resto de la energía la entregan a la fuente fría.	☐
18	Tanto las máquinas térmicas como las frigoríficas funcionan de modo tal que el sistema realiza transformaciones cíclicas.	☐
19	Un equipo de aire acondicionado es un ejemplo de una máquina frigorífica.	☐
20	La Termodinámica es imprescindible para interpretar las transformaciones energéticas que se dan espontáneamente en un sistema.	☐

Con una ansiedad que era casi una agonía, dispuse a mí alrededor los instrumentos que me permitieron infundir una chispa vital a aquella cosa muerta yacente a mis pies.

Frankenstein, Mary Shelley

La aventura podrá ser loca, pero el aventurero ha de ser cuerdo.

Gilbert Keith Chesterton

CONTENIDOS

- Electrificación
- Carga eléctrica
- Interacciones electrostáticas
- Ley de Coulomb
- Campo eléctrico
- Corriente eléctrica
- Circuitos
- Ley de Ohm

10 ENERGÍA ELÉCTRICA

El intento por desentrañar qué es la energía eléctrica podría describirse como una aventura que, a pesar de llevar ya un largo recorrido, dista mucho de haber finalizado.

Los registros más antiguos corresponden a las observaciones del filósofo griego Tales de Mileto (600 a.C) con respecto a la propiedad que presenta el ámbar de atraer pequeños objetos al ser frotado. El ámbar es una resina vegetal fosilizada, proveniente de restos de coníferas y otros árboles muy antiguos. Presenta tonalidades generalmente amarillentas, y los griegos la llamaban **electrón**.

El primero en utilizar el término **eléctrico** para designar en general a los variados materiales que al ser frotados se comportan de manera similar al ámbar, fue William Gilbert (1544-1603), médico de la reina Elizabeth I de Inglaterra. Sus investigaciones tuvieron por objeto separar los efectos eléctricos de los magnéticos, que por entonces parecían más útiles por su aplicación a la navegación. Ambos fenómenos estaban, en apariencia, relacionados y permanecían sin explicación desde la Antigüedad.

Tradicionalmente, se interpretaba el movimiento de los cuerpos como asociado al impulso vital y a la presencia de un alma o ánima. En este contexto se pensaba que los fenómenos eléctricos y magnéticos eran capaces de otorgar esta animación a los objetos inanimados mediante la comunicación de una especie de fluido vital. En la atracción que despertaban estos fenómenos, subyacía la ilusión de comprender el fenómeno de la vida y eventualmente controlar la naturaleza, a partir del conocimiento de sus leyes.

A medida que la Física se fue organizando como ciencia y avanzando en la definición de su metodología, sus límites y posibilidades, la electricidad se sumó al cuerpo teórico de conceptos fundamentales que permiten interpretar la estructura de la materia y sus cambios, algunos de los cuales serán analizados en este capítulo.



Tormenta eléctrica fotografiada en Suiza.

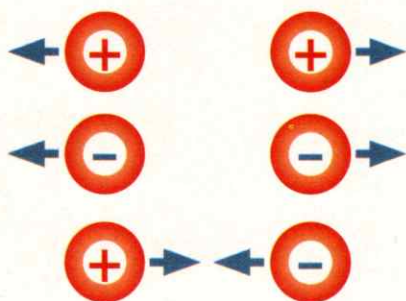
Los trabajos de Gilbert son los primeros que intentan abordar la comprensión de un grupo de fenómenos a partir de una metodología verdaderamente experimental.

Gilbert comenzó por clasificar los materiales en dos grupos: aquéllos que adquirían estado eléctrico por frotamiento, como el ámbar, y aquéllos que no lo hacían. Avanzó también en la determinación de que este efecto no tenía, en principio, relación con el aumento de temperatura, sino con el mismo frotamiento.

A comienzos del siglo XVIII, dos científicos, el inglés Stephen Gray (1696-1736) y el francés Jean Desaguliers (1683-1744), encontraron que podían electrificar un corcho si lo unían por medio de un alambre metálico a un tubo de vidrio previamente frotado. El fenómeno se evidenciaba incluso si se separaban ambos cuerpos. Luego realizaron otros experimentos que les permitieron plantear que al frotar los cuerpos aparecía una "virtud" o "fluido" eléctrico, que podía ser transmitido por algunos materiales, a los que llamaron **conductores**.

Un científico francés, François du Fay (1698-1739), descubrió que dos vidrios previamente frotados se repelían cuando se los acercaba. Al experimentar con otros materiales, como la resina, pudo identificar dos tipos de estados eléctricos a los que designó como **fluido vítreo** y **fluido resinoso**, según adquirieran al ser frotados con un paño de seda la carga del vidrio o de la resina. Llegó a determinar que dos estados eléctricos iguales se repelen, mientras que los estados distintos se atraen.

Unos pocos años después, Benjamín Franklin (1706-1790) realizó experimentos similares, pero analizó los resultados poniendo especial atención en que el vidrio había adquirido un estado eléctrico por su interacción con el paño de seda. Interpretó el fenómeno como la presencia en el vidrio de un exceso de lo que llamó **carga eléctrica** (q), que se corresponde con una falta o defecto de la misma carga, en la seda. Entonces los llamó respectivamente carga positiva y negativa, nombres que aún se usan.



Los cuerpos con cargas de igual signo se repelen, y los que tienen cargas de signos diferentes se atraen. Por tratarse de una interacción, las fuerzas aplicadas a cada cuerpo son de igual intensidad, igual dirección y sentidos opuestos.



Benjamin Franklin

(1706-1790) nació en los Estados Unidos, fue hijo de un humilde fabricante de velas, participó activamente del proceso de independencia de su país además de destacarse en filosofía, ciencia y tecnología, y también como prolífico inventor. Se lo recuerda en particular por su invención del pararrayos. Se hizo famoso en Europa por sus logros en las áreas mencionadas, y por el libro *La ciencia del tío Richard*, una compilación de varias de sus máximas y frases que alaban la sencillez y el sentido común. Una de ellas es la siguiente: "¿Amas a la vida? Pues no pierdas el tiempo, porque de eso esta hecha la vida".



Interacciones electrostáticas

Las interacciones eléctricas, como se expuso en el capítulo 3, corresponden a una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Ellas pueden determinar fuerzas de repulsión, cuando las cargas son de igual signo, o de atracción, cuando son de distintos signos. Como en toda interacción, aparecen fuerzas sobre los dos cuerpos cargados, que son iguales en intensidad y dirección, aunque de sentidos contrarios. Este enunciado se conoce como el **Primer Principio de la Electrostática**.

Comparada con la fuerza gravitatoria, la **fuerza eléctrica** es muy intensa y su acción resulta fundamental para explicar la constitución de las estructuras de los cuerpos de tamaño ordinario, así como la fuerza gravitatoria rige la estructura de los sistemas de orden superior al planetario. Un sistema planetario es una estructura ligada por gravedad, ya que las fuerzas que predominan en su constitución derivan de la interacción gravitatoria, la cual toma valores significativos por la presencia de grandes masas. En los sistemas de tamaño menor, como por ejemplo el de los distintos seres vivos, moléculas y átomos, las fuerzas que predominan para explicar las uniones entre las distintas partes tienen origen eléctrico.

Los materiales que forman los cuerpos están constituidos por **átomos**, nombre de origen griego que significa "indivisible" o "sin partes", ya que originariamente se lo concebía como la partícula fundamental. A pesar de que se mantiene este nombre, se sabe ahora que el átomo está formado por muchas partículas. Las más importantes para este estudio son los **protones** y los **electrones**. Los primeros, forman en gran medida la masa del núcleo, tienen carga positiva y permanecen ligados en la estructura del núcleo por su interacción con los neutrones, sin carga. Los electrones, de carga negativa equivalente a la de los protones, y masa ínfima comparada con la de éstos, se encuentran rodeando al núcleo, que los atrae con fuerzas de origen eléctrico. Generalmente, el átomo tiene el mismo número de protones que de electrones y la carga positiva del núcleo está neutralizada por la presencia de carga negativa a su alrededor. De esta forma, los efectos eléctricos se ponen de manifiesto solo cuando se quiebra el mencionado equilibrio. O sea que, desde un punto de vista eléctrico, el estado básico de los materiales es neutro.

Las partículas de un material con defecto o exceso de electrones se denominan **iones**. Mediante variados procedimientos, es posible desequilibrar la carga eléctrica de los cuerpos, es decir la equivalencia entre el número de partículas con carga negativa y positiva. Ello supone la entrega de energía extra a los electrones menos ligados para liberarlos de la estructura. Por ejemplo, al ser frotados dos materiales, algunos electrones se desprenden de uno de ellos y se alojan en el otro, de modo que ambos quedan cargados en iguales cantidades, en forma positiva y negativa respectivamente. Esta concepción de la carga eléctrica permite comprender la validez del **Segundo Principio de la Electrostática**, que postula que la carga no puede ser creada ni destruida. Formalmente se enuncia que:

La carga total, es decir, la suma algebraica de la carga positiva y negativa de todo sistema eléctricamente aislado, se conserva.

Conductores y aislantes

Los materiales pueden ser clasificados en **conductores** o **aislantes**, según que conduzcan la electricidad con facilidad o no lo hagan. Esta clasificación depende de cuán firmemente estén unidos los electrones a sus estructuras, ya que esto es un indicio de la energía necesaria para otorgarles movilidad dentro del material, es decir para conducir la electricidad. Esta diferenciación es útil dentro de ciertos límites. Por ejemplo, el cuarzo fundido es 10^{25} (10 cuatrillones de veces) mejor aislante que el cobre, por lo que ambos suelen ser señalados como excelentes aislante y conductor, respectivamente.

Los metales y el agua sin destilar son considerados buenos conductores, en cambio los plásticos y el vidrio son buenos aislantes.

A esta clasificación se agregan en la actualidad los materiales llamados **semiconductores**, como el silicio y el germanio, los cuales son buenos aislantes cuando están en estado cristalino puro, pero conducen la electricidad cuando se sustituyen solo algunos átomos del cristal con otros, como arsénico o boro, mediante la técnica conocida como dopado del material. Los semiconductores tienen amplia aplicación tecnológica, por ejemplo en la fabricación de transistores.

Algunos materiales que se consideran buenos conductores aumentan su conductividad hasta prácticamente el infinito cuando se los enfría a temperaturas cercanas al cero absoluto (-273 K): son los llamados **superconductores**. En la actualidad, se han encontrado algunos materiales cerámicos superconductores a temperaturas de algo más de 100 K . Existen grandes expectativas respecto del diseño de materiales superconductores a temperaturas más altas ya que permitirían un ahorro importante de energía.

En los materiales conductores, la carga se distribuye en la superficie, lo que es fácilmente explicable si se tiene en cuenta la repulsión entre las cargas de igual signo y la relativa movilidad con que cuentan en los materiales de buena conductividad. La concentración de carga depende de la curvatura de la superficie, y se puede comprobar experimentalmente que la máxima concentración se da en los vértices o puntas.

El cuerpo humano puede ser considerado como un buen conductor. Cuando la humedad relativa es baja, puede acumular cargas bastante altas, ocasionadas por ejemplo, por la fricción del calzado con suelos aislantes. También puede observarse la fricción de las prendas de seda, lana o fibras sintéticas, que al ser retiradas provocan muchas veces pequeñas chispas eléctricas visibles y también audibles como un débil chisporroteo.

Estas consideraciones adquieren significativa importancia en cuanto a evitar accidentes para aquellas personas que trabajan con materiales altamente inflamables y también para las que manipulan con equipos electrónicos muy sensibles, ya que éstos podrían sufrir algún desperfecto por la acción de esa pequeña descarga.

Procedimientos de carga

La principal fuente de electricidad con que se contaba en el siglo XVIII eran las máquinas por fricción. Se usaban solo con fines experimentales y en salones de juego, donde sus efectos resultaban sorprendentes y divertidos. El primer generador electrostático fue diseñado por Otto von Guericke (1602-1686). Producía cargas por fricción entre una esfera de azufre montada sobre un eje, y la mano de quien la accionaba haciéndola girar mientras la presionaba. Este tipo de electricidad, obtenida por fricción, recibe también el nombre de **triboelectricidad**.



El agua en estado químicamente puro es una sustancia aislante. Sin embargo, en la naturaleza se la encuentra en solución con otras sustancias que presentan en su estructura iones con relativa libertad de movimiento. En tales condiciones, estas soluciones son muy buenas conductoras de la electricidad. Una estrategia usada para evitar los accidentes causados por la acumulación de electricidad estática consiste en aumentar la conductividad superficial por elevación de la humedad relativa. Muchas veces se instala con este propósito un sistema de humidificación, integrado al equipo de aire acondicionado. El aire húmedo conduce la electricidad e impide que las superficies se carguen.

El llamado **poder de las puntas** se aplica en el diseño conveniente de los pararrayos. La descarga eléctrica entre las nubes y la Tierra se hace hacia la punta metálica más cercana que es el pararrayos, y con eso se evita su caída en otros lugares.



Vista de la cúpula de la confitería El Molino, en la ciudad de Buenos Aires.

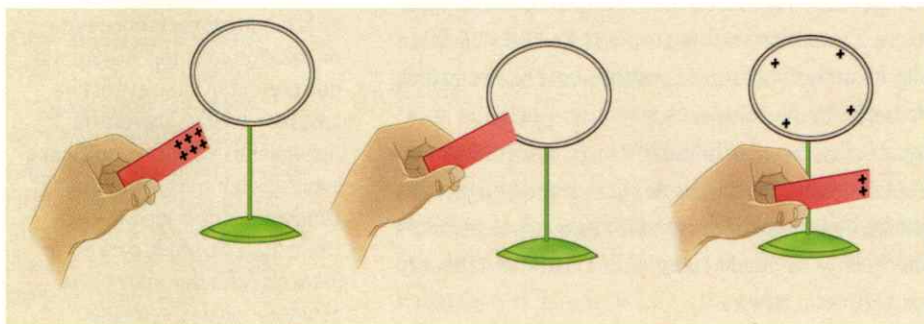
Otros procedimientos para establecer un desequilibrio entre las cargas eléctricas de los materiales son los métodos de carga por contacto y carga por inducción. En el método de **carga por contacto**, el desbalance eléctrico se produce estableciendo el contacto entre un cuerpo cargado eléctricamente y otro neutro. La carga eléctrica buscará distribuirse en la superficie del cuerpo compuesto por los dos, de tal manera que, al separarlos, ambos tendrán carga de igual signo. El total corresponderá a la que tenía el cuerpo inicialmente cargado, de acuerdo con el principio de conservación de la carga.

Experimentalmente puede comprobarse que, si un cuerpo tiene puntas, allí se registran los máximos efectos eléctricos. Esto se explica porque en esas zonas existe una gran concentración de cargas a una distancia mínima, lo que implica mayor fuerza de repulsión entre ellas, por lo que es fácil observar una chispa de descarga. Este hecho se conoce como **poder de puntas**.

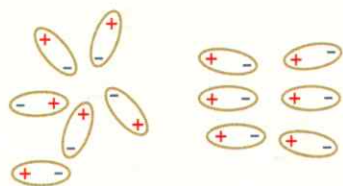
En el procedimiento de **carga por inducción**, el desequilibrio en la distribución de la carga presente en un cuerpo es provocado por la aproximación de otro cuerpo cargado, llamado inductor. Este efecto se conoce como **polarización**. Muchas veces el desbalance desaparece cuando se aleja el inductor.

Aquellos materiales cuyas cargas están poco ligadas, como los metales que tienen gran cantidad de electrones libres, se pueden polarizar muy fácilmente. Si el signo de la carga del inductor es positivo, entonces los electrones menos ligados a la estructura del material neutro responderán a la atracción electrostática. Se ubicarán en la zona más próxima posible al inductor, y dejarán menos pobladas electrónicamente las zonas alejadas de él.

Mediante un conductor, se puede descargar, normalmente a tierra,



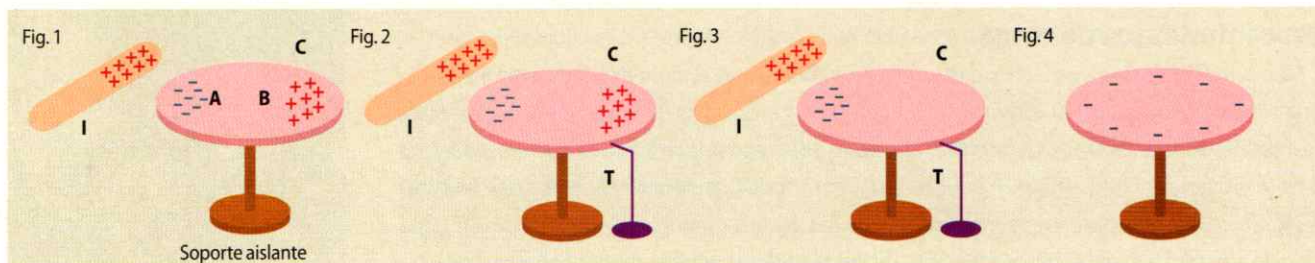
Carga por contacto.



Polarización de materiales aislantes.

la carga de signo contrario al que se desea conservar. El procedimiento de descarga por contacto a tierra se basa en el hecho, anteriormente explicado, de la carga por contacto: en este caso uno de los conductores es enorme (el planeta Tierra), por lo que la carga que se ubica en la superficie de los cuerpos vinculados está casi en su totalidad en la Tierra y solo en una proporción mínima en el cuerpo, que, por este motivo, se puede considerar descargado.

Es posible polarizar también a los materiales aislantes, ya que aunque en ellos las cargas se encuentren muy vinculadas en la estructura, pueden cambiar algo su orientación en el material, de lo que resulta un ordenamiento que se manifiesta como una polarización eléctrica.



Si se acerca un inductor I, con carga positiva, Manteniendo el inductor I fijo, se efectúa a un conductor C en estado neutro, aparecen las cargas inducidas A y B. (Esto se puede hacer tocando C.)

Hay, así, un flujo de electrones libres hacia C que anula la carga positiva inducida y produce un exceso de carga negativa.

Al eliminar la conexión a tierra y retirar el inductor, el exceso de electrones se redistribuye por el cuerpo.

Electroscopio

Nota importante: Ninguna de las experiencias sugeridas en esta unidad está preparada para ser realizada utilizando la energía eléctrica de la red domiciliaria. No intenten adaptar los diseños a partir de su uso ya que puede ser muy peligroso.

El objetivo de esta experiencia es la construcción de un electroscopio. Este instrumento permite, entre otras funciones, determinar la presencia y el signo de la carga en exceso de un cuerpo.

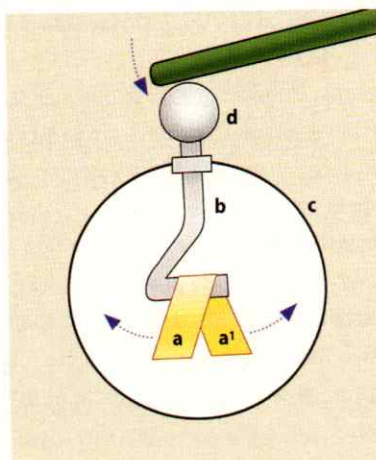
Su funcionamiento se basa en la repulsión electrostática entre dos hojas metálicas muy delgadas, frecuentemente de aluminio, que en estado descargado están suspendidas a la par, y al separarse evidencian la presencia de carga. Como son muy livianas, deben estar protegidas de eventuales corrientes de aire, por lo que en algunos diseños se encuentran dentro de un recipiente de vidrio. La carga llega hasta las hojas por un conductor metálico llamado vástago.

Materiales

Hojas de papel de aluminio, como el que se usa, por ejemplo, para cocinar. Varilla o alambre de metal. Frasco de vidrio (no es imprescindible). En realidad, los materiales pueden ser muy variados. La única recomendación es fabricar las hojas con papel metálico liviano. El resto admite muchas variaciones, aunque tendrán que tener mucho cuidado para elegir buenos conductores y buenos aislantes según la función que deban cumplir en el experimento diseñado.

Construcción

Se recomienda definir por consenso el diseño y los materiales a utilizar. Pueden comenzar por analizar los diferentes modelos de los esquemas y discutir la función que creen que



El electroscopio se emplea para detectar la presencia de cargas eléctricas y para determinar su signo. El dibujo esquemático muestra las partes básicas del dispositivo: (a) y (a') son láminas metálicas delgadas colgadas de un soporte metálico (b) llamado vástago; (c) es un recipiente de vidrio, y (d) es una bola que recoge las cargas eléctricas. Las cargas (positivas o negativas) se conducen hasta las láminas a través del soporte metálico. Como las cargas iguales se repelen, las láminas se separan.

tiene cada uno de los elementos del diseño, para adaptarlos a su propio proyecto.

Básicamente hay que unir las dos hojas de papel de aluminio a uno de los extremos de la varilla o alambre, de tal modo que queden cercanas entre sí y que se puedan separar. En el otro extremo de la varilla se puede colocar un conductor de mayor tamaño, como una chapa o un bollo del mismo papel de aluminio. Todo este sistema se sostiene de un soporte o se coloca en el interior del frasco como se indica en el siguiente esquema.



Funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento del electroscopio se debe comenzar por cargar un objeto por frotamiento; por ejemplo, una lapicera de plástico

frotada vigorosamente con un paño de lana. También pueden utilizar una barra de vidrio frotada con lana, la cual tiene la ventaja adicional de poder asegurar su carga positiva.

El electroscopio se puede cargar por
a. contacto: tocando con el objeto el vástago conductor del que están suspendidas las hojuelas;
b. inducción: simplemente acercando el cuerpo cargado al vástago, sin tocarlo.

Luego del experimento, realicen las siguientes actividades.

1. Elaboren por escrito una explicación del funcionamiento de este instrumento para cada uno de los procedimientos de carga.
2. Expliquen cómo se podría saber cuál es el signo de la carga de un cuerpo, usando un electroscopio.

Nota: Es posible que las experiencias de electrostática sean difíciles de observar en días de alta humedad debido a que el aire, normalmente aislante, se vuelve conductor en esas condiciones.

Las jaulas de Faraday tienen una importante aplicación en la protección de equipos electrónicos, sobre todo aquellos que son muy sensibles o están demasiado expuestos a perturbaciones electromagnéticas que alterarían su funcionamiento. Por ejemplo, es posible observar a través de las puertas transparentes de los hornos de microondas una de las caras de la jaula de Faraday que blindada este equipo y confina las radiaciones en su interior.

Escudo electrostático: jaula de Faraday

En un conductor la carga en exceso se ubica en la parte más externa, como ya se explicó, debido a la repulsión electrostática entre las partículas elementales de carga. De esta manera, la carga en su interior es nula. Este fenómeno ya se conocía mucho tiempo antes del descubrimiento de la estructura del átomo.

En 1755, Benjamín Franklin quedó sorprendido por el resultado de un experimento que realizó. Electrizó un recipiente de plata y lo colocó sobre un soporte aislante. Luego hizo penetrar en su interior una bolita de corcho suspendida de un hilo de seda hasta tocar el fondo. Lo llamativo fue que no pudo reconocer en la bolita ningún efecto eléctrico. No se cargó por inducción, ni por contacto al tocar el interior, como si lo hubiera hecho con la superficie exterior.

El químico británico Joseph Priesley, amigo de Franklin, al analizar el mismo fenómeno, supuso que el resultado podría entenderse como una semejanza entre las fuerzas eléctricas y las gravitatorias, descritas por la Ley de Gravitación de Newton (ver capítulo 4):

¿No podemos acaso inferir de esto que la atracción de la electricidad está sometida a las mismas leyes que la de la gravitación y se ajusta por consiguiente a los cuadrados de las distancias; ya que fácilmente se demuestra que si la Tierra tuviera forma de cascarón, un cuerpo en su interior no sería atraído hacia un lado más que hacia el otro?

Un poco después, Michal Faraday (1791-1867) realizó un experimento muy impactante: construyó una caja metálica cerrada apoyada sobre unos soportes aislantes, la cargó con un poderoso generador electrostático, y se metió adentro para probar el efecto que le causaba. Según sus palabras:

No pude encontrar la más mínima influencia (...) a pesar de que estaban saliendo chispas y descargas dispersas en todos los puntos de su superficie exterior.

Actualmente, se llama **jaula de Faraday** a toda superficie conductora cerrada que rodea un espacio impidiendo efectos eléctricos en él, por lo que actúa en la práctica como un blindaje eléctrico. Es muy usada para proteger equipos electrónicos de perturbaciones indeseadas. En realidad, no es necesario que la superficie conductora sea de paredes cerradas; puede formar un enrejado cuya separación se calcula cuidadosamente.



El blindaje electromagnético o jaula de Faraday es un requisito básico para el funcionamiento del equipo de resonancia magnética.



Jaula de Faraday

Para probar el mismo fenómeno, puede realizarse un experimento mucho menos peligroso y más accesible, que sin duda hubiera deslumbrado al mismo Faraday. Normalmente no se está interesado en aislar la antena de una radio de las influencias eléctricas del entorno, sino todo lo contrario: es así como se

recibe la señal y es posible disfrutar, por ejemplo, de una bella canción que está siendo transmitida.

Materiales

Una radio con antena. Papel de aluminio.

Procedimiento

1. Prendan la radio y verifiquen que se escuche correctamente.

2. Apáguela y envuelvan la antena con el papel metálico.

3. Préndanla nuevamente y verifiquen qué sucede.

Luego de realizar el experimento contesten.

a. ¿Qué pasó cuando se colocó el papel?

b. Describan físicamente la situación.

Aplicación del electroscopio

Cuando un cuerpo cargado entra en contacto con otro, le transfiere su carga, aunque normalmente no toda. Con un electroscopio se puede comprobar que la forma de descargar por completo un cuerpo es establecer contacto con la parte interior de un conductor. Al tocar la parte interior de un conductor con un cuerpo cargado, las cargas que le transmite se ubican en la parte exterior del conductor hasta que el primer cuerpo queda descargado.

Materiales

Electroscopio. Una lata de conservas vacía a la que se le quitará una de sus tapas. Un cuerpo que se pueda electrizar por frotamiento, como una lapicera de plástico o una varilla de vidrio.

Procedimiento

1. Toquen el exterior de la lata con un objeto cargado, por ejemplo una lapicera de plástico frotada. Se puede comprobar con el electroscopio que ambos cuerpos tienen carga.

2. Descarguen el cilindro metálico, por ejemplo tocándolo.

3. Comprueben con el electroscopio su descarga y la presencia de carga en la varilla.

4. Agreguen algo de carga en la varilla para mejorar la observación. Vuelvan a comprobar su estado con el electroscopio.

5. Establezcan ahora contacto entre la varilla y el interior de la lata. Comprueben la presencia de carga en la lata y la descarga completa de la varilla.

Generación y almacenamiento de carga

La **botella de Leyden** es un aparato diseñado para almacenar electricidad estática inventado en 1746 por Pieter van Musschenbroek en la ciudad de Leyden, Holanda, y, casi simultáneamente, por el alemán Ewald Georg von Kleist. El modelo original sufrió sucesivas transformaciones hasta adquirir un diseño más o menos estandarizado que hoy en día recibe el nombre de condensador o **capacitor**. El propósito de esta actividad es construir un capacitor con materiales caseros.

Materiales

Un frasquito de rollo fotográfico. Papel de aluminio. Un tornillo con una tuerca o un clip para sujetar. Un trozo de alambre. Un trozo de cable de varias puntas. Caño de policloruro de vinilo (PVC).

Procedimiento

1. Tomen el frasquito y fórrerlo con papel de aluminio por dentro y por fuera.

2. Rodeen el frasco con un alambre para sujetar la cara externa y para descargarla a tierra; como se muestra en la figura.



3. Perforen la tapa del frasquito con el tornillo y fijen su posición con la tuerca o el clip.

4. Coloquen otro trozo de alambre entre el tornillo y la capa interior del aluminio para asegurar el contacto entre ellos.

5. Coloquen el cable en el tornillo y separen sus puntas a modo de peine de recolección.

6. Generen las cargas mediante la fricción del caño de PVC con un paño, y luego pónganlo en contacto con el peine de recolección, tantas veces como deseen. La cara externa del capacitor debe estar en contacto con la tierra.

Nota: cuando se establece el contacto eléctrico entre las caras, el capacitor se descarga, por lo que deben tener cuidado de no tocar a la vez el alambre externo y el tornillo. Cuando deseen descargar el capacitor, por ejemplo para verificar si hay carga, acerquen al tornillo el alambre que está en contacto con la cara externa. Si la carga es suficiente, es posible observar una chispa entre ambos. Recuerden no tocar las partes metálicas sin estar debidamente aislados.

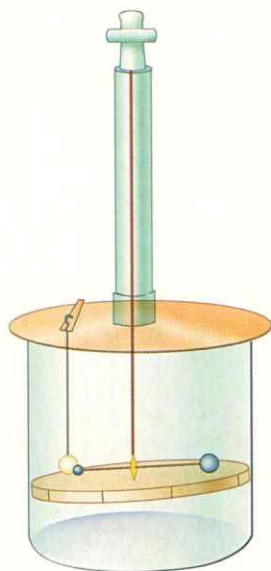
7. Una vez finalizada la experiencia, realicen un informe en el cual se incluya la explicación del funcionamiento del capacitor, utilizando los conceptos de electricidad ya estudiados.



Cálculo de la fuerza eléctrica: Ley de Coulomb

Cuando Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) logró llegar empíricamente a la ley que permite calcular la intensidad de la interacción eléctrica, ya Priesley había especulado con que, a semejanza de la ley de gravedad, también la fuerza eléctrica debía depender de la inversa del cuadrado de la distancia. En 1785, Coulomb decidió aplicar los conceptos de la mecánica newtoniana bajo las siguientes suposiciones.

- Dos pequeñas esferitas frotadas juntas tendrían la misma carga si se las separara; a esta cantidad se la puede llamar q . A partir de ella es posible definir una carga unitaria, la suma, la resta de cargas y cualquier valor de carga de un cuerpo.
- Si estas esferitas son suficientemente pequeñas, pueden ser consideradas cargas puntuales.
- Estas pequeñas porciones de materia electrizada interactúan a distancia.



Esquema de la balanza de torsión de Coulomb

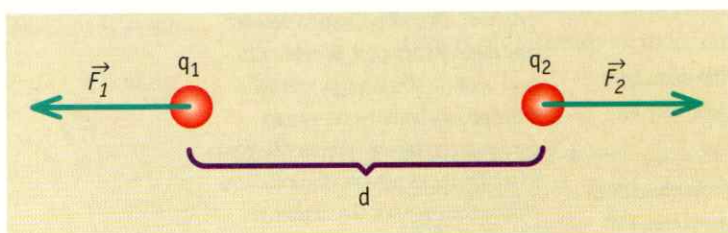
A partir de este modelo, realizó numerosas mediciones de las fuerzas eléctricas usando un aparato de su invención: la **balanza de torsión**. Ella consta de una delgada varilla sostenida por un hilo en forma horizontal. En cada extremo de la varilla se ubican unas pequeñas esferitas, ambas cargadas. Una tercera esfera cargada está ubicada en el extremo de un soporte móvil, el cual puede alejarse o acercarse a las esferitas suspendidas. La medida de la fuerza de atracción o repulsión electrostática está asociada a la torsión de las fibras del hilo.

Sus resultados le permitieron inferir que la intensidad F de la fuerza entre dos cargas, q_1 y q_2 , es directamente proporcional al producto de los valores absolutos de esas cargas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia d que las separa.

En símbolos:

$$F_e = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

donde F_e es la fuerza de interacción entre dos cargas q_1 y q_2 , y d es la distancia que las separa.



Representación gráfica de la Ley de Coulomb para dos cargas del mismo signo.

La constante electrostática K toma valores según el sistema de unidades y del medio en el que interactúan las cargas. En el Sistema Internacional, la unidad de carga se llama **coulomb** (C), y para el caso del vacío, la constante vale:

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

se trata de un valor aproximado que también puede tomarse para el aire.

El coulomb (C) se define a partir del **ampere**, unidad de intensidad de corriente eléctrica que se explicará más adelante, en este mismo capítulo.

El coulomb es una unidad muy grande para los valores habituales de carga. Un cuerpo tendría una carga de un coulomb si tuviese en defecto o en exceso $6,25 \cdot 10^{18}$ electrones, ya que la carga de cada electrón es de $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Aplicaciones de la Ley de Coulomb

1. ¿Cuánto vale la atracción electrostática entre el protón y el electrón de un átomo de hidrógeno, si puede suponerse una distancia típica entre ambos de alrededor de $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$?

Como ambas cargas son de igual valor y pueden aproximarse en el valor $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y $K = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$, entonces si se reemplaza en $F_e = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$, se obtiene:

$$F_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

2. Una moneda de 3 g cargada eléctricamente logra sostenerse en el aire a 1 cm de altura, repelida por otra moneda que tiene una carga idéntica a ella y reposa sobre una mesa. ¿Cuánto vale su carga?

El peso de la moneda es:

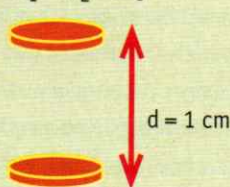
$$P = m \cdot g = 0,003 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \approx 0,03 \text{ N}$$

$$\text{Entonces: } 0,03 \text{ N} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{q^2}{(0,01 \text{ m})^2}$$

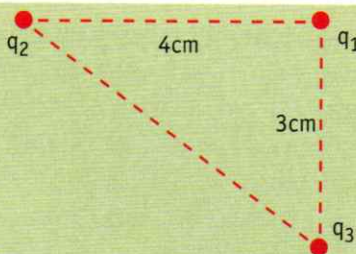
$$\text{Luego: } q^2 = \frac{0,03 \text{ N} \cdot 0,0001 \text{ m}^2 \cdot \text{C}^2}{9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2} \Rightarrow$$

$$q = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$m_1 = m_2 = 3 \text{ g}$$



3. Tres cargas idénticas cuyo valor es $2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran ubicadas en los extremos de un triángulo rectángulo cuyos catetos miden 3 cm y 4 cm, como muestra la figura. ¿Cuánto vale la fuerza electrostática neta sobre q_1 ?



Cuando hay más de dos cargas interactuando, se aplica a cada pareja la Ley de Coulomb y luego se suman vectorialmente las fuerzas para obtener la fuerza eléctrica resultante. La validez de este resultado se conoce como **principio de superposición**. En este caso:

$$F_{q_1; q_2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-6} \text{ C})^2}{(0,03 \text{ m})^2} \Rightarrow F_{q_1; q_2} = 40 \text{ N}$$

$$F_{q_1; q_3} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-6} \text{ C})^2}{(0,04 \text{ m})^2} \Rightarrow F_{q_1; q_3} = 22,5 \text{ N}$$

La dirección de las fuerzas de interacción entre las cargas q_1 y q_2 es la de la línea que las une y su sentido es el que corresponde a una repulsión, según se muestra en el dibujo. Lo mismo ocurre entre las cargas q_1 y q_3 . Como ambas fuerzas son perpendiculares entre sí, su módulo se puede calcular mediante el teorema de Pitágoras. Por lo tanto:

$$F = \sqrt{(40 \text{ N})^2 + (22,5 \text{ N})^2} = 45,89 \text{ N}$$



1. Si dos cargas eléctricas ubicadas a cierta distancia experimentan una fuerza de atracción, ¿cómo cambiará la magnitud de la fuerza si se disminuye a la mitad la separación entre ambas?

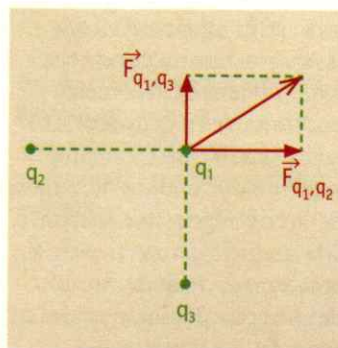
2. Dos pequeños cuerpos cargados con cargas positivas $q_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ y $q_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ se encuentran separados 10 cm. Calculen la intensidad de la fuerza que actúa sobre cada uno de ellos y realicen un esquema de la situación en el que dibujen ambas fuerzas.

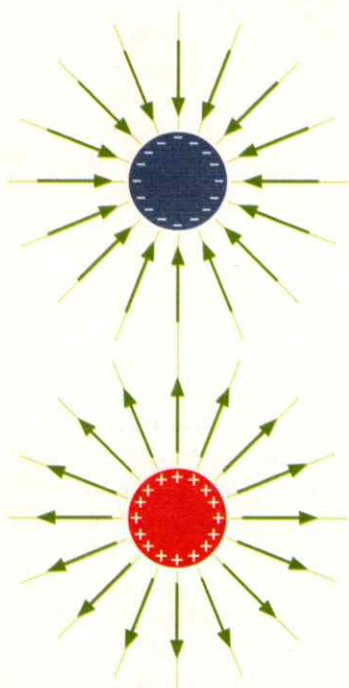
3. Dos cargas puntuales positivas $q_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ y $q_2 = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran separadas 10 cm. En un punto situado sobre el segmento determinado por ellas y a 4 cm de q_1 se coloca una carga $q_3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$. Calculen la fuerza que actúa sobre esta última carga en las siguientes situaciones:

a. q_3 es positiva,

b. q_3 es negativa.

4. Dos cargas puntuales negativas $q_1 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ y $q_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ se encuentran en los extremos de un segmento de 20 cm de largo. ¿En que posición habrá que colocar otra carga puntual para que la fuerza total debido a q_1 y q_2 sea cero?





El campo eléctrico creado por cargas puntuales queda representado por líneas radiales. Estas son salientes en las cargas positivas y entrantes en las negativas.

Visualizar el campo eléctrico requiere algún cuidado, aunque es posible hacerlo con algunas experiencias sencillas. La más simple de todas es observar la orientación del vello que recubre el antebrazo cuando, por ejemplo, le acercamos una regla de plástico frotada. También es posible obtener una representación en el plano de las líneas de campo eléctrico de la siguiente manera: colocar una mezcla de aceite para el cuerpo y trocitos muy pequeños de cabello humano, de no más de 2 mm de largo, sobre un vidrio plano, como el de un portaobjetos de microscopio. Si le acercamos un objeto cargado, observaremos que la orientación de los trocitos de cabello seguirá las líneas del campo eléctrico.

Campo eléctrico

Una de las suposiciones en las que se basaba Coulomb para la formulación de su ley, era que las cargas eléctricas interactuaban a distancia, al igual que las masas frente a las fuerzas gravitatorias. Es decir, que una masa o una carga podrían inexplicablemente, sin ningún mediador, advertir la presencia de otra en sus entornos. Esta idea incomodaba a los físicos, aun al propio Newton. Faraday propuso una interpretación alternativa, de mucha utilidad, basada en la idea de campo: el espacio que rodea a una carga eléctrica se ve afectado por su presencia, ya que ella modifica sus características.

En su intento por representarlo, Faraday lo describía como unos tentáculos invisibles que avanzan desde la carga. De esta manera, a partir del momento en que un cuerpo adquiere carga, esta información o novedad va extendiéndose en su entorno rápidamente, de hecho a la velocidad de la luz, y puede alcanzar eventualmente a otra carga.

Así como es válido hablar de la interacción entre una carga y otra, es posible también describir el mismo hecho a partir de la interacción de una carga con el campo en el que se encuentra.

Al **campo eléctrico** se lo puede representar con unas líneas que, por convención, salen de las cargas positivas y entran a las negativas. Ellas indican la dirección del campo en cada ubicación, es decir la dirección de la fuerza eléctrica que experimentaría una carga puntual y positiva, llamada carga de prueba, si se ubicara en cada posición del campo. El número de líneas es proporcional a la intensidad del campo, es decir que donde las líneas están muy cercanas, el campo es grande y donde están separadas, el campo es pequeño.

A pesar de las muchas similitudes entre las acciones eléctricas y gravitatorias, cabe aclarar una diferencia: el campo gravitatorio es siempre entrante a su fuente (una masa) mientras que el campo eléctrico puede ser entrante o saliente respecto de la carga que lo genera, ya que existen dos clases diferentes de carga.

Una forma más precisa de representar el campo eléctrico es mediante un vector de igual nombre que se representa $\vec{E}$. Su dirección y sentido son los de la fuerza que actúa sobre la carga de prueba positiva, en cada punto. Este vector resulta tangente a las líneas de campo en cada punto.

La **intensidad del vector campo eléctrico** se determina mediante el cociente entre la intensidad de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba colocada en un punto, y el valor de dicha carga, es decir que resulta numéricamente igual a la fuerza eléctrica, por unidad de carga:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

y su unidad en el SI es $[\frac{N}{C}]$.

La fuerza que experimenta una carga en el campo puede expresarse como:

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$$

para interacciones eléctricas, análoga de $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$ para el caso gravitatorio.

Es decir que si en un punto cuyo campo eléctrico tenga un valor de 1000 N/C se coloca una carga de 10^{-5} C, recibe una fuerza cuya intensidad es: $F = 10^{-5} \text{ C} \cdot 1000 \text{ N/C} = 0,01 \text{ N}$.

Esta fuerza tendrá la dirección del campo. Si la carga es positiva, los sentidos de ambos vectores $\vec{F}$ y $\vec{E}$ coinciden. Por el contrario, si la carga es negativa, son opuestos.

Potencial eléctrico

El campo eléctrico se puede describir también mediante una cantidad escalar llamada **potencial eléctrico**.

Ya se explicó en el capítulo 6 que la fuerza eléctrica, al igual que la gravitatoria, es una fuerza conservativa, por lo que una carga almacena energía potencial eléctrica cuando se trabaja en contra de las fuerzas del campo.

Así como al subir un cuerpo en el campo gravitatorio, éste aumenta su energía potencial debido al trabajo que se ejerce sobre él, cuando se desplaza una carga positiva en sentido opuesto al campo, porque algún agente externo la empuja, realiza un trabajo y la carga adquiere una cantidad igual de energía potencial, en este caso eléctrica. Es decir que si por ejemplo, para llevar una carga desde un punto A de un campo eléctrico hasta otro punto B, algún agente externo le tiene que entregar 10 joules, el cuerpo cargado tiene en el punto B, 10 joules más de energía potencial eléctrica que la que tenía en el punto A. Como el campo eléctrico es conservativo, esta cantidad es independiente del camino seguido para ir desde A hasta B.

Por lo tanto, en función de su posición en el campo eléctrico, se puede asociar a una carga eléctrica una cierta cantidad de energía potencial eléctrica, de la misma manera que a una masa ubicada a una cierta altura en un campo gravitatorio se le asigna una energía potencial de tipo gravitatorio.

Es posible caracterizar a cada punto del campo eléctrico mediante un valor numérico que esté relacionado con las variaciones de energía que experimenta una carga al pasar de un punto a otro. Para ello, se define la diferencia de potencial entre dos puntos del campo eléctrico como el cociente entre la variación de energía potencial experimentada por una carga positiva al pasar de un punto a otro y el valor de dicha carga.

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre dos puntos, ΔU la variación de energía potencial eléctrica experimentada por una carga que pasa de un punto al otro, y q el valor de la carga.

En la expresión anterior las unidades son J/C o sea joule/coulomb, que se denomina **volt (V)**.

Por ejemplo, si una carga positiva de $3 \cdot 10^{-5}$ C al pasar de un punto A a otro B incrementa su energía potencial eléctrica en 0,015 J, la diferencia de potencial será:

$$V_B - V_A = \frac{0,015 \text{ J}}{3 \cdot 10^{-5} \text{ C}} = 500 \text{ volt}$$

Esta diferencia de potencial es característica de ambos puntos, es decir, que es independiente de las cargas que eventualmente se desplacen entre ellos.

Los 500 V significan 500 J/C es decir que cualquier carga positiva tendrá en el punto B, 500 J más de energía potencial eléctrica que en el A por cada coulomb de carga. Si la carga es negativa, habrá una disminución de la energía potencial eléctrica del mismo valor cuando pasa de A a B.

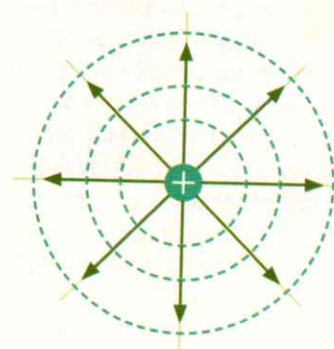
Por la forma en que fue definida solo se puede calcular la diferencia de potencial entre dos puntos. En electrostática se ha adoptado como referencia a un punto muy lejano, en el infinito, al que se le asigna arbitrariamente el valor cero. O sea, cuando se dice que el potencial de un punto es 100 V, significa que la diferencia de potencial entre ese punto y uno infinitamente alejado vale 100 V.

● Líneas y superficies equipotenciales

Así como se puede caracterizar al campo eléctrico por líneas de campo, resulta posible describirlo mediante líneas o superficies equipotenciales que están formadas por conjuntos de puntos de igual potencial.

Por ejemplo, alrededor de una carga puntual se generan superficies equipotenciales que son esferas concéntricas.

Si en lugar de una sola carga puntual se tienen otras distribuciones de carga, las superficies equipotenciales adoptarán diferentes formas. Cuando una carga eléctrica se desplaza dentro de una misma superficie equipotencial, su energía no varía, es decir el trabajo de la fuerza eléctrica resulta nulo.



En la figura, se representan las líneas de fuerza de una carga puntual, que son líneas rectas que pasan por la carga. Las equipotenciales son superficies esféricas concéntricas.



Pilas y contaminación

Las pilas de zinc-carbón, también llamadas pilas comunes, presentan dióxido de manganeso y cloruro de amoníaco en su composición, con menos de 0,01 % de mercurio, por lo que son poco contaminantes. Las alcalinas utilizan dióxido de manganeso, hidróxido de potasio y pasta de zinc amalgamada con mercurio en una proporción del 1%. Las pilas más contaminantes son las de botón o micropilas, que se construyen de acero, óxido de mercurio, grafito, hidróxido de potasio y pasta de zinc disueltos en mercurio, el cual alcanza una proporción superior al 25 %. En este caso, una sola pila puede contaminar algo más de 500 000 litros de agua.

Las pilas de níquel-cadmio son diseños recargables. Están constituidas por estos metales separados por polipropileno. No contienen mercurio, sin embargo el cadmio también resulta muy nocivo para la salud y es considerado un contaminante del ambiente.



Distintos tipos de pilas.

Pilas

Hacia fines del siglo XVIII, uno de los temas preferidos por los científicos era la posible conexión entre la electricidad y los impulsos nerviosos, dentro de lo que se llamaba electricidad animal. Desde mucho tiempo atrás ya se había especulado sobre los posibles efectos terapéuticos de las descargas eléctricas, asociando las convulsiones que podía experimentar el cuerpo humano con el abandono de sus supuestas almas primitivas e inconvenientes. Así, muchos pacientes eran tratados con terapias de este tipo, muy criticadas por aquellos que pensaban que no tenían otro efecto que hacer sufrir más aún a los enfermos.

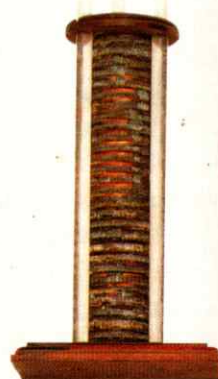
Dos importantes científicos italianos, Luigi Galvani (1737-1798), doctor en Medicina y profesor de Anatomía de la Universidad de Bologna, y Alessandro Volta (1745-1827), físico de la ciudad de Como, sostuvieron una larga discusión acerca de la interpretación de ciertos fenómenos presentes en las investigaciones sobre la electricidad animal.

Es muy conocido el experimento de Galvani en el cual se lograba la contracción de algún músculo de la pata de una rana, mediante el contacto en dos puntos del tejido con metales diferentes. Galvani atribuía el origen de esa contracción a la presencia de una electricidad proveniente del tejido muscular del animal. Volta, por su parte, creía que la clave estaba en las dos clases diferentes de metal y que el músculo era un mero conductor. Su evidente contracción a lo sumo permitía catalogarlo como sensor o electroscopio muy sensible. Supuso, además, que cada metal posee una cantidad de electricidad que le es propia y que si ambos se ponen en contacto con un material humedecido, la corriente logra fluir desde uno hacia el otro. Ese fluir de electricidad era lo que estimulaba la contracción del músculo.

En el año 1800, tras experimentar con distintos metales, Volta descubrió que el efecto más satisfactorio lo obtenía con cobre y zinc, con los que fabricó 30 discos que apiló en forma alternada, separándolos con paños embebidos en ácido. El aparato, que pronto se hizo conocido como la **pila de Volta**, fue el primer dispositivo electroquímico que pudo ser usado como fuente de electricidad, mucho más simple y más útil que los métodos por frotamiento, por cuanto era capaz de entregar la energía en forma continua y estable.

En la actualidad existen distintos tipos de pilas, aunque todas ellas suponen un sistema que permite la obtención de energía eléctrica a partir de una reacción química.

En las sociedades desarrolladas, las pilas constituyen un elemento de extensa aplicación sobre todo por la ventaja de su autonomía respecto de la red eléctrica. Sin embargo, así como sucede con otras formas de generar energía, algunos diseños son muy cuestionados a causa de los efectos contaminantes provocados por su contenido de metales perjudiciales para la salud, como son el mercurio y el cadmio.



La pila de Volta.

5. Lean el siguiente texto y elaboren una explicación a partir de los fundamentos teóricos antes analizados.

El **electróforo de Volta** es un aparato diseñado para obtener cantidades de carga eléctrica relativamente grandes. Su funcionamiento se basa en la inducción eléctrica. Consta de dos discos metálicos separables, uno de los cuales está cubierto en una de sus caras por resina aislante y el otro está en contacto eléctrico con la tierra. El

disco metálico móvil tiene una manija aislante que permite acercarlo al otro disco y, además, transportarlo.

Funcionamiento

Se frota la resina con un paño y se acerca a ella el disco móvil. Luego se toca la cara del disco que se opone a la resina. Se transporta la carga eléctrica obtenida en el disco móvil hasta donde se desee utilizarla o almacenarla.



ACTIVIDADES

Corriente eléctrica

El movimiento intelectual y cultural del siglo XVIII conocido como Ilustración, esperaba de la ciencia en general y de la electricidad en particular las múltiples aplicaciones prácticas que llegarían más adelante.

A partir del invento de Volta, que fue mejorándose en forma constante, la investigación de los fenómenos eléctricos avanzó velozmente.

El misterioso fluido eléctrico de otros tiempos ha revelado hoy casi todos sus secretos. Se sabe que la carga eléctrica se encuentra en la naturaleza más o menos ligada en la estructura de los materiales, es decir con mayor o menor capacidad de desplazarse en respuesta a su interacción con los campos eléctricos. La carga negativa residente en los electrones es la que, con más frecuencia, se encuentra libre, por ejemplo en los metales. En ellos, algunos electrones tienen un grado de libertad semejante al de las moléculas en el estado gaseoso. Su movimiento es errático y, como en el gas, no puede reconocerse un sentido neto de circulación. Cuando se instala un campo dentro de un conductor metálico, las partículas tienden a seguir preferentemente la señal del campo y puede entonces establecerse un sentido de circulación en sus movimientos, que se llama **corriente eléctrica**. Como la mayoría de los conductores de los circuitos eléctricos son metálicos, es necesario considerar que en ellos el sentido real o físico de circulación es el de los electrones en contra del campo eléctrico.

En los electrolitos o en los conductores gaseosos, los portadores de carga también pueden ser positivos, por lo que su desplazamiento es contrario al anterior.

Por simplicidad, se establece un sentido convencional de circulación de la corriente y es el de los portadores de carga positivos, o sea, a favor del campo eléctrico.

Se define como **intensidad** de la corriente eléctrica al cociente entre la carga neta Δq que atraviesa una determinada sección del conductor por unidad de tiempo Δt .

En símbolos:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

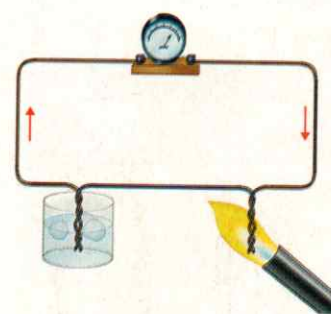
La unidad de intensidad de corriente es el **ampere** (A) que corresponde a una corriente constante por la cual una carga de un coulomb atraviesa cualquier sección normal del conductor por cada segundo. Su nombre fue elegido en homenaje a los aportes del francés André Marie Ampère (1775-1836), quien a comienzos del siglo XIX estableció los principios de la electrodinámica, relacionando los conceptos de corriente eléctrica y potencial eléctrico, y además realizó otros aportes importantes en la teoría de la electricidad y el magnetismo.

Diferencia de potencial y corriente eléctrica

Una de las ventajas de la pila es la permanencia en el desnivel eléctrico que se establece entre sus terminales. Es útil considerar la diferencia de potencial como un desnivel eléctrico similar a un desnivel gravitatorio que permite, por ejemplo, el flujo de una corriente de agua a través de una cañería inclinada. Esta idea es la que, como modelo, permitió el desarrollo de la teoría de circuitos.

Termoelectricidad

Es posible generar electricidad a partir de dos electrodos metálicos que están a diferentes temperaturas. Este efecto recibe el nombre de efecto Seebeck, por el físico alemán Thomas Seebeck que lo descubrió en 1821. El efecto contrario, es decir, la aparición de una diferencia de temperatura en la unión de dos metales distintos cuando son recorridos por una corriente, fue descubierto en 1834 por Peltier. Por ejemplo, si se tiene una barra de cobre soldada con otra de antimonio (par bimetálico), cuando circula corriente se verifica un cambio de temperatura que corresponde a un aumento o una disminución en la corriente según el sentido de circulación.



Al colocar las dos uniones de cobre y hierro a diferentes temperaturas, una en agua y la otra a la flama, se genera una corriente eléctrica que es detectada por el instrumento.



La **resistividad** de los materiales, y también su inversa, llamada **conductividad**, se relaciona con el llamado tiempo de redistribución de la carga libre. El valor de la resistividad es muy pequeño para los buenos conductores y bastante alto para los buenos aislantes. Por ejemplo, si se toca una esfera de cobre con una barra de vidrio cargada, éste se llevará las cargas del vidrio muy rápidamente, ya que el valor del tiempo de redistribución de la carga libre para el cobre es de aproximadamente 10^{-19} segundos. En algunos materiales como el selenio, llamados por este motivo semiconductores, es posible controlar este tiempo mediante la intensidad de la luz que incide sobre ellos. Su tiempo de redistribución de la carga es del orden de los 50 segundos en condiciones de oscuridad, pero cuando se lo expone a la luz, su conductividad aumenta en proporción a la intensidad de la luz incidente.



La fotocopidora es una aplicación de esta propiedad. En ella, una placa de selenio sobre un rodillo y cargada electrostáticamente es alumbrada en forma diferente por la luz reflejada por el original que se desea copiar. Las zonas blancas reflejan toda la luz y las oscuras menos. Por esto, las zonas alumbradas se descargan mientras que otras zonas mantienen su carga en forma total o parcial. Al rodar la placa sobre el toner (tinta seca o tonificador) también cargado electrostáticamente, se puede obtener una copia del original, en principio sobre el rodillo y luego sobre un papel que se presiona sobre él.

Resistencia eléctrica y Ley de Ohm

Ya se mencionó que no todos los materiales se comportan de la misma manera frente a la conducción de la electricidad.

Dentro de cierta aproximación, se cumple en la mayoría de los conductores que la intensidad de la corriente es proporcional a la diferencia de potencial aplicada.

Esta relación se conoce como **Ley de Ohm** y se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\Delta V = R \cdot I$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor, I la intensidad de la corriente, y R la constante de proporcionalidad que se conoce como **resistencia** del cuerpo conductor.

Su unidad es el **ohm** (Ω) y equivale a volt/ampere (V/A).

Para los materiales que cumplen con la Ley de Ohm su resistencia es constante en tanto no haya cambios de temperatura. Esto es válido para la mayoría de los conductores metálicos.

La resistencia de un conductor depende de su forma, tamaño, material y temperatura. Dado que una forma habitual de conductores, como los cables, es la cilíndrica, se puede determinar que para un mismo material los valores de resistencia cambian según la sección y el largo del conductor.

Las características de conducción del material se expresan mediante un coeficiente llamado **resistividad**, ρ , que depende solo del tipo de material del conductor y de la temperatura. Sus valores se pueden encontrar en tablas.

La resistencia, R , de un conductor cilíndrico (un cable) se puede calcular mediante la expresión:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

donde L es el largo del conductor y S es la sección transversal.

La unidad en que se expresa la resistividad de un material es ohm por m ($\Omega \cdot m$).

Aplicaciones de la Ley de Ohm

Calculen la resistencia de un alambre de acero de 0,0025 m de diámetro y 5 m de largo y la intensidad que circula por él cuando se aplica entre sus extremos una diferencia de potencial de 1,2 V si se sabe que la resistividad del acero es $6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$.

La sección trasversal del alambre es: $S = \pi \cdot \left(\frac{0,0025 \text{ m}}{2}\right)^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$; su largo es de 5 m, por lo tanto, la resistencia de este conductor vale:

$$R = 6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m \cdot \frac{5 \text{ m}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,6 \Omega$$

Si entre los extremos de este cable se aplica una diferencia de potencial de 1,2 volt se puede calcular la intensidad de corriente mediante la ley de Ohm $I = \frac{\Delta V}{R}$, en este caso

$$I = \frac{1,2 \text{ V}}{0,6 \Omega} = 2 \text{ A}$$

La intensidad de corriente es de 2 ampere.

Circuitos eléctricos

La figura muestra los elementos básicos de los llamados **circuitos eléctricos**: una fuente que aporta energía y mantiene una diferencia de potencial constante entre dos puntos a y b denominados bornes. Puede ser, por ejemplo, una pila. Entre ellos se encuentra conectado otro elemento que presenta una resistencia eléctrica de valor R . Los tramos rectos suponen un conductor que, idealmente, no presenta una resistencia significativa y por lo tanto se considera nula. En los circuitos reales, éstos son normalmente cables de cobre. Por el circui-

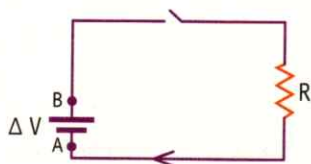


Figura 1.

to circula una corriente cuya intensidad es I . Muchas veces en los circuitos se representa una llave, es decir un interruptor que permite abrir y cerrar el circuito. Se dibuja como muestra la figura 1.

Para que circule la corriente es necesario que el circuito esté cerrado, es decir que los extremos de la llave estén en contacto.

Un **multímetro** es un aparato que permite medir diferencias de potencial, corrientes y resistencias en un circuito eléctrico, las cuales se determinan con la posición de un selector. Puede también seleccionarse la medición de tensiones continua o alterna y los rangos de medición, es decir para múltiplos o submúltiplos de las unidades volt, ampere y ohm. Una vez hechas las adaptaciones, se ubican las puntas de prueba en los puntos convenientes para realizar la medición deseada.

Conexión de elementos en un circuito

Las formas básicas de conectar los elementos de un circuito eléctrico se llaman: **serie y paralelo**.

■ Dos elementos están conectados en serie cuando están atravesados por la misma corriente.

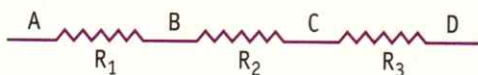
■ Dos elementos de un circuito están conectados en paralelo cuando están sometidos a la misma diferencia de potencial o tensión eléctrica.

Conexión de resistencias

La manera de representar a las resistencias de un circuito es:

Si son lámparas, su representación es:

a. Serie



Es posible reemplazar, con igual efecto, al conjunto de resistencias en serie por una única resistencia equivalente. Como están atravesadas por la misma corriente, I , la resistencia equivalente al total vale: $R_{AD} = \frac{V_{AD}}{I}$ lo que implica que $V_{AD} = R_{AD} \cdot I$ (1) aplicando la Ley de Ohm a cada resistencia:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I ; \quad V_{BC} = R_2 \cdot I ; \quad V_{CD} = R_3 \cdot I \quad (2)$$

$V_{AD} + V_{BC} + V_{CD} = V_{AD}$ se puede reemplazar por las expresiones: (2)

$$V_{AD} = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I \quad (3)$$

Comparando las expresiones (1) y (3) se obtiene:

$$R_{AD} = R_1 + R_2 + R_3$$

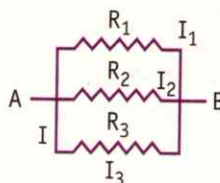
Es decir, que la serie de resistencias puede considerarse una resistencia única cuyo valor corresponde a la suma de las resistencias individuales.



Multímetro.

Los artefactos eléctricos domiciliarios se conectan en paralelo. De esta manera, todos están entre los mismos valores de potencial, que es de alrededor de 220 V. También se evita que, al desconectar o cortarse la conexión de un elemento se interrumpa el circuito, lo cual sucedería si estuvieran conectados en serie. En las conexiones domiciliarias se utiliza tensión alterna; es decir que la diferencia de potencial a la que están conectados los distintos aparatos no es constante sino que varía periódicamente 50 veces por segundo.

b. Paralelo:



Se trata también de encontrar una resistencia equivalente al total de resistencias conectadas en paralelo, en este caso, entre los puntos A y B.

Las tres resistencias están entre los mismos puntos de tensión, V_{AB} , por lo tanto:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_1 \quad V_{AB} = R_2 \cdot I_2 \quad V_{AB} = R_3 \cdot I_3 \quad V_{AB} = R \cdot I$$

Por el principio de conservación de la carga, la corriente I que ingresa y se reparte debe ser igual a la que sale, entonces:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \Rightarrow \frac{V_{AB}}{R} = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} + \frac{V_{AB}}{R_3}$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Es decir que la inversa de la resistencia equivalente a varias resistencias conectadas en paralelo es igual a la suma de las inversas de las resistencias individuales.

Conexión de pilas

En un circuito, las fuentes, como las pilas, suelen conectarse en serie, debido a que en estos casos se suman las diferencias de potencial entre los bornes de cada una. Por ejemplo, en las baterías de 9 V, se encuentran conectadas en serie 6 pilas de 1,5 V cada una. En este tipo de conexión, el borne de mayor potencial se pone en contacto eléctrico con el de menor potencial de la siguiente pila.

El símbolo con el que se representa a una fuente de tensión en un circuito es:

Amperímetros y voltímetros

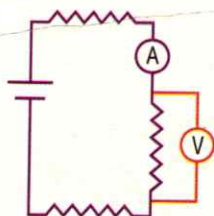
Un amperímetro es un aparato diseñado para medir corrientes eléctricas. Si se desea, por ejemplo, determinar el valor de la corriente que circula por un cable en un circuito, es necesario interrumpirlo para conectar el amperímetro de manera que la corriente a medir lo atraviese. Es decir, el instrumento se conecta en serie. La resistencia interna del amperímetro debe ser muy pequeña de manera que el agregado de un elemento nuevo al circuito no afecte significativamente la medición a realizar.

Con un voltímetro se miden diferencias de potencial. No es necesario interrumpir el circuito, sino conectar cada una de las terminales del voltímetro a los puntos entre los cuales se desea conocer la diferencia de potencial, por lo que está conectado en paralelo.

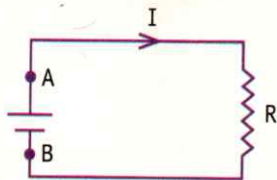
La resistencia interna del voltímetro debe ser muy grande comparada con cualquiera del circuito. De esta manera, la corriente que circularía por él sería casi nula y no alteraría significativamente el valor de la diferencia de potencial a medir.



Amperímetro.



Intercambios de energía en un circuito



A continuación, se considerará el caso de un circuito elemental por el que circula la corriente I . Allí se encuentra conectada una resistencia de valor R y la fuente que aporta una diferencia de potencial ΔV . Toda carga que recorre el circuito entre los puntos A y B disminuye su energía potencial, y, de acuerdo con el principio de conservación de la energía, esta diferencia debe transformarse en otro tipo de energía.

Este cambio de energía será denotado como ΔU para evitar confusiones.

Ya se explicó que la diferencia de potencial es igual a la variación de energía por unidad de carga transportada, por lo tanto: $\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$ lo cual es equivalente a:

$$\Delta U = \Delta V \cdot q$$

La expresión de la variación de energía por unidad de tiempo resulta:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \Delta V \cdot \frac{q}{\Delta t}$$

donde la expresión del primer miembro corresponde a la potencia, por lo que $P = \Delta V \cdot I$.

Como ya se ha visto en capítulos anteriores, la unidad de potencia es el watt (W).

En una resistencia, la energía se irradia como calor, lo que se conoce con el nombre de efecto Joule. Para las resistencias, donde es válida la expresión $\Delta V = I \cdot R$, se puede utilizar la expresión:

$$P = I^2 \cdot R$$

donde P es la potencia, R la resistencia del cuerpo conductor e I la intensidad de la corriente.

Aplicaciones de la fórmula de intercambio de energía

a. ¿Cuál es la intensidad de la corriente que circula por una lamparita de 100 W conectada a la red eléctrica que aporta una diferencia de potencial de 220 V?

b. ¿Cuánto "gasta" esa lamparita si funciona durante 10 horas?

a. Como $P = 100 \text{ W}$ y $\Delta V = 220 \text{ V}$, la intensidad de la corriente puede calcularse por aplicación de la ecuación $P = \Delta V \cdot I$, con lo cual:

$$100 \text{ W} = 220 \text{ V} \cdot I \Rightarrow I = 0,45 \text{ A}$$

b. La estimación del gasto puede entenderse como el cálculo de la energía transformada por la resistencia de la lamparita en luz y calor. Como la potencia es la energía por unidad de tiempo, se tiene: $100 \text{ W} = \frac{\Delta U}{\Delta t}$.

Para un intervalo de tiempo de 10 horas, equivalente a 36 000 segundos, la energía vale:

$$\Delta U = 100 \text{ W} \cdot 36\,000 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

Como puede verse, las cantidades de energía del consumo expresadas en joules alcanzan cifras muy altas. Por este motivo se utiliza la unidad kilowatt-hora, que equivale a la energía utilizada durante una hora a una potencia de 1 kw, o sea:

$$1000 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

El consumo de esta lamparita en el tiempo indicado es, entonces, de 1 kwh.

6. Tres resistencias en serie de

valores $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ y

$R_3 = 30 \Omega$ se encuentran conectadas a una batería de 12 volt. Calculen:

a. la potencia a la que disipa energía la resistencia;

b. la potencia a la que entregada la batería.

7. Una lamparita disipa energía a una potencia de 60 watt cuando está conectada a 220 volt. Calculen su resistencia en esas condiciones y la corriente que circula por ella.

8. Si se conectan dos resistencias de 20Ω y 30Ω a una batería de 12 volt ¿en que caso disiparán más calor?

a. si se conectan en serie;

b. si se conectan en paralelo.

9. Se coloca en un termo medio litro de agua a 20°C y se la calienta hasta 80°C , mediante un calentador de inmersión consistente en una resistencia de 50Ω , por la que circula una corriente de 2 ampere. ¿Cuánto tiempo requiere este proceso?



Cortocircuitos, fusibles y llaves térmicas

Cuando se conecta en forma voluntaria o accidental un conductor de resistencia muy baja (casi cero) en paralelo a uno o varios conductores, la intensidad de la corriente eléctrica aumenta considerablemente debido al brusco descenso de la resistencia del circuito. Este hecho se llama cortocircuito, y la mayor parte de la corriente se deriva en el paralelo por el conductor de muy baja resistencia.

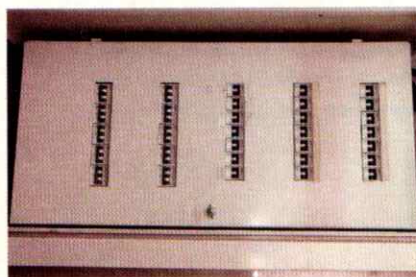
Este aumento de la intensidad puede dañar o producir accidentes en diversas partes del circuito. Para evitarlo se pueden colocar dispositivos en serie que corten la corriente cuando ésta supera determinado valor.

Uno de estos dispositivos es el fusible, un conductor diseñado para cortarse (fundirse) cuando la corriente llega a cierto valor. Una vez reparado el desperfecto, el fusible debe ser reemplazado.

Otro dispositivo es la llave térmica que abre el circuito en condiciones de cortocircuito. Cuando se repara el desperfecto, sólo hay que conectarla nuevamente.



Fusibles para proteger el circuito eléctrico de un automóvil.



Llaves térmicas de un edificio.

Resolución de circuitos

Resolver un circuito significa determinar la corriente que circula por cualquier sector y la diferencia de potencial entre cualquier par de puntos. En circuitos simples se puede usar un procedimiento que consiste en calcular el valor de una única resistencia equivalente al total de resistencias conectadas en el original.

Para resolver cualquier circuito eléctrico también se pueden aplicar unas reglas generales llamadas Leyes de Kirchoff, que resultan especialmente útiles cuando se necesita resolver circuitos con distintas trayectorias para las corrientes. En ellas, la derivación de corrientes comienza en los llamados nudos, que son puntos del circuito en donde entran o salen varias corrientes. Un nudo es análogo a una rejilla de distribución cuando circula agua por diferentes tuberías. Es muy frecuente utilizar esta comparación entre la corriente eléctrica y la circulación de un fluido por una red de tuberías.

Leyes de Kirchoff

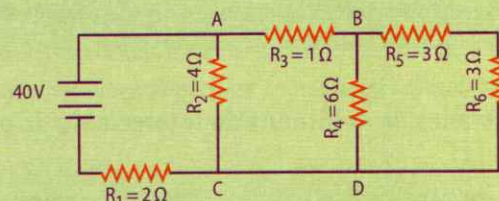
1ra. Ley: en cualquier nudo, la suma algebraica de las corrientes que entran y salen vale cero. La validez de esta ley se basa en el principio de la conservación de la carga.

2da. Ley: la suma algebraica de tensiones de todos los componentes de un circuito en una trayectoria cerrada, llamada malla de un circuito, vale cero.

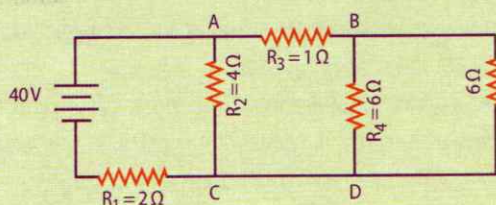
Esta ley resulta válida por aplicación del principio de conservación de la energía.

Aplicaciones de las Leyes de Kirchoff

¿Cuánto vale la resistencia total en este circuito?
¿Cuánto vale la intensidad de corriente en cada rama?



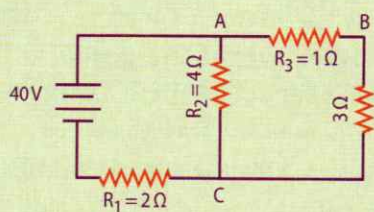
Para comenzar, puede plantearse la supuesta circulación de las corrientes. Si se razona usando la analogía hidráulica, suponiendo que la fuente es una canilla que permite circular agua por una cañería, la corriente de agua que entra en el circuito se encuentra con las rejillas A, B, C y D y se divide en las llamadas corrientes derivadas. Este análisis permite reconocer si hay resistencias atravesadas por la misma corriente, como es claramente el caso de R_5 y R_6 , las que están en serie. Por lo tanto, en este caso se las reemplaza por su equivalente, una única resistencia de 6Ω . El circuito queda simplificado de la siguiente manera.



La resistencia de 6Ω , que reemplaza a las anteriores, está conectada entre los mismos puntos de potencial que R_4 , es decir entre B y D. Por lo tanto, pueden ser reemplazadas por otra de valor:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{6\Omega} + \frac{1}{6\Omega} \Rightarrow R_{BD} = 3\Omega$$

El circuito queda entonces simplificado así:



Razonando de igual manera se tiene que la resistencia equivalente a esta última y R_3 equivale a:

$3\ \Omega + 1\ \Omega = 4\ \Omega$ y entre el nudo A y C la resistencia total vale entonces:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4\ \Omega} + \frac{1}{4\ \Omega}$$

o sea $R_{AC} = 2\ \Omega$, la cual está en serie con R_1 , por lo que la resistencia equivalente a todas las conectadas en el circuito vale:

$$R_{\text{total}} = 4\ \Omega$$

La corriente que pasa desde la fuente, también llamada corriente principal o I_0 tiene un valor fácilmente calculable por la Ley de Ohm:

$$40\ \text{V} = 4\ \Omega \cdot I_0 \Rightarrow I_0 = 10\ \text{A}$$

Las corrientes derivadas se calculan también por la Ley de Ohm de esta manera:

en primer lugar es necesario calcular la diferencia de potencial entre los puntos A y C razonando que:

$$V_{AC} = R_{AC} \cdot I_{AC}$$

donde I_{AC} es la corriente que entra por A y sale por C, que en este caso es I_0 , y R_{AC} es la resistencia equivalente al total de resistencias conectadas entre esos nudos. Entonces:

$$V_{AC} = 20\ \text{V}$$

Por aplicación nuevamente de la Ley de Ohm, se puede calcular el valor de cada una de las corrientes derivadas entre los nudos A y C, dado que 20 V es la diferencia de potencial entre las que se encuentran de las dos ramas en que se bifurca el circuito. Por lo tanto:

$$I_{AC} = \frac{20\ \text{V}}{4\ \Omega} = 5\ \text{A}$$

Este resultado es válido para ambas ramas, ya que la corriente se encuentra, en este ejemplo, con la misma resistencia. Un razonamiento cualitativo que puede orientar la solución es suponer que la corriente sigue prioritariamente el camino de menor resistencia: será mayor en la rama que presente menor resistencia. En este caso en ambas ramas se encuentra con resistencias idénticas, por lo que se reparte en mitades.

Finalmente, para calcular las corrientes que circulan por las otras ramas del circuito, es necesario volver a calcular la diferencia de potencial entre los puntos B y D, entre los cuales se separan.

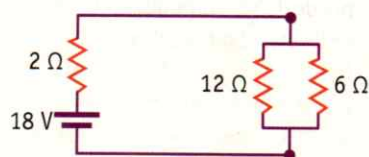
$$V_{BD} = R_{BD} \cdot I_{BD} = 3\ \Omega \cdot 5\ \text{A} = 15\ \text{V}$$

$$\text{Y además } I_{BD} = \frac{15\ \text{V}}{6\ \Omega} = 2,5\ \text{A para cada rama.}$$

Con los valores que se han obtenido se puede calcular el valor de la potencia de cualquier elemento del circuito que se desee.



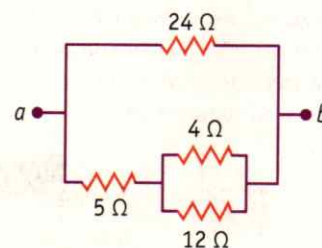
10. En el circuito de la figura calculen la intensidad de corriente en cada una de las resistencias.



11. Calculen en el circuito de la figura:

a. la resistencia equivalente entre los puntos a y b;

b. la intensidad de corriente en cada resistencia si se aplica entre a y b una diferencia de potencial de 48 volt.



Celdas de combustible

NUESTRO PAÍS OBTIENE LA MAYOR CANTIDAD DE SU ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE SU "PARQUE TÉRMICO", ES DECIR, POR COMBUSTIÓN DE HIDROCARBUROS.

Los hidrocarburos también se aplican ampliamente a la producción de energía mecánica. Este proceso tiene, entre otros aspectos, una gran desventaja: produce dióxido de carbono (CO_2) que es un gas cuya acumulación por encima de ciertos niveles está relacionada con trastornos ecológicos importantes, especialmente el efecto invernadero. En el mundo desarrollado, la reducción de las emisiones de CO_2 se ha convertido en un desafío. Estos intentos se orientan en dos líneas: utilizar combustibles de origen no fósil, o aumentar el rendimiento de los convertidores de energía que emplean hidrocarburos. En el primer caso, intervienen los dispositivos llamados **celdas de combustible**, que permiten la conversión de la energía de una reacción química en energía eléctrica. En el caso más sencillo se aprovecha la reacción de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno. Para ello, se separan ambos gases por un electrolito sólido, o "conductor iónico", que puede conducir por iones óxido (O^{2-}) o por protones hidrógeno (H^+). El electrolito permite el transporte de los iones de un lado al otro de la celda para

producir la reacción entre ambos gases.

Propuesta en 1839 por William Grove, la posibilidad de obtener energía eléctrica mediante celdas de combustible recién fue aplicada en el programa espacial de los Estados Unidos durante la década de los sesenta, para dar energía eléctrica, calor y agua a las misiones Apolo.

Existen distintas clases de celdas de combustible, que se diferencian por el tipo de electrolito empleado y la temperatura a la que operan. En la actualidad los dos tipos que reciben la atención de los centros de investigación y de las grandes empresas de energía son:

a. las celdas que operan a temperaturas más bajas, de aproximadamente 80°C , denominadas *celdas de membrana de intercambio protónico* (PEMFCs), que emplean electrolitos poliméricos que conducen por H^+ . Las PEMFCs requieren H_2 de alta pureza, que es relativamente difícil de producir y de almacenar. Además, se degradan en presencia de monóxido de carbono (CO), aun en muy bajas proporciones. Por lo tanto, en el caso de que se desee emplear PEMFCs para generar

energía a partir de hidrocarburos, es necesario introducir una etapa previa de conversión de los hidrocarburos a H_2 , conocida como *reformado externo*;

b. las *celdas de combustible de óxido sólido* (SOFCs) que, en cambio, normalmente emplean electrolitos cerámicos basados en dióxido de zirconio (ZrO_2) que conducen por anión O^{2-} a muy alta temperatura ($800-1000^\circ\text{C}$). Las SOFCs pueden operar directamente con H_2 , metano (CH_4), gas natural u otros hidrocarburos. El rendimiento de estas celdas llega al 65 %. Son las de mayor eficiencia, a pesar de su alta temperatura de operación. Actualmente existe una tendencia mundial hacia el estudio de SOFCs de temperatura intermedia (IT-SOFCs), que operan a temperaturas entre 500 y 700°C , que emplean nuevos materiales para electrolito y electrodo eficientes a estas temperaturas. En la Argentina está trabajando en este tema el grupo CINSO (Centro de Investigación en Sólidos), perteneciente al CONICET-CITEFA (Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas e Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas).



Si ya existen diseños de celdas de combustible que funcionan, ¿por qué creen que todavía no se ha generalizado su uso?

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ Existen dos clases de **carga** denominadas **negativa** y **positiva**. La negativa es la clase de electricidad que tienen los electrones y la positiva la que tienen los protones. Las cargas de igual signo se repelen, y las de signo contrario se atraen. No es posible crear ni destruir la carga eléctrica.

■ La **intensidad de la fuerza de interacción** entre dos cargas puntuales resulta directamente proporcional al producto de dichas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

■ Un **campo eléctrico** es una región del espacio en la que se verifican acciones eléctricas sobre los cuerpos cargados ubicados en él.

■ En el campo eléctrico existen niveles de **potencial**. Se dice que entre dos niveles eléctricos distintos existe una diferencia de potencial.

■ Una **pila** es un dispositivo que mantiene una diferencia de potencial aproximadamente constante entre dos de sus puntos.

■ Se llama **intensidad de corriente** a la cantidad neta de carga que atraviesa una sección del conductor por unidad de tiempo.

■ Los elementos de un circuito básico pueden ser conectados en **serie** o en **paralelo**.

■ La **Ley de Ohm** expresa que en los conductores metálicos la intensidad de la corriente eléctrica es proporcional a la diferencia de potencial entre sus extremos, es decir, $\Delta V = R \cdot I$.

Fórmulas

$$F_e = K \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Ley de Coulomb

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Constante de la Ley de Coulomb

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Campo eléctrico

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q}$$

Diferencia de potencial

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Intensidad de corriente

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Resistencia de un conductor cilíndrico

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Resistencia equivalente a una serie

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Resistencia equivalente a un paralelo

$$P = \Delta V \cdot I$$

Potencia en un tramo de circuito

$$P = R \cdot I^2$$

Potencia en una resistencia

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿Por qué no es posible cargar fácilmente una barra de metal si se la sostiene con la mano y sí es posible hacerlo en caso de tener un mango de aislante?

2. ¿Cómo se carga una persona que pierde electrones mientras camina?

3. ¿Por qué se dice que la fuerza eléctrica es más poderosa que la gravitatoria?

4. ¿Cómo varía la fuerza entre dos partículas cargadas si su distancia se triplica?

5. ¿Con qué signo se carga un pararrayos si se acerca una nube cargada en forma negativa? ¿Por qué?

6. ¿Por qué es importante que la carga de prueba sea pequeña para definir la medida del campo eléctrico?

7. Se frota una varilla de vidrio y ésta se carga en forma positiva. Si atrae a un objeto, ¿es suficiente para afirmar que el objeto tiene carga negativa?

8. ¿Cuánto vale la resistencia equivalente a dos resistencias de $4\ \Omega$ cuando se conectan en serie? ¿Y cuando se conectan en paralelo?

9. ¿Por qué Volta apiló varios discos en lugar de usar solo dos?

10. ¿Cuál es la resistencia de un artefacto eléctrico si circula una corriente de 15 amperes cuando está conectado a 220 volt?

11. ¿Por qué si estamos aislados disminuye el peligro al cambiar una lamparita eléctrica?

12. ¿Tienen peligro de sufrir descargas eléctricas los pasajeros de un avión que vuelan en medio de una tormenta eléctrica?

13. ¿Por qué el kwh es una unidad de energía y no de potencia?

14. Un aparato de mayor potencia, ¿consume necesariamente más energía?

15. ¿A qué distancia deberían estar separados dos protones para que la fuerza de repulsión entre ambos sea igual a su peso? (La masa del protón es de aprox. $1,7 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ y su carga $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$.)

16. La fuerza de atracción entre dos esferas cargadas es de $5,4 \cdot 10^{-3}\text{ N}$. Si la distancia que las separa es de 1 cm, y una de las esferas está cargada con $3 \cdot 10^{-8}\text{ C}$, ¿cuál es el valor de la carga de la segunda esfera?

17a. ¿Cuál es la intensidad de la fuerza de interacción entre dos cargas puntuales de $+12 \cdot 10^{-8}\text{ C}$ y de $-8 \cdot 10^{-8}\text{ C}$, si se encuentran en el aire separadas 15 cm una de otra?

b. ¿Cuál sería la fuerza resultante sobre cada carga si se ubica una tercera carga de $+5 \cdot 10^{-8}$ entre ambas y en el punto medio del segmento determinado por ellas?

18. Para que la intensidad de una corriente sea de 13,6 mA, ¿cuánta carga debe atravesar la sección del conductor en un segundo?

19. ¿Cuál deberá ser el largo de un cable conductor de cobre de 2 mm de diámetro para tener una resistencia de $2\ \Omega$? (La resistividad del cobre es $1,72 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$.)

20. ¿Cuánta energía eléctrica requiere en un mes un televisor de 80 W que funcione durante 4 horas todos los días? Averigüen el costo del kwh y estimen el gasto.

21. Por un cable de $0,20\ \Omega$ circula una corriente de 10 A. ¿Cuánto vale la potencia desprendida por calentamiento?

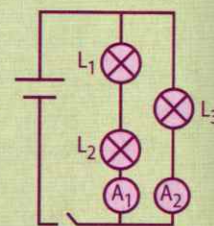
22. Una plancha de 1200 W se conecta a una línea eléctrica domiciliar de 220 V protegida con una llave térmica que se desconecta cuando pasa una corriente superior a 10 A. ¿Logrará funcionar?

23. En el circuito de la figura se muestra la conexión de tres lámparas idénticas.

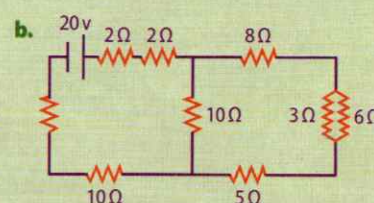
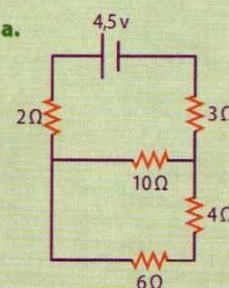
a. ¿Cuál es la lámpara que prende con la máxima intensidad al cerrar la llave?

b. ¿Cómo son entre sí las lecturas de cada amperímetro?

c. ¿Cuál o cuáles de las lámparas permanecen encendidas si se corta el filamento de L_2 ?



24. ¿Cuánto vale la resistencia equivalente total de resistencias conectadas en cada uno de los siguientes circuitos? ¿Cuánto vale la intensidad de corriente en cada una de las ramas?



AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen sus respuestas.

1	Solo es posible cargar eléctricamente a los materiales conductores.	☐
2	El vidrio siempre se carga en forma positiva.	☐
3	Un cuerpo con exceso de electrones está cargado en forma negativa.	☐
4	Un cuerpo puede ser conductor o aislante según las circunstancias.	☐
5	Al tocar un cuerpo conductor con un objeto cargado éste se descarga totalmente.	☐
6	Cuando un cuerpo se polariza, su carga neta permanece constante.	☐
7	Con un electroscope se puede saber que un cuerpo tiene carga pero no qué clase de carga tiene.	☐
8	La jaula de Faraday aísla campos eléctricos.	☐
9	En una tormenta eléctrica se está más protegido dentro del auto que fuera de él.	☐
10	Los teléfonos celulares no funcionan bien dentro de los ascensores.	☐
11	La ley de Coulomb postula que la masa es equivalente a la carga eléctrica.	☐
12	Si la distancia entre dos cargas se disminuye a la décima parte, la fuerza eléctrica se centuplica.	☐
13	El campo eléctrico de una carga negativa es entrante como el gravitatorio.	☐
14	Siempre que se acerca una carga a otra, su energía potencial disminuye.	☐
15	Una pila guarda corriente eléctrica.	☐
16	Siempre que se acerca una carga a otra, su energía potencial disminuye.	☐
17	La Ley de Ohm es válida para cualquier conductor.	☐
18	Si hay dos resistencias en serie y una de ellas se corta, la otra sigue siendo atravesada por una corriente eléctrica.	☐
19	Dos resistencias conectadas en serie pueden ser equivalentes a otra menor a ambas.	☐
20	No hay manera de cambiar la resistividad de los materiales.	☐

(...) vi (...) a esa joven en la que jamás había pensado más de tres segundos consecutivos. Y de pronto descubrí en ella (...), un encanto dulce, una lánguida atracción...

Todos ustedes han tenido sueños singulares, ¿verdad?(...)

(...) Sin saber qué hacer, me vestí y fui a verla... todo mi sueño se hizo realidad (...)

-¿Qué conclusión saca de esto?-preguntó una voz.

-(...) Llego a la conclusión de una coincidencia, ¡por Dios!

-Todo lo que usted quiera-concluyó uno de los comensales- ¡pero si no cree en el magnetismo después de esto, es usted un ingrato, mi querido señor!

Magnétisme, Guy de Maupassant

CONTENIDOS

- Imanes
- Fenómenos magnéticos
- Campo magnético
- Campo magnético y cargas en movimiento
- Inducción electromagnética
- Ley de Faraday
- Propiedades magnéticas de la materia
- Magnetismo terrestre

11

ELECTROMAGNETISMO

El electromagnetismo es la parte de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos. En otras épocas se creía que estos fenómenos eran esencialmente distintos pero, en la actualidad, se sabe que ambos se encuentran unidos en una única interacción fundamental llamada electromagnética.

En 1820, el físico y químico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) realizó un descubrimiento sorprendente: una corriente eléctrica podía desviar la aguja magnética de una brújula que se encontrara próxima al cable de conducción. Sus observaciones motivaron una serie de investigaciones que permitieron organizar la teoría electromagnética y englobar en ella un gran número de fenómenos que hasta ese momento se habían explicado parcialmente. Algunos de ellos serán tratados en el presente capítulo.

Se analizarán en primer término los conceptos generales de magnetismo para relacionarlos luego con algunos temas de electricidad del capítulo anterior.

Se verá que la fuerza eléctrica y la fuerza magnética son distintas manifestaciones de una misma interacción fundamental, y que ambas tienen su explicación en la constitución íntima de la materia.

Existen registros de que en la Antigüedad tanto los chinos como los griegos conocían los imanes naturales. En una región del Asia Menor conocida como Magnesia, abundaban unas piedras negras que tenían la misteriosa propiedad de atraer al hierro, y de conferirle idénticas propiedades. Del nombre de la región proviene el término **magnetismo**, y así se denomina en la actualidad a la rama de la física que se ocupa de estos fenómenos.

La interacción electromagnética es la que explica la formación de estructuras de escala humana, es decir los cuerpos de tamaño menor que el planetario. Sin embargo, la naturaleza de las fuerzas eléctricas y magnéticas mostró ser más difícil de interpretar que la fuerza gravitatoria.



Es posible encontrar referencias a brazaletes, anillos y talismanes magnéticos en relatos de magia y brujería de la Edad Media, así como en modernas propagandas, donde se ofrece una variada gama de productos con supuestas propiedades terapéuticas o con la capacidad de influir en el destino humano. Una curiosa referencia histórica, con la que es posible ilustrar lo dicho, es el método llamado *mesmerismo*, nombrado así por su creador Franz Antón Mesmer (1733-1815). Este médico austriaco formuló la teoría del magnetismo animal según la cual las enfermedades, en particular las nerviosas, correspondían a un desequilibrio en la circulación de un fluido magnético. Este fluido, vinculado con los imanes, en teoría emanaba del brillo de los ojos, y al llevar a los pacientes al estado de sonambulismo, éstos mejoraban mediante el equilibrio en la circulación del hipotético fluido magnético. Sus seguidores recibieron el nombre de magnetizadores y, algunas opiniones sostienen que sus trabajos tuvieron el mérito de instalar la fase experimental de la psicoterapia.

Con la revolución científica de la modernidad y el desarrollo de la experimentación como herramienta metodológica, el magnetismo se convirtió en una disciplina científica. Su organización comenzó a partir de los trabajos de Gilbert (1544-1603). En su libro *De magnete* expone que la Tierra misma es un gran imán, y lo prueba con una esfera magnetizada y pequeños imanes que simulan brújulas. Gilbert llegó a sostener que el magnetismo es el motivo que explica la rotación terrestre y los movimientos planetarios en general. En el contexto de las revolucionarias consecuencias de la teoría copernicana del universo, algunos pensadores supusieron que los trabajos de Gilbert sobre el magnetismo deberían encuadrarse en la búsqueda de la construcción de una nueva física. Como ya se vio en el capítulo 1, en esta época comenzó a estructurarse esta disciplina científica, principalmente a partir de los trabajos de Galileo y Newton.

La teoría electromagnética se completó con la importante integración teórica que constituyen las ecuaciones de James Clerk Maxwell (1831-1879), que será retomada en el capítulo siguiente.

En algunos países, como el Japón, se han diseñado trenes de levitación magnética como el que se observa en la fotografía. Estos trenes aprovechan los efectos magnéticos de la corriente eléctrica para avanzar sin rozar las vías, lo que les permite alcanzar velocidades muy altas, además de disminuir el desgaste de las piezas, las pérdidas de energía por calor, y el ruido.

La ciencia del magnetismo realizó importantes progresos experimentales en la Edad Media. En el año 1269, Petrus Peregrinus de Maricourt, cruzado francés del que se desconocen la fecha de nacimiento y de muerte, escribió en su libro *Epistola de magnete* un comentario acerca del uso, común en la época, de brújulas flotantes. También describió un nuevo diseño con la aguja sostenida sobre un pivote. Sus trabajos fueron muy reconocidos en su tiempo y pueden considerarse como precursores de la metodología científica moderna.

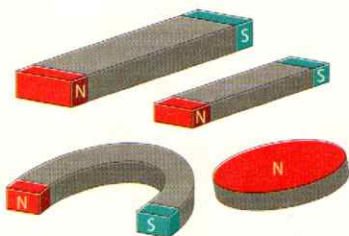


Brújula inglesa.

Brújula china.



1. ¿Cuáles de los siguientes imanes elegirían para realizar la experiencia representada en las figuras A y B de esta página? ¿Por qué?



Imanes

La **piedra imán**, también conocida como **magnetita** o **calamita**, es un imán natural que, desde el punto de vista químico, es un óxido de hierro. Un poco después del año 1000 ya se usaba en la navegación una aguja de hierro, previamente frotada contra una piedra imán, que se orientaba al norte cuando se la dejaba libre, por ejemplo al flotar sobre un recipiente con agua. Recién después de la publicación de los trabajos de Gilbert se relacionó este hecho con otro imán natural: el planeta Tierra. Este investigador utilizó como diseño experimental una esfera magnetizada que llamó *terrella*, o pequeña Tierra. Al mover una aguja magnetizada alrededor de la *terrella* mostrando que siempre apuntaba en dirección norte-sur, le probó a la reina Isabel I de Inglaterra que con la Tierra ocurría lo mismo, aunque a mayor escala, y por esa razón las brújulas marcaban esa misma dirección.

De esta relación geográfica toman los nombres norte y sur, las dos zonas de máxima atracción, o polos magnéticos, que presentan todos los imanes. El polo norte de cualquier imán es el que, orientado libremente, señala aproximadamente al norte geográfico. La interacción entre los polos es análoga a la interacción entre las cargas eléctricas, en el sentido de que polos de igual nombre se repelen, mientras que los de nombre contrario se atraen.

Otra similitud importante se basa en que las fuerzas magnéticas, como las eléctricas, dependen de la inversa de los cuadrados de la distancia.

Charles Coulomb, utilizando una versión de la balanza de torsión adaptada a las acciones magnéticas, encontró una ley empírica que permitía relacionar la intensidad de la fuerza magnética de atracción y repulsión con la distancia que separa los polos que interactúan.

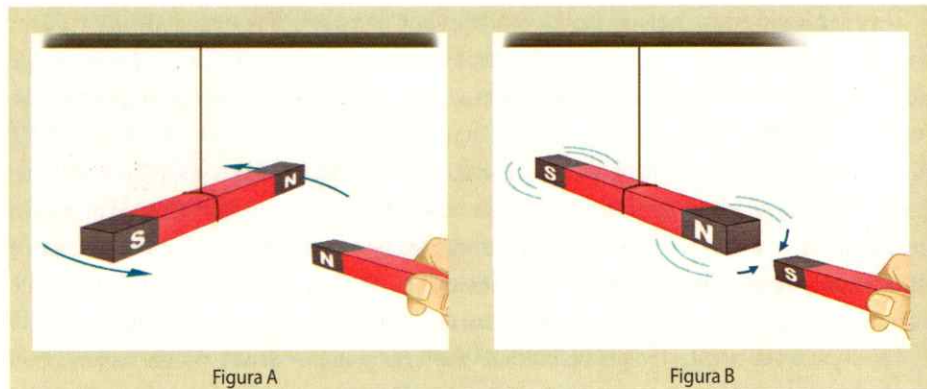


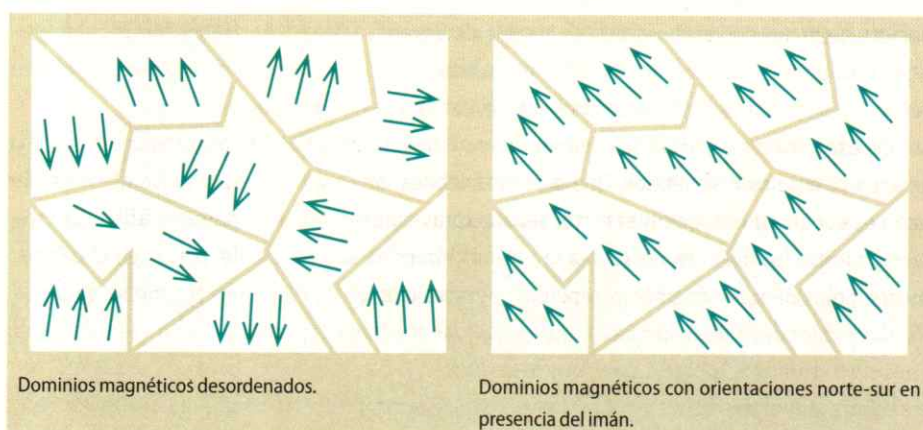
Figura A

Figura B

Existe una diferencia importante entre los fenómenos magnéticos y los eléctricos: si bien es posible que un cuerpo adquiriera carga eléctrica de uno u otro signo, no se puede lograr que un cuerpo tenga solo una clase de polo magnético. No existe el monopolio magnético ni está prevista su existencia dentro de la teoría electromagnética actual. Si se corta un imán recto que tiene en sus extremos un polo norte y otro sur, cada una de las partes presenta ambos polos nuevamente. Aunque se siga fragmentando el imán, con la intención de separar ambos polos, se vuelven a obtener nuevos imanes con la presencia tanto de un polo norte como de uno sur.

Esto se explica por la particular estructura de los imanes, que pueden considerarse como un conjunto de pequeños dipolos magnéticos. Estos dipolos pueden estar organizados en regiones llamadas dominios magnéticos. En estas zonas, que pueden tener distintas formas y tamaños, existe una organización local de los dipolos, de tal manera que hay en cada una de ellas un polo norte y sur resultante. De la orientación similar o diferente de los dominios magnéticos del material depende que el cuerpo se manifieste como imán o no lo haga.

La presencia de dominios magnéticos en la estructura de algunos pocos materiales también explica por qué un imán puede conferirle sus propiedades a un trozo de hierro no magnetizado y no a otros materiales. Este hecho constituye una diferencia importante entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos, y llevó a considerarlos en un comienzo como esencialmente distintos. El ámbar frotado adquiere la propiedad de atraer varios materiales, mientras que la magnetita parecía atraer solo al hierro, además de conferirle a éste sus propiedades. Este material, como algunos otros, tiene en su estructura dominios magnéticos que están, en un principio, desordenados. Es decir que las orientaciones norte-sur de los dipolos apuntan en direcciones distintas y aleatorias.



En presencia del imán, los dominios magnéticos se orientan y, de esta manera, el material resulta también magnetizado. Normalmente, este ordenamiento se pierde cuando se aleja el imán original, aunque puede suceder que permanezca. Este hecho, además de otros factores, depende de la llamada **dureza magnética** del material. Si el cuerpo permanece magnetizado, se obtiene un imán artificial. Existen otros procedimientos para la obtención de imanes artificiales que se analizarán más adelante.

El hierro llamado dulce normalmente vuelve al estado caótico, mientras que el acero frecuentemente permanece magnetizado. Otros elementos además del hierro presentan estas mismas propiedades, por lo que son conocidos como **ferromagnéticos**. Ellos son el cobalto, el níquel y algunos otros pertenecientes al grupo de los designados químicamente como tierras raras. También son ferromagnéticas algunas aleaciones de estos elementos con otros metales.

Es posible hacer perder a un imán sus propiedades magnéticas, por ejemplo por efecto del aumento de su temperatura. De acuerdo con lo analizado en el capítulo 8, esto puede entenderse como un aumento en el promedio de energía cinética de las partículas del material. La agitación microscópica puede tener el efecto de desordenar la estructura, desde el punto de vista magnético. La temperatura a la cual pierden su efecto magnético varía en los distintos materiales y se llama temperatura de Curie, ya que fue Pierre Curie el primero en registrar el fenómeno. Por ejemplo, el hierro pierde sus propiedades ferromagnéticas a los 770 °C. Los imanes permanentes más comunes están hechos de una aleación de aluminio, níquel y cobre llamada **alnico**, que resiste altas temperaturas. También son muy usados los imanes denominados **cerámicos** por sus propiedades físicas. Son de bajo costo y es posible fabricarlos de variadas formas. Algunos están compuestos por un conglomerado de partículas ferromagnéticas aglutinadas por alta presión y temperatura. Otros, por hierro, bario y estroncio. Actualmente existen dos tipos de imanes de tierras raras: los de neodimio-hierro-boro y los de samario-cobalto. Son imanes muy poderosos que necesitan ser producidos en hornos de alto vacío. Debido a los efectos térmicos comentados anteriormente, los imanes de neodimio-hierro-boro requieren temperaturas de trabajo que no excedan los 80 °C y los de samario-cobalto, los 350 °C aproximadamente.

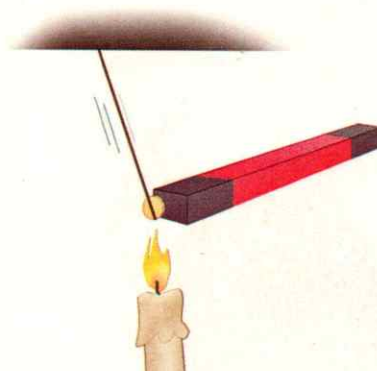
Pérdida de las propiedades magnéticas a la temperatura de Curie

Materiales

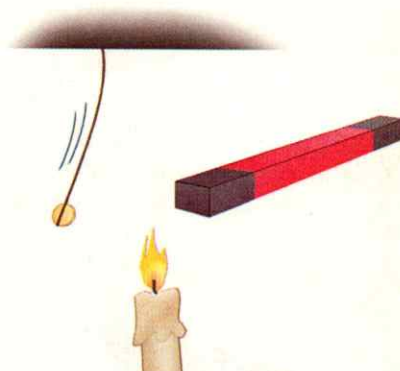
Aritos magnéticos que se venden como adorno, y son pequeños imanes de tierras raras. Hilo metálico o cadenita. Imán de cerámica o alnico. Fuente de calor, como por ejemplo, una vela.

Procedimiento

1. Cuelguen a modo de péndulo uno o varios de estos aritos magnéticos, usando el hilo metálico o la cadenita.
2. Con el otro imán atraigan al péndulo para que quede separado de la vertical y justo debajo de la fuente de calor.



3. ¿Qué observan cuando alcanza la temperatura adecuada?



Campo magnético

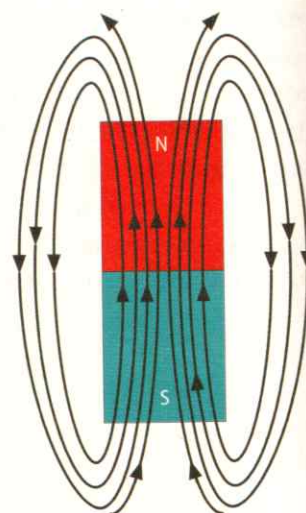
Se llama **trampas magnéticas** a unos dispositivos diseñados para extraer residuos de minerales ferromagnéticos de múltiples productos comerciales como alimentos, aceites lubricantes, plásticos, etc. Se utilizan para esto potentes imanes, normalmente cerámicos, que rodean a unos tubos por los que circula el material del que se desea extraer estas partículas.

El espacio que rodea a un imán es el asiento de un campo magnético, de la misma manera que se analizó para fenómenos gravitatorios y eléctricos. Éste queda determinado en cada punto por el **vector inducción magnética**, cuyo símbolo es $\vec{B}$.

El **campo magnético** también puede ser representado por unas líneas imaginarias que se llaman líneas de inducción magnética. Se dibujan de tal manera que, imaginando una superficie cualquiera en el campo, el número de líneas que atraviesan cada unidad de superficie es directamente proporcional a la intensidad del vector $\vec{B}$. Se puede interpretar que su intensidad es alta cuando las líneas están muy juntas.

La no existencia del monopolio magnético determina que las líneas de inducción magnética sean cerradas: por convención, salen del norte y van hacia el sur en el exterior del imán, para cerrar su recorrido yendo del sur hacia el norte por dentro del imán.

La dirección del vector inducción es en todo momento tangente a estas líneas y su sentido sigue la convención indicada para las líneas de inducción. En el apartado siguiente se dará una definición más precisa del vector $\vec{B}$.



Obtención de espectros magnéticos

Se llama espectro magnético a una manera de visualizar los campos magnéticos a partir de la orientación en él de pequeñas limaduras de hierro, las que pueden considerarse como pequeñas brújulas. Ellas se ordenan formando líneas que representan las líneas de inducción del campo. Es muy fácil obtener espectros magnéticos. Resultan también muy útiles para visualizar cómo varía la influencia del imán en las distintas zonas de su campo.

Materiales

Distintos imanes. Limaduras de hierro. Un trozo de cartulina o papel blanco.

Procedimiento

1. Coloquen cada uno de los imanes debajo del papel blanco, en cualquier posición.

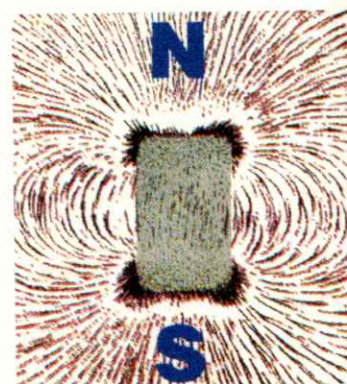
2. Espolvoreen, sobre la hoja, en forma pareja, las limaduras de hierro. Observarán que se forma el espectro magnético correspondiente a una sección en particular del campo del imán.

3. Localicen la ubicación de los polos.

4. Repitan la experiencia con distintas ubicaciones de un imán, con imanes distintos, y con varios de ellos colocados unos cerca de otros. Una vez que localicen los polos de cada imán, puede resultar interesante colocar un par de ellos con los polos de igual nombre próximos, y luego con los polos contrarios enfrentados.

5. En cuanto se retira el imán, las limaduras se desordenan. Si les interesa conservar su orientación,

pueden fijarlas con algún procedimiento. Una sugerencia puede ser cubrir la hoja de cartulina con cola vinílica algo diluida, para que las limaduras puedan nadar hasta orientarse y luego quedar atrapadas cuando la cola vinílica se seca.



A partir de los espectros, se puede visualizar el campo magnético y, en particular, la ubicación de los polos.

Campo magnético y cargas en movimiento

Si una carga eléctrica se coloca en reposo en un campo magnético, no opera sobre ella ninguna fuerza debida a este campo. Sin embargo, si la carga atraviesa el campo magnético con una cierta velocidad, experimenta una desviación lateral, que pone en evidencia la acción de una fuerza sobre ella. Esta fuerza de interacción magnética permite asociar a la carga en movimiento un campo magnético propio. La interacción de este campo propio con el externo genera la fuerza de origen magnético que actúa sobre ella.

La intensidad de la fuerza que desvía lateralmente la carga eléctrica puede calcularse a partir de la trayectoria que sigue la carga. Toma su valor máximo cuando la dirección de la velocidad es perpendicular a la del vector $\vec{B}$ en el punto en el que la carga ingresa al campo, mientras que la fuerza es nula si las direcciones coinciden.

Si se supone que se puede medir el valor de la fuerza máxima de desviación lateral, que se denotará como $F_{\perp}$ y el valor de la velocidad V con que la carga eléctrica ingresa al campo magnético, es posible definir la **intensidad del vector inducción magnética** en ese punto como:

$$B = \frac{F_{\perp}}{q \cdot V}$$

donde B es la intensidad del vector inducción magnética, $F_{\perp}$ es el valor de la fuerza máxima de la desviación lateral, V la velocidad con la que la carga ingresa al campo, y q el valor de la carga del cuerpo en movimiento.

La unidad del Sistema Internacional de Unidades para la inducción magnética es llamada **tesla**, cuyo símbolo es T y se define como:

$$1 \text{ tesla} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{coulomb} \cdot \frac{\text{metro}}{\text{segundo}}} \quad \text{es decir} \quad T = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

Es muy común reemplazar $\frac{\text{C}}{\text{s}}$ por A (ampere) con lo cual $T = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$.

La expresión general que permite relacionar estas magnitudes requiere el uso de una operación especial entre vectores: el producto vectorial. De esta manera, es posible expresar en forma general la fuerza de interacción magnética $\vec{F}$ de la siguiente manera:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B} \quad \text{y} \quad |\vec{F}| = q \cdot |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin(\alpha)$$

donde $\vec{V}$ es el vector velocidad, $\vec{B}$ es el vector inducción magnética y α el ángulo entre los vectores $\vec{V}$ y $\vec{B}$.

La dirección de $\vec{F}$ es perpendicular a las de los otros vectores y su sentido puede determinarse siguiendo la **regla del tirabuzón**: es decir que, suponiendo un tirabuzón apoyado sobre la carga y haciéndolo girar desde el vector $\vec{V}$ hacia el vector $\vec{B}$, avanzaría en el sentido de la fuerza.

En las deducciones anteriores se supuso que la carga que ingresaba al campo era positiva. Una carga negativa experimenta una fuerza opuesta a la de una positiva, lo cual se expresa colocando un signo menos a su valor en la ecuación. Es importante destacar que el producto vectorial no es conmutativo.

Si una partícula cargada se mueve en una región del espacio donde, además de un campo magnético, hay un campo eléctrico capaz de interactuar con el propio, la fuerza resultante sobre ella es la combinación de las interacciones eléctricas y magnéticas, cuya expresión es la llamada **relación de Lorentz**, en honor a Henry Lorentz (1853-1928).

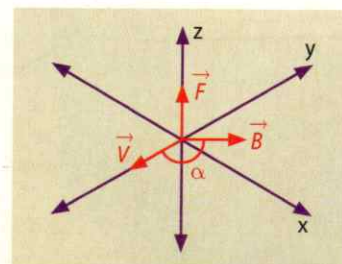
El **producto vectorial** entre dos vectores $\vec{u} = (u_1; u_2; u_3)$ y $\vec{v} = (v_1; v_2; v_3)$ es un nuevo vector que se define como:
 $\vec{u} \times \vec{v} = (u_2 v_3 - u_3 v_2; u_3 v_1 - u_1 v_3; u_1 v_2 - u_2 v_1)$

Algunas de sus propiedades son:

■ $\vec{u} \times \vec{v}$ es perpendicular a $\vec{u}$ y a $\vec{v}$.

■ $|\vec{u} \times \vec{v}| = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \sin \alpha$, donde α es el ángulo comprendido entre $\vec{u}$ y $\vec{v}$.

■ $\vec{u} \times \vec{v} \neq \vec{v} \times \vec{u}$ es decir, el producto vectorial no es conmutativo.

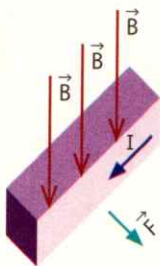




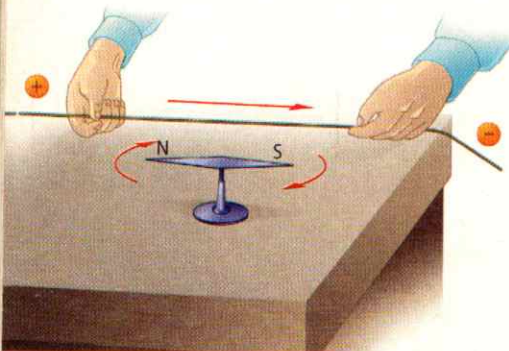
2. Una partícula α cuya carga eléctrica positiva es de $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ penetra con una velocidad de módulo $2 \cdot 10^4 \text{ m/s}$ a una región en la que hay un campo magnético perpendicular a su trayectoria cuyo módulo es $0,1 \text{ T}$. Calculen el valor de la fuerza que actúa sobre ella y realicen un esquema que represente una posible orientación de la velocidad, el campo magnético y la fuerza.

3. Hagan un esquema en el que se indique la velocidad de un electrón y alguna posible orientación de los vectores campo eléctrico y campo magnético para que la fuerza total sobre el pueda ser cero.

4. ¿Cuál es el módulo de la fuerza ejercida sobre un alambre de 1 m de largo por el que corre una corriente de 10 A , si el ángulo entre él y el campo magnético de 2 T en el que se encuentra es de 30° ?



El sentido de la fuerza que experimentaría el alambre sería saliente respecto de esta página.



Aplicaciones de la fuerza de interacción magnética

Después de ser acelerado por un campo eléctrico, un electrón ($q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) alcanza una velocidad cuyo módulo vale el 10% de la velocidad de la luz. Si ingresa a un campo magnético de $1,5 \text{ T}$ perpendicular a la dirección de su velocidad, ¿cuánto vale el módulo de la fuerza que experimenta?

La velocidad del electrón es el 10 % de la velocidad de la luz, por lo tanto
 $|\vec{V}_e| = 0,1 \cdot c = 0,1 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

Como además $\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B}$, se tiene que $|\vec{F}| = q \cdot |\vec{V}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin(\alpha)$, donde α es el ángulo entre $\vec{V}$ y $\vec{B}$ que, como son perpendiculares es de 90° . Luego:

$$|\vec{F}| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3 \cdot 10^7 \text{ m/s} \cdot 1,5 \text{ T} \cdot \sin 90^\circ = 7,2 \cdot 10^{-12} \text{ N}$$

El módulo de la fuerza es entonces de $7,2 \cdot 10^{-12} \text{ N}$.

Magnetismo y corriente eléctrica

En el capítulo 10 se explicó que la corriente eléctrica implica cargas en movimiento en un conductor. Es esperable, entonces, que un campo magnético ejerza también una fuerza lateral sobre un cable por el que circula una corriente eléctrica, así como lo hace sobre una carga eléctrica individual y en movimiento respecto de él.

Esta fuerza se calcula a partir de la expresión:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

en la que $\vec{F}$ es la fuerza de origen magnético que actúa sobre un conductor de largo l por el que circula una corriente eléctrica de intensidad i cuando se lo coloca en un campo magnético de inducción $\vec{B}$.

Esta fórmula puede considerarse análoga de $\vec{F} = q \cdot \vec{V} \times \vec{B}$, analizada en el apartado anterior.

En este análisis, la correspondencia a nivel macroscópico se establece llamando $\vec{l}$ al vector que representa, en su módulo y dirección, una longitud de un tramo recto de alambre, siendo su sentido el de la corriente i que circula por él.

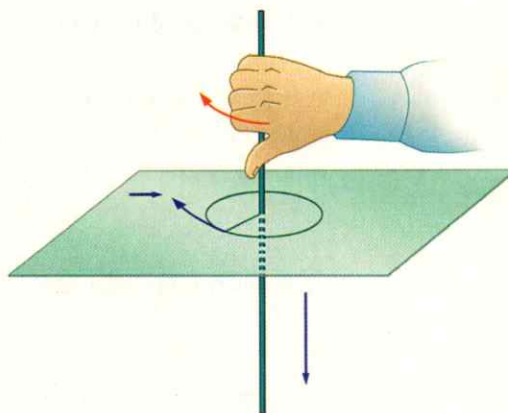
El primero en notar la relación entre la corriente eléctrica y el magnetismo fue Christian Oersted (1777-1851) cuando, en 1820, se encontraba con sus alumnos realizando algunos experimentos con corrientes eléctricas. Ellos observaron que la aguja de una brújula que estaba cerca se movía tomando una orientación distinta de la geográfica cada vez que la llave del circuito se cerraba, es decir cuando circulaba corriente.

Oersted difundió el fenómeno observado y las explicaciones que encontraba para este efecto. El francés André Marie Ampère pensó que la atracción que se observaba en la brújula también podría experimentarla otro cable conductor de corriente que se encontrara próximo. Realizó una serie de experimentos en los que demostró que corrientes de igual sentido determinaban una atracción entre los cables, mientras que corrientes de sentidos contrarios provocaban una repulsión entre ellos. Calculó también, a partir de cuidadosas mediciones, que la fuerza entre dos conductores rectos y paralelos dependía inversamente de la distancia entre ambos y directamente de la intensidad de corriente que circulaba por ellos.

Estos fenómenos muestran que existe una relación fundamental entre las interacciones eléctricas y las magnéticas. Dicho de otro modo, existen dos **fuerzas** asociadas a la electricidad: la **eléctrica** y la **magnética**. Esta última supone la presencia de un campo magnético que se genera cada vez que una carga está en movimiento.

Por lo tanto, alrededor de todo cable por el que circula corriente, existe un campo magnético de líneas circulares que rodean al conductor. El vector $\vec{B}$ asociado a este campo es, como ya se dijo, tangente a las líneas, y su sentido se determina por la *regla de la mano derecha*.

Ampère interpretaba las interacciones como acciones a distancia, por lo que no consideraba la presencia de un campo de fuerzas. Usando campos eléctricos y magnéticos, James Clerk Maxwell redefinió sus resultados. En 1864, este científico generalizó la relación entre las interacciones eléctricas y magnéticas en ecuaciones donde también aparecía la velocidad de la luz, y probó su naturaleza electromagnética. La importancia de sus trabajos como resumen teórico de importantes teorías físicas hasta el momento independientes, será retomada en el capítulo siguiente.



El pulgar apunta en el sentido de la corriente y el resto de los dedos apunta en el sentido del vector inducción magnética.



5. ¿Qué fuerza magnética experimenta un cable recto que transporta una corriente eléctrica de 1,5 A, cuando se encuentra en un campo magnético cuyo módulo es $5 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y su dirección y sentido son coincidentes con I ?



Comprobación de la fuerza magnética sobre una corriente

Con elementos sencillos es posible realizar algunas experiencias que repiten las observaciones de Oersted y Ampère.

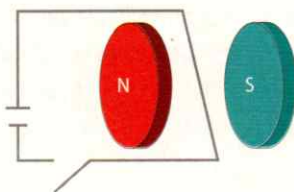
Materiales

Un par de imanes bastante potentes, por ejemplo los de aritos magnéticos o un imán en herradura. Un alambre o cable monopolar. Cuatro pilas de 1,5 V cada una conectadas en serie. Una hoja de papel blanco. Limaduras de hierro.

Procedimiento

1. Construyan un circuito con las pilas como fuente y el alambre como conductor. Conviene que el alambre sea algo largo, para aumentar la resistencia eléctrica, y de buena flexibilidad. Hagan un corte en el cable que pueda funcionar como llave interruptora. Hay que tratar de conectar las pilas el menor tiempo posible, ya que podríamos dañarlas por la conexión en cortocircuito.

2. Acomoden el diseño de manera que una cierta porción del cable pase por el campo formado por dos imanes con sus polos enfrentados. La siguiente figura esquemática puede orientar su trabajo, pero sería muy conveniente que discutan y acuerden sus propios diseños e incorporen las variaciones que crean convenientes.



3. Cierren la llave y observen la desviación lateral del cable.

4. Una vez que logren hacer funcionar el dispositivo, realicen las siguientes actividades.

- a.** En un esquema del circuito, dibujen los vectores, $\vec{I}$, $\vec{B}$ y $\vec{F}$.
- b.** Respondan: ¿qué esperan observar si invierten el sentido de circulación de la corriente?

c. Inviertan la conexión de los cables en la batería para verificar su respuesta a la pregunta anterior. Anoten sus conclusiones.

5. Armen dos circuitos con dos pilas en serie en cada uno como fuente. Comprueben las observaciones de Ampère con respecto a las fuerzas de atracción y repulsión entre cables conductores de corriente. Redacten un informe con sus observaciones.

6. Atraviesen la hoja de papel con uno de los alambres de los circuitos del punto anterior y obtengan el espectro del campo a su alrededor rociando limaduras de hierro. Pueden fijar el espectro obtenido, como se realizó en la actividad de la página 212. Puede resultar interesante perforar un solo papel con los cables de ambos circuitos y observar el espectro del campo resultante, para corrientes paralelas y antiparalelas.

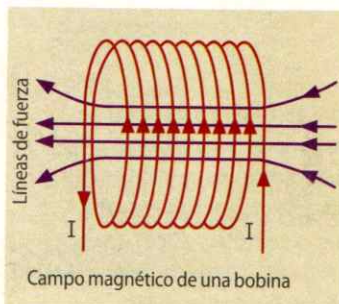
Definición del ampere

El sistema internacional de medidas (SI) tiene 7 unidades fundamentales, es decir que se definen en forma independiente mediante patrones o experimentos específicos.

Entre ellas hay una que proviene del electromagnetismo, el **ampere**. Para definir el ampere se recurre a la experiencia de la fuerza entre dos conductores paralelos.

Un ampere es el valor de la corriente que fluye en dos conductores paralelos, distanciados un metro entre sí, en el vacío, que produce una fuerza entre ambos conductores (a causa de sus campos magnéticos) de $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.

Es decir que, cuando por dos conductores paralelos y colocados en el vacío a un metro de distancia, circula una intensidad de corriente de un ampere, se atraen o repelen, según los sentidos de las corrientes, con una fuerza de veinte millones de newton por cada metro de longitud.



El campo magnético de un solenoide es similar al producido por un imán recto. Una de sus caras, de la que salen las líneas de fuerza, actúa como polo norte y la otra, como polo sur.

Campo magnético en bobinas

A partir de las observaciones y resultados teóricos de Oersted y Ampère, los efectos magnéticos de la corriente se constituyeron en el método más simple para la obtención de campos magnéticos poderosos.

Un enrollamiento de cable conductor constituye una **bobina** y permite, por una disposición espacial determinada, la obtención de campos magnéticos importantes. Una bobina como la que se muestra en la figura se denomina **solenoides**.

Los campos magnéticos alrededor de cada sección de cable se suman vectorialmente para dar un campo relativamente estable y de expresión simple en el interior de la bobina. En el exterior, el campo de inducción $\vec{B}$ creado por un solenoide es similar al de un imán. La longitud del solenoide debe ser mucho mayor que el diámetro de una de sus vueltas o espiras, para generar un campo uniforme en su interior.

Si el solenoide se dobla en forma de rosca, se llama **toroide**, que es como una bobina sin extremos. En este caso, la expresión que se aplica para calcular el campo magnético de inducción es:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{n I}{L}$$

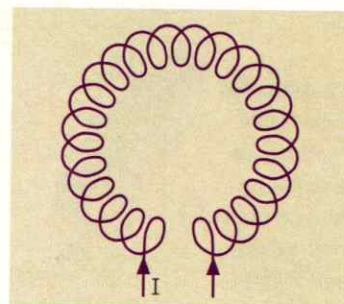
donde n es el número de vueltas o espiras de la bobina, L es su longitud, I es la corriente circulante, y μ_0 es una constante llamada **permeabilidad magnética del vacío** cuyo valor es $4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$.

Esta ecuación, que resulta exacta para un toroide, puede utilizarse con alguna aproximación para el cálculo del vector inducción magnética en el interior de un solenoide recto.

Aplicaciones del campo magnético en bobinas

Un solenoide rectilíneo tiene una longitud de 50 cm y está constituido por 400 espiras por las que circula una corriente de 1,5 A. ¿Cuánto vale el módulo del vector inducción magnética en su interior?

$$\text{Como } B = \mu_0 \cdot \frac{n I}{L}, \text{ entonces: } B = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} \cdot \frac{400 \cdot 1,5 A}{0,5 m} \Rightarrow B = 1,5 \cdot 10^{-3} T.$$



En un toroide en el que el arrollamiento del conductor eléctrico por el que circula la corriente está rodeándolo totalmente, el campo magnético es de módulo constante y su dirección es tangente a las líneas de campo que son circunferencias con centro en el centro del toroide.



6. Una bobina atravesada por una corriente de 2 A tiene en su interior una inducción magnética de valor 10^{-2} T. ¿Cuántas espiras tiene, si su largo es 30 cm?

Permeabilidad magnética

Si en el interior o núcleo del solenoide se coloca un material determinado, cambian los efectos magnéticos de manera significativa con respecto al solenoide vacío. Por ejemplo, si se coloca un núcleo de hierro en un solenoide, la magnitud del campo magnético en su interior es mucho mayor. En esas condiciones, la expresión para $\vec{B}$ toma la forma:

$$B = \mu \cdot \frac{n I}{L}$$

donde la nueva constante μ equivale a $\mu_0 \cdot \mu_r$, es decir, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.

El valor μ_r se llama **permeabilidad magnética del material relativa al vacío**.

La permeabilidad puede interpretarse como la relativa facilidad con que un determinado material permite que lo atraviesen las líneas de campo magnético.

Algunos valores de permeabilidad relativa son:

Mineral	Cobalto	Níquel	Hierro común	Hierro puro	Supermallory (aleación de hierro y níquel)
Valor de permeabilidad relativa (μ_r)	250	600	$6 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	10^6

Estos valores solo son indicativos, ya que la permeabilidad relativa de los materiales ferromagnéticos es variable.

Vector intensidad del campo magnético

Hasta el momento, el campo magnético ha sido caracterizado por el vector $\vec{B}$ de inducción magnética. Este vector toma su medida a partir de la influencia de un campo magnético sobre un material magnético, sobre una carga, o sobre una corriente eléctrica. Es posible asignar al campo un vector que se llama $\vec{H}$, o vector intensidad del campo magnético, independiente del medio en el cual induce efectos magnéticos. Este vector está relacionado con $\vec{B}$ de la siguiente manera:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

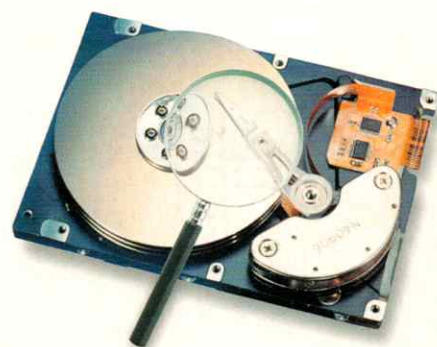
En esta expresión se usa la permeabilidad magnética del medio material que está sometido a la acción de un campo magnético de intensidad $\vec{H}$.

Histéresis

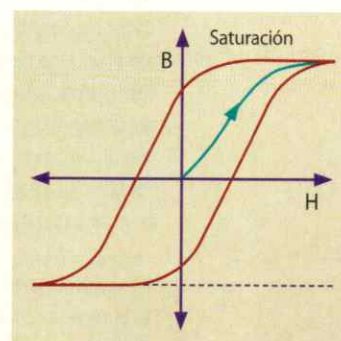
La relación entre los dos vectores magnéticos, $\vec{B}$ y $\vec{H}$, adquiere en algunos casos una forma sencilla debido a que μ es un valor constante. Éste es el caso del vacío, en el cual $\mu = \mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$, y donde la representación gráfica de esta relación en ejes B, H es una recta. Por el contrario, en los materiales ferromagnéticos como el hierro, la relación entre B y H es más complicada. Si se dibujan las curvas experimentales de la relación entre B y H, llamadas **curvas de histéresis**, se advierte que los materiales ferromagnéticos conservan un valor de campo magnético de inducción $\vec{B}$ distinto de cero, aun cuando el campo externo $\vec{H}$ que lo indujo se haga nulo, es decir que, sin estímulo externo, se comportan como imanes.

La siguiente figura representa lo que se conoce como un **ciclo de histéresis** para un material en particular, por ejemplo hierro.

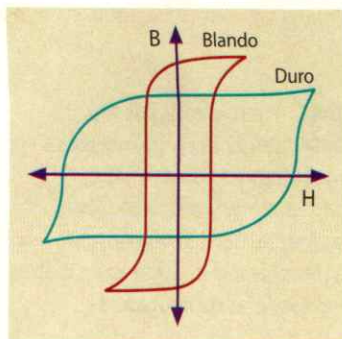
Los materiales de alta remanencia son utilizados para la fabricación de imanes permanentes; un ejemplo son las ferritas, que se emplean para almacenar información en los discos rígidos de las computadoras.



Disco rígido.



Ciclo de histéresis del hierro.



Ciclo de histéresis de materiales blandos y duros.

La pieza inicial de hierro, que no está magnetizada, comienza a recibir la influencia de un campo magnético externo y variable, de valor H . A medida que éste crece, también lo hace B . Al alcanzar un cierto valor, no aumenta más. Cuando el campo externo comienza a disminuir, también disminuye la inducción magnética B . Es posible notar que, aun cuando H se hace nulo, existe un valor de B remanente. Cuando H continúa variando hasta tomar un sentido opuesto al original, B llega a hacerse nulo. Finalmente, cuando se reinicia el proceso, el material alcanza nuevamente el valor de campo inducido máximo, que es llamado valor de saturación.

Según su ciclo de histéresis, los materiales son llamados duros o blandos. Estos últimos se imantan y desimantan fácilmente, mientras que los otros no. Las curvas de histéresis de materiales blandos y duros se muestran en la figura.

Aplicaciones de la permeabilidad magnética

¿En cuánto cambiará el resultado del problema resuelto en la página 216 si se le coloca al solenoide un núcleo de níquel?

En lugar de $B = \mu_0 \cdot \frac{nI}{L}$ es necesario considerar ahora $B = \mu \cdot \frac{nI}{L}$.

Como $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ y para el caso del níquel $\mu_r = 600$, por lo tanto $B = 9 \cdot T$.



Construcción de un electroimán

Un electroimán está constituido por un material ferromagnético alrededor del cual se enrolla un cable por el que circula corriente. Es un imán no permanente, es decir que las acciones magnéticas que es capaz de inducir se producen solo cuando circula corriente por el conductor que lo rodea. Según la dureza del material, puede transformarse en un imán relativamente permanente. El objetivo de esta actividad es obtener un electroimán y verificar experimentalmente los campos magnéticos inducidos en bobinas.

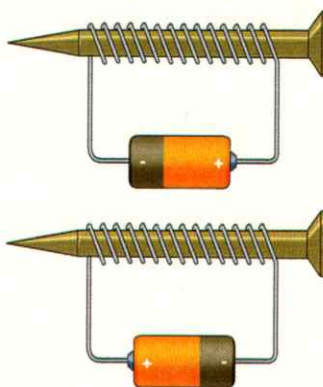
Materiales

Cable monopolar (con la cubierta aislante). Una pieza de acero o hierro que pueda usarse como núcleo (puede ser un tornillo grueso tipo bulón, o un clavo). Una o varias pilas. Algunos clips metálicos. Limaduras de hierro. Una hoja de papel o cartulina blanca.

Procedimiento

1. Es necesario formar un circuito eléctrico como indica la figura.

Pueden cambiar el diseño, por ejemplo, agregarle para mayor comodidad algo que sirva como llave interruptora. Para obtener el electroimán, deben colocar el núcleo en la bobina. Antes de realizar la experiencia, lean las actividades propuestas para que el diseño que elaboren permita realizarlas a todas.



2. Verifiquen su funcionamiento acercándolo a los clips metálicos. Deben ser atraídos cuando el circuito está cerrado y se deben soltar cuando se interrumpe la corriente.

3. Analicen las variaciones en el campo magnético inducido cuando colocan el núcleo en la bobina y cuando no lo hacen. Para esto pueden servir las limaduras de hierro y la hoja, ya que, como han hecho anteriormente, permiten visualizar el campo a través de la formación del espectro.

4. Escriban un informe donde conste el diseño del electroimán, con las eventuales modificaciones que hayan considerado pertinentes, y registren sus observaciones respecto de su funcionamiento y de las variaciones en los campos magnéticos inducidos por la bobina con su núcleo y sin él.

5. Investiguen distintas aplicaciones de electroimanes y elaboren un breve resumen de por lo menos una de ellas (ejemplos: utilización de relays, grúas, parlantes, etc.). Si lo desean, pueden intentar cambiar el material del núcleo de la bobina por otro. ¿Cualquier material sirve para esta experiencia?

Motor eléctrico

El objetivo de la presente actividad es que construyan un dispositivo muy sencillo con el que puedan comprender el funcionamiento de un motor eléctrico.

Materiales

Cable monopolar con su cubierta aislante (puede ser el de bobinar motores, aunque también sirven otros similares). Trozos de telgopor. Imanes potentes (por ejemplo los de aritos magnéticos). Dos o tres pilas. Un trozo de alambre o palito para hacer de eje del motor.

Construcción

La construcción del diseño requiere algún cuidado ya que es necesario que una pieza gire. Al estar apoyada sobre un eje, puede ocurrir que el rozamiento impida que se observe el efecto. Por otra parte, los circuitos eléctricos requieren siempre tener la precaución de que los contactos estén correctamente ensamblados.

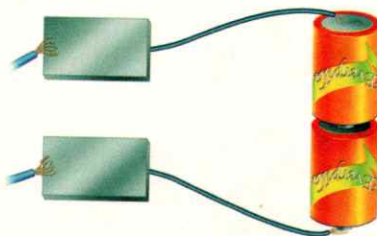
Partes del motor

a. El cable se enrolla formando una bobina, llamada **bobinado** o **rotor**, ya que es la pieza destinada a rotar. Pueden construir este bobinado con una sola espira o con varias, para potenciar el efecto, pero debe tener un eje. Pueden enrollar la espira sobre una base construida con el



telgopor, de sección rectangular para mayor simplicidad. Deben enrollar el cable como muestra la figura, dejando los extremos libres y pelados, que se llaman **delgas**. En la mayoría de los motores reales, para mejorar su funcionamiento, se colocan varias bobinas. Cada una termina en un par de delgas. A su conjunto se lo llama **colector**.

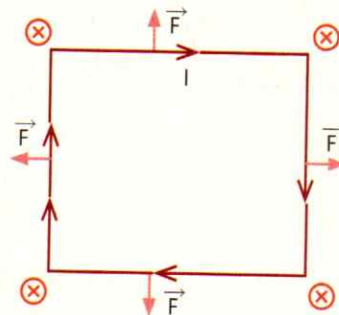
b. La bobina (o simplemente la espira) tiene que poder hacer contacto eléctrico con dos terminales conectadas a los polos de las pilas conectadas en serie. Estos contactos se llaman **escobillas**.



c. Se debe proveer al diseño de un campo magnético externo, a fin de que en su interacción con la corriente que circula por la espira aporte la fuerza suficiente para hacerla girar. Esto puede lograrse con la ubicación de los polos enfrentados de dos imanes que constituyen el **campo** del motor. En algunos motores, este campo es provisto por un electroimán.

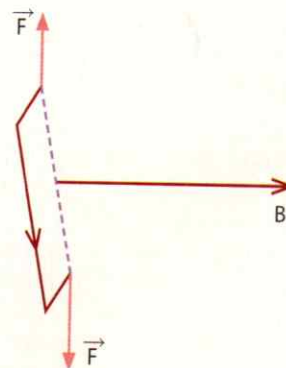
Funcionamiento

Al circular la corriente por la bobina, las fuerzas sobre los cables son diferentes:



Se usa el símbolo: $\otimes$ para indicar un campo magnético perpendicular entrante y $\ominus$ para un campo magnético perpendicular saliente respecto del plano de la hoja.

De acuerdo con lo analizado en apartados anteriores, la fuerza sobre los cables cuando se inclina la espira es:



De esta manera se explica el giro, que también tiene el efecto de desconectar las delgas de las escobillas. Podrían realizarse los arreglos como para que al girar las delgas, toquen a las escobillas de manera tal que las fuerzas que se ejercen en la parte superior y la inferior permitan continuar la rotación. Normalmente, es difícil lograr giros continuos en estos prototipos experimentales tan simples. Sin embargo, puede resultar interesante que discutan los arreglos para mejorar las condiciones y lograr un funcionamiento más o menos regular.

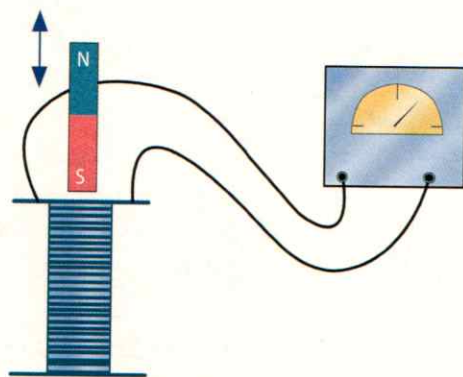


No solo en conductores finos como los cables se generan corrientes por inducción electromagnética. Como queda demostrado luego de la experiencia de Faraday, también se producen corrientes en conductores con forma de placas o láminas. Es el caso del llamado **freno magnético**. Una placa de material conductor, cobre por ejemplo, oscila libremente si está colgada a modo de péndulo, pero deja de hacerlo cuando se la ubica entre los polos de un imán. Se frena en una posición distinta de la vertical debido a la acción del campo magnético sobre la corriente inducida. La fuerza de frenado es proporcional al campo, a la velocidad del péndulo y a la conductividad del material del cual está hecha la placa oscilante. El freno magnético se aplica a automóviles y bicicletas fijas, por ejemplo. Este mecanismo consiste en algunos pequeños imanes colocados alrededor de una bobina que gira a cierta velocidad. Controlando la distancia entre ella y los imanes, es posible controlar la velocidad de giro. La fuerza que frena la bobina será mayor cuando se reduzca la distancia entre ella y los imanes.

Inducción electromagnética

Los trabajos de Oersted y Ampère resultaron decisivos en el progreso de la teoría electromagnética. Después de quedar probado que se podía producir magnetismo mediante corrientes eléctricas, se especuló que tal vez fuera posible producir electricidad a partir del magnetismo. Ya se comentó en el capítulo anterior la importancia que tuvo la pila inventada por Volta, en cuanto a proveer un dispositivo alternativo a las limitadas máquinas electrostáticas, y además, de ser capaz de producir corriente eléctrica en forma continua. Resultaba muy alentador pensar que, como finalmente quedó demostrado, era posible obtener una corriente eléctrica mediante algún mecanismo que incluyera a los imanes.

En 1831, el norteamericano Joseph Henry (1797-1878) publicó sus descubrimientos acerca de la inducción eléctrica: la aparición de corriente eléctrica en una bobina mediante el movimiento de un imán que entraba y salía de ella. Casi al mismo tiempo, Michael Faraday, en Europa, descubría independientemente el método para transformar magnetismo en electricidad. La corriente se generaba en un disco de cobre que giraba entre los polos de un imán en herradura. Un alambre estaba unido al centro del disco y otro lo tocaba en el borde por medio de una escobilla.



Al mover el imán cerca o dentro de la bobina, se produce una corriente eléctrica que es detectada por el amperímetro.

Con un instrumental sencillo pueden repetirse las observaciones de Henry y Faraday, resumidas en los siguientes párrafos.

Si el imán no se mueve, el amperímetro marca, como es lógico, la ausencia de corriente. Cuando el imán comienza a moverse con su polo norte dirigiéndose hacia la bobina, la aguja del amperímetro se desvía, marcando la presencia de corriente eléctrica. Cuando el imán se retira, la aguja también se desvía, pero marcando una corriente en sentido contrario. Si el

experimento se repite enfrentando a la cara de la bobina un polo sur, los resultados son similares, aunque los sentidos de circulación se cambian respecto del primer caso. Como el movimiento es relativo, es indistinto mover el imán o la bobina.

Es posible interpretar, como hizo Faraday, que la bobina barre las líneas de campo magnético en su movimiento, y la rapidez con que lo hace determina el valor de la diferencia de potencial asociada a la circulación de corriente en la bobina.

La corriente que empieza a circular en el cable implica la aparición de una diferencia de potencial eléctrico ΔV , llamado también **fuerza electromotriz inducida**, que depende de la rapidez con la que el alambre corta las líneas de campo magnético. La fuerza electromotriz inducida es mayor cuanto más rápido sea el movimiento.

Por otra parte, cuanto mayor sea el número de espiras de la bobina, mayor es también el valor de la fuerza electromotriz inducida. A medida que se aumenta el número de espiras, se hace más difícil el movimiento relativo, ya que la corriente inducida también produce campos magnéticos asociados que se oponen al movimiento del imán y agregan una fuerza contra la cual se debe ejercer trabajo. Por lo tanto, puede verse cómo, una vez más, se cumple el principio de conservación de la energía.

Ley de Faraday

Faraday actuaba guiado por una increíble imaginación e intuición que quizás haya cultivado en su formación científica autodidacta. Su idea de las líneas de campo resultó por demás fecunda, en particular en la interpretación de la inducción electromagnética.

Para evaluar la rapidez con que la espira metálica corta las líneas de campo magnético, es necesario definir una magnitud llamada **flujo magnético** que se designa con la letra Φ . Es un valor proporcional al número de líneas de campo que atraviesa una determinada superficie. El cálculo del flujo del vector de inducción magnética $\vec{B}$ resulta simple para el caso de un campo uniforme que atraviesa una sección perpendicular S :

$$\Phi = B \cdot S$$

La unidad del flujo magnético en el sistema internacional se llama **weber** y se define como $Wb = T \cdot m^2$. A partir de esta magnitud es posible enunciar la llamada **Ley de la inducción de Faraday**, la cual enuncia:

La fuerza electromotriz (fem) inducida es proporcional a la rapidez con la cual cambia el flujo magnético que atraviesa el circuito eléctrico.

Simbólicamente:

$$fem = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

donde $\Delta \Phi$ indica el cambio del flujo magnético en un intervalo de tiempo Δt .

La **fuerza electromotriz (fem)** es la magnitud física definida como la razón entre la energía que aporta una fuente de energía eléctrica y el valor de carga que atraviesa la fuente. Su unidad es el volt (equivalente a la razón entre 1 joule de energía por cada coulomb de carga).

En una pila, parte de la energía entregada se disipa como calor en la resistencia propia de la pila y el resto corresponde a la diferencia de potencial entre los bornes, por lo que, cuando está conectada, esta tensión es algo menor que su fem.

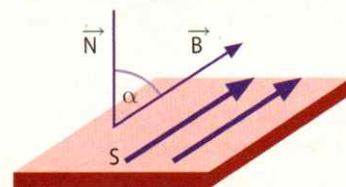
Si en lugar de una sola espira se tuviera un número n de ellas, haciendo la salvedad de que deberían estar tan apretadas que los flujos magnéticos que atraviesan cada una de ellas pueden considerarse idénticos, se tendría:

$$fem = - n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

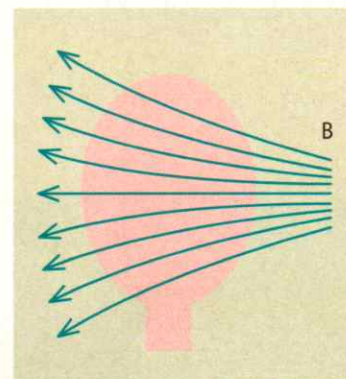
Esta ecuación puede aplicarse con buena aproximación a solenoides y toroides. El signo menos en la Ley de la inducción de Faraday indica que la corriente que circularía produciría efectos magnéticos tendientes a anular el cambio en el flujo magnético. Puede comprenderse mejor su significado a partir de la llamada **Ley de Lenz**. Con fundamento en el principio de conservación de la energía, esta ley afirma que: *la corriente inducida tiene un sentido tal que se opone a la causa que la produce.*

La corriente inducida tiene asociado un campo magnético que se opone a la variación del flujo de $\vec{B}$. Al mover el imán, hacia la bobina o alejándose de ella, siempre habrá que trabajar en contra de una fuerza.

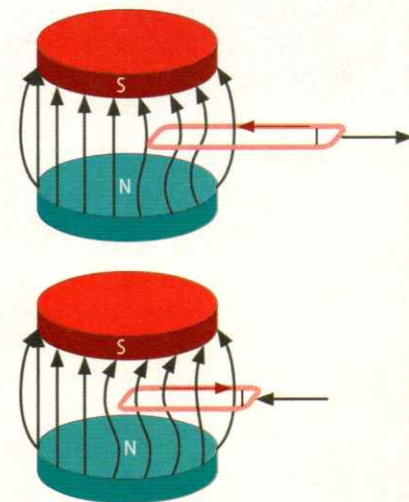
■ Cuando el campo magnético y la superficie no son perpendiculares, el flujo magnético se define como el producto entre el módulo de $\vec{B}$, la superficie S y el coseno del ángulo que forma el campo con la normal a la superficie.



$$\Phi = |\vec{B}| \cdot S \cdot \cos \alpha$$



Líneas de inducción.



Este esquema representa una espira arrastrando las líneas de campo y la indicación de la corriente inducida.



Los artefactos eléctricos aclaran entre sus especificaciones técnicas si su funcionamiento requiere corriente alterna o continua. Cuando necesitan una fuente de corriente continua, normalmente funcionan con una pila o batería, o en su defecto, mediante unos aparatos que transforman la corriente domiciliaria, que es alterna, en continua. Estos transformadores también adaptan la diferencia de potencial a la que pueden conectarse según las distintas necesidades.

Este trabajo es equivalente al calentamiento que aparece por efecto Joule, asociado a la resistencia del circuito cuando circula corriente, es decir, cuanto está cerrado. El agente que varía el flujo magnético trabaja y entrega energía al circuito. El principio de la conservación de la energía prueba, una vez más, ser uno de los pilares fundamentales de la física.

Generadores eléctricos

Los primeros motores eléctricos fueron construidos pocos años después del descubrimiento de la inducción electromagnética.

El ingeniero alemán Hermann de Jacobi construyó en 1839 un gran motor eléctrico para el zar de Rusia Nicolás I, quien lo utilizó para mover la rueda de una embarcación para la diversión de algunos de sus invitados.

Algunos europeos y norteamericanos, inspirados en los diseños de Henry y Faraday construyeron prototipos de lo que hoy se llama un generador eléctrico. Pero fue recién en 1863 cuando el científico italiano Antonio Pacinotti (1841-1912) presentó su **dinamo**, un generador eléctrico que aplica principios similares a los que se utilizan actualmente, que vino a reemplazar de alguna manera a las pesadas pilas inventadas por su compatriota Volta.

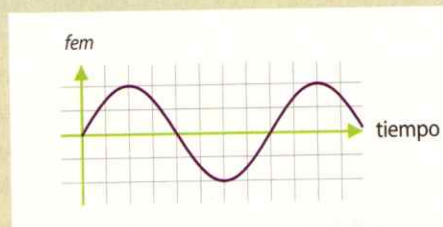
Un generador eléctrico es, en esencia, un motor eléctrico que convierte energía mecánica en eléctrica, así como éste convierte energía eléctrica en mecánica.

Corriente alterna

Retomando el diseño del motor simple de la página 219, es posible ahora analizar su uso como generador de corriente.

Cuando la espira gira en presencia de un campo magnético, hay una variación en el flujo del vector inducción magnética, y por lo tanto comienza a circular por ella una corriente eléctrica debido a la presencia de una *fem* inducida, de acuerdo con la Ley Faraday.

En este caso, la variación del flujo en razón del tiempo no es tan simple, debido a que por la rotación cambia permanentemente el ángulo entre la espira y el vector de inducción magnética $\vec{B}$. Si el bobinado gira con velocidad angular constante, la variación de la *fem* inducida según el tiempo responderá al siguiente gráfico.



Al hacer girar el bobinado en un campo magnético, se genera una *fem* inducida como la que se representa en la figura.

En el gráfico se puede apreciar que, así como cambia la *fem* inducida, las corrientes inducidas cambian de valor y de sentido de circulación en forma periódica.

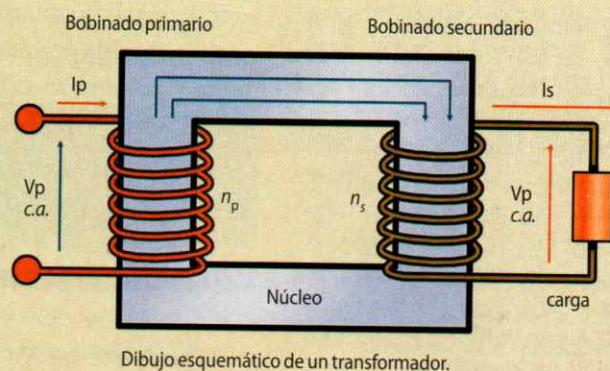
En nuestro país, la corriente alterna cambia su magnitud y sentido de circulación cumpliendo 50 ciclos cada segundo, es decir con una frecuencia de 50 hertz.

Los generadores de electricidad en una planta productora que utiliza combustibles fósiles, o en una central hidroeléctrica, presentan diseños mucho más complejos que los analizados en este apartado. La simplificación es un intento por explicar los principios físicos relacionados con su funcionamiento. La aplicación de un prototipo experimental a la atención de las necesidades de una sociedad en general requiere del manejo de muchas variables y es, en todos los casos, un problema complejo e interdisciplinario.

Transformadores

Una de las ventajas de la corriente alterna sobre la continua es la posibilidad de transportarla a grandes distancias utilizando altos valores de tensión y bajos valores de intensidad de corriente. Como la resistencia de los cables de conducción es muy alta, ya que deben cubrir largos trayectos, habría muchas pérdidas de energía por efecto Joule si no se utilizaran transformadores, los cuales permiten aumentar o disminuir la diferencia de potencial alterna, sin variar su frecuencia.

Su funcionamiento se basa en los efectos de inducción entre dos bobinas que tienen un núcleo común, normalmente de hierro, como se muestra en la figura.



Una de las bobinas está conectada a una fuente eléctrica y se denomina **bobina de alimentación o primaria**. La otra bobina se llama **bobina de salida o secundaria**.

Si la corriente de la bobina de alimentación fuera continua, entonces la única variación en el flujo magnético capaz de inducir una *fem* en la segunda bobina tendría lugar en el momento en que se cierra o se abre el circuito.

Cuando la corriente es alterna, las variaciones de flujo son constantes, y por lo tanto se produce una *fem* inducida en la bobina de salida que tiene los mismos ciclos que la corriente alterna de la bobina de alimentación.

La relación entre los voltajes de ambas bobinas es simple, y tiene que ver con el número de vueltas de cada una:

$$\frac{\Delta V_e}{\Delta V_s} = \frac{n_e}{n_s} \quad \text{por lo tanto:} \quad \Delta V_s = \Delta V_e \cdot \frac{n_s}{n_e}$$

donde ΔV_s es el voltaje de salida, ΔV_e es el voltaje de entrada, n_s es el número de vueltas de la bobina en la salida y n_e es el número de vueltas de la bobina en la entrada.

Según lo que se requiera por su aplicación, un transformador puede:

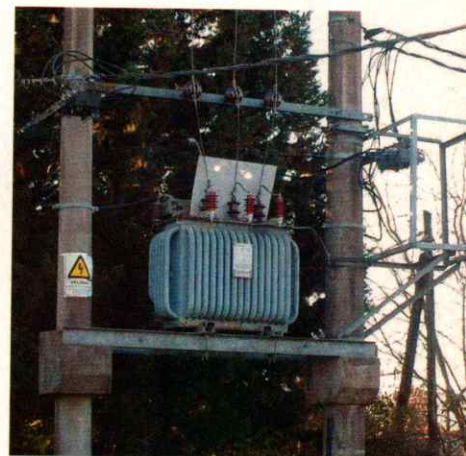
- aumentar el voltaje de salida, para lo cual $n_s > n_e$ en la misma proporción requerida por $\Delta V_s > \Delta V_e$;
- disminuir el voltaje de salida, para lo cual $n_s < n_e$ tanto como lo requiera la relación $\Delta V_s < \Delta V_e$.

Los transformadores y la transmisión de la energía eléctrica

El funcionamiento de los grandes generadores de energía eléctrica es técnicamente muy complejo, pero básicamente funcionan como una gran dinamo. Se hace girar un bobinado en un campo magnético. Para ello se puede usar vapor de agua calentado mediante gas, derivados líquidos del petróleo, caídas de agua, viento o fisión nuclear.

Estos grandes generadores están por lo general lejos de los centros de consumo, por lo que hay que transportar la energía eléctrica grandes distancias mediante cables. Estos cables se calientan y pueden tener miles de kilómetros de largo, por lo que las pérdidas pueden ser muy grandes.

En el capítulo anterior se calculó la energía disipada en forma de calor por unidad de



Algunos transformadores, como el que vemos en la fotografía, son señalados como contaminantes, debido a un refrigerante altamente tóxico que utilizan llamado PCB, que tiene posibles efectos cancerígenos. Existen relevamientos hechos por distintas asociaciones ambientalistas respecto de la ubicación de los transformadores que todavía usarían este contaminante. Las empresas proveedoras de servicios eléctricos han tomado públicamente el compromiso de reemplazarlos.



Algunas bacterias reciben el nombre de **magnetotácticas** dado que tienen dipolos magnéticos que les sirven para orientarse y desplazarse en una dirección determinada. Estas bacterias viven en agua dulce y salada. Según una teoría, algún tipo de bacterias podrían haber creado la magnetita como producto natural de su metabolismo. Se conocen algunas bacterias que se desarrollan en ausencia de oxígeno, y que requieren para sus procesos metabólicos hierro en forma de óxido ferroso no magnético, al que convierten en magnetita. Según esta misma teoría, las capas de magnetita que cubren los grandes depósitos de hierro podrían haberse formado durante el período precámbrico, en el que estas bacterias ya estaban presentes.

tiempo en un conductor mediante la expresión: $P = R \cdot I^2$, donde R es la resistencia del cable, e I la intensidad de la corriente que circula por él; se puede entender que conviene transportar energía con baja corriente para tener menos pérdidas en el trayecto.

Por otra parte, la potencia entregada y transportada desde la central de generación se puede calcular según la expresión:

$$P = \Delta V \cdot I$$

donde ΔV es la diferencia de potencial que los técnicos llaman para estas situaciones tensión, e I la intensidad de la corriente.

Propiedades magnéticas de la materia

La razón por la cual solo algunos materiales presentan propiedades magnéticas evidentes se basa en el hecho de que sus partículas ya son pequeños imanes. El conocimiento que hoy en día se ha alcanzado acerca de la estructura íntima de la materia permite afirmar que el origen del magnetismo es el movimiento de las cargas eléctricas presentes en los átomos. Cuando las cargas eléctricas están en reposo, solo generan campo eléctrico, pero cuando se mueven, generan un campo magnético. Si el movimiento de cargas es acelerado, se produce la emisión de radiación electromagnética.

Realizando algunas simplificaciones necesarias, es decir usando el antiguo modelo orbital, en un átomo existen dos movimientos de partículas cargadas que determinan la presencia de dipolos magnéticos y que resultan significativos para los fenómenos analizados en este capítulo: el movimiento de giro de los electrones alrededor del núcleo y el movimiento de rotación de los electrones sobre sí mismos, también llamado **spin electrónico**. Es necesario insistir en que esta interpretación corresponde a una importante simplificación en el modelo atómico, con el único fin de comprender los efectos magnéticos. El giro del núcleo o spin nuclear tiene gran importancia en la técnica de diagnóstico médico llamada resonancia magnética nuclear, pero no resulta determinante en su influencia sobre las propiedades magnéticas de los distintos materiales.

Los elementos y materiales **ferromagnéticos** ya fueron mencionados al comienzo de este capítulo. Con el hierro como el más representativo, componen también este grupo el cobalto y el níquel, junto con dos elementos más raros: el gadolinio y el disprosio. En ellos cada átomo tiene dipolo magnético orbital y dipolo magnético de spin que no están compensados. Por lo tanto, en estos materiales los dipolos permanentes se alinean con el campo magnético aplicado. El reforzamiento mutuo de los dipolos produce un aumento significativo en el campo magnético, por lo que estos materiales tienen muy altos valores de permeabilidades magnéticas relativas. Los átomos se ordenan en dominios magnéticos que pueden estar en general con distintas orientaciones unos respecto de otros. Sin embargo, tienen la posibilidad de alinearse por acción de un campo externo y eventualmente conservar este orden, es decir convertirse en imanes.

Se llaman materiales **antiferromagnéticos** a aquellos que tienen dipolos magnéticos, pero se alinean en oposición unos con otros en un campo magnético, por lo que resultan solo débilmente afectados. Un material antiferromagnético es, por ejemplo, el dióxido de manganeso.

Los materiales **ferrimagnéticos** son de tipo cerámico y se caracterizan por la presencia de dipolos magnéticos que se alinean en forma antiparalela con el campo, a favor y en contra de él. Como la resistencia de los dipolos para orientarse no es igual, hay una magnetización neta

y pueden proporcionar una buena intensificación del campo que se aplique. Las magnetitas, que son un óxido de hierro, y las ferritas de níquel, óxidos de hierro y níquel, son materiales ferrimagnéticos porque a su relativamente buena permeabilidad magnética unen una baja conductividad eléctrica. Se utilizan en dispositivos que necesitan combinar estas cualidades.

Existen otros materiales llamados **diamagnéticos**. En 1846, Faraday observó que una muestra de bismuto era repelida débilmente cuando se la colocaba cerca de un imán poderoso. Los materiales diamagnéticos no tienen dipolos magnéticos permanentes, ya que compensan el efecto magnético orbital de los electrones con el de su spin. Sin embargo, cuando se aplica un campo externo suficientemente importante, se nota una repulsión. El electrón, como explica la Ley de Lenz que prueba, así, su validez a nivel atómico, responde generando un campo magnético opuesto al cambio de flujo magnético experimentado.

Los materiales diamagnéticos tienen una permeabilidad relativa algo menor que la unidad (0,99995), lo cual significa que es prácticamente igual a la del vacío. Frente a la acción de un campo magnético externo, sus dipolos reaccionan orientándose en contra de él.

El diamagnetismo de los superconductores merece un comentario aparte. Se dice que ellos presentan un diamagnetismo perfecto: el efecto es tan fuerte que llega a apantallar un campo magnético externo.

Walter Meissner (1882-1974) observó en 1933 que un material superconductor se convierte en diamagnético perfecto cuando se lo enfría por debajo de una temperatura particular llamada temperatura crítica. Esto explica, por ejemplo, los curiosos efectos de levitación de un imán con que se ilustra frecuentemente este fenómeno: al colocarlo sobre un superconductor enfriado, se logra que la repulsión magnética equilibre el peso del imán. Este efecto se llama **efecto Meissner**.

También existen materiales llamados **paramagnéticos**. En su átomos tienen dipolos magnéticos débiles, por lo que cuando se los somete a un campo magnético externo tienden a alinearse con él, y lo aumentan. Sin embargo, sus valores de permeabilidad magnética relativa son apenas mayores que la unidad (1,01), por lo que la densidad de flujo magnético en estos materiales es prácticamente la del vacío. Los materiales paramagnéticos orientan poco sus dipolos según el campo externo y se requieren valores muy grandes de campo para que logren alinear la mayoría de ellos. Son considerados materiales no magnéticos, ya que solo muestran estas propiedades cuando se encuentran en un campo magnético externo muy intenso. Algunos ejemplos de materiales paramagnéticos son el potasio, el oxígeno, el tungsteno y algunas tierras raras como el neodimio.

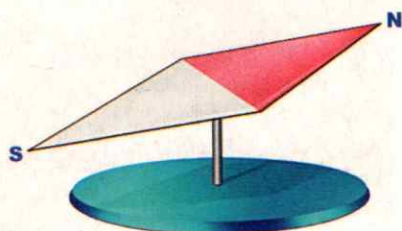
Como solo algunos pocos materiales pertenecen al grupo de los ferromagnéticos, puede decirse que la gran mayoría de los materiales son paramagnéticos o diamagnéticos.

Algunos materiales se llaman **superparamagnéticos**. Su comportamiento combina las propiedades del ferromagnetismo y del paramagnetismo. Se explica por la presencia en el material de partículas muy pequeñas que pueden orientar sus dipolos en un campo externo por debajo de cierta temperatura crítica. Sin embargo, como la interacción entre ellas es muy débil, el ordenamiento de sus dipolos no puede extenderse a todo el material. Este comportamiento resultó de mucha utilidad para la fabricación de cintas magnéticas. Cada una de las partículas con comportamiento ferromagnético dentro del material puede cambiar su orientación en una pequeña distancia dentro de la cinta. Si la orientación puede dirigirse intencionalmente, entonces es posible guardar información utilizando este hecho a modo de código. Existen actualmente investigaciones que tratan de analizar materiales superparamagnéticos con partículas de tamaño del nanómetro, lo cual optimiza los diseños de soporte magnético de la información.

■ El primer dispositivo para el soporte magnético de la información fue la cinta magnética. Se trata de un material plástico cubierto de un material ferromagnético. A partir de entonces, los diseños y materiales destinados a guardar información por medios magnéticos han ido cambiando hacia unidades más pequeñas y de mayor capacidad de almacenamiento. El estudio de las propiedades magnéticas de nuevos materiales es uno de los campos de mayor impacto en los cambios tecnológicos en estas aplicaciones.



Casete, dispositivo de soporte magnético de la información.



El inglés **Robert Norman** dio a conocer en 1581 un descubrimiento fundamental que realizó mientras trabajaba en la construcción de brújulas para navegación. Era sabido en su oficio que al apoyar las agujas no imantadas por su punto medio, lograban sostenerse en forma horizontal mientras que, cuando eran imantadas, el extremo norte se inclinaba un poco por debajo de la línea del horizonte. La interpretación que se daba a este hecho era que, cuando la aguja se convertía en imán, el polo norte parecía pesar más. Desde otro punto de vista, Norman supuso que esta inclinación se debía a la naturaleza de la fuerza magnética que actuaba sobre el extremo norte y hacia abajo, en relación a la Tierra. Sus observaciones, sumadas a las explicaciones de su contemporáneo Gilbert, motivaron múltiples investigaciones para medir la variación de este ángulo de inclinación según las distintas latitudes. En las latitudes sur, es este extremo de la brújula el que se encuentra deprimido.

El campo magnético terrestre

Tan antigua como los registros sobre fenómenos magnéticos básicos es la observación de que un imán alargado y pequeño puede, si se lo deja libre, orientarse hacia el norte geográfico.

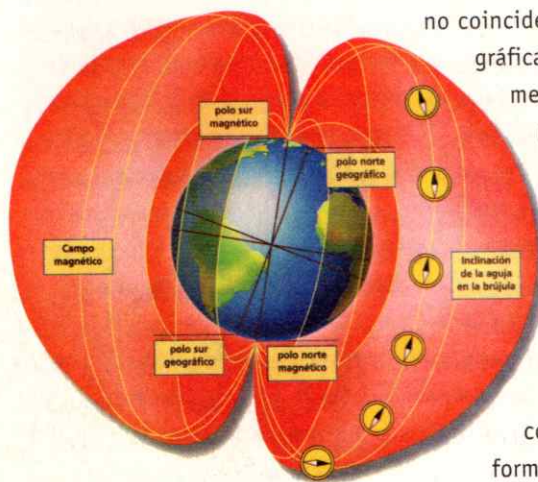
Hay diversas opiniones acerca del pueblo al cual le corresponde la invención de la brújula. Algunos afirman que los chinos la conocían desde tiempos muy antiguos y que fue llevada a Europa por Marco Polo o por los árabes. Existen escritos que hacen referencia al uso de la brújula para la navegación que datan del siglo XII. Ahora bien, estos diseños eran muy rudimentarios y no había por entonces ninguna explicación para su funcionamiento de la cual se tenga constancia. La investigación sistemática sobre los fenómenos magnéticos comenzó, como se ha dicho, con los trabajos de Gilbert en el año 1600. Con su prototipo de una tierra en miniatura estableció como un hecho que el planeta era un imán natural, como probaba la orientación de las brújulas o pequeños imanes colocados en su campo.

La teoría más aceptada actualmente para explicar la presencia de polos magnéticos en nuestro planeta se conoce como **efecto dínamo**. Según ella, en la región ígnea interior de la Tierra existen corrientes de hierro en estado líquido que se mueven, debido a la rotación planetaria, en torno a un débil campo magnético ya existente. De esta manera, se genera otro campo magnético más fuerte que el original. También existen en el interior de la Tierra movimientos convectivos en el material del núcleo, los que probablemente influyen en la formación del campo magnético planetario.

Debido a que se llama polo norte de un imán a aquel que apunta en esa dirección geográfica, se entiende que en esa posición se encuentra el polo sur magnético de la Tierra. De igual manera, en las proximidades del sur geográfico se ubica el norte magnético.

La ubicación de los polos de la Tierra varía en forma casi constante, aunque es un proceso muy lento. Es por eso que la ubicación de los polos magnéticos

no coincide exactamente con su localización geográfica. La diferencia entre ambas direcciones, medida en ángulos, se llama **declinación magnética** y es actualmente de alrededor de 11° .



El desplazamiento de los polos magnéticos a lo largo de las distintas eras geológicas se conoce como **variación secular**. La evidencia de estos cambios se encuentra en los dominios magnéticos de las rocas que contienen hierro. Al enfriarse durante su formación, sus dominios tomaron la orientación del campo magnético terrestre de ese momento.

Estos registros permiten la elaboración de mapas del campo magnético en las distintas épocas. Por ejemplo, muestran variaciones que en algunas etapas lo redujeron a cero para luego invertirlo. El proceso de inversión de los polos magnéticos parece ser cíclico, aunque no puede decirse con certeza cuándo sucederá la próxima inversión.

En el último siglo se ha registrado una disminución de un 10% en su valor, que es del orden de 10^{-4} T.

Magnetosfera y viento solar

El Sol tiene un movimiento de rotación, ya señalado por Galileo a partir de sus observaciones con el telescopio. Su afirmación se basó en otro descubrimiento de fundamental importancia: las **manchas solares**. Interpretó que esas manchas oscuras que aparecían y desaparecían periódicamente después de cruzar el disco solar, en realidad acompañaban el movimiento de la estrella. La rotación se cumple en forma diferencial, es decir que es más rápida en el ecuador que en los polos; y este hecho, junto con los movimientos de convección de gas a distintas temperaturas entre sus capas, es responsable de la generación y mantenimiento del campo magnético solar.

El campo magnético solar es el responsable de guiar las emisiones del llamado **plasma de viento solar**. Está formado por partículas cargadas eléctricamente, positivas y negativas, que tardan en llegar a la Tierra alrededor de 3 días.

La Tierra se encuentra dentro de la influencia del campo magnético solar, sin embargo su propio campo puede ser considerado como un escudo protector, o **magnetosfera**. La zona límite entre la influencia de los campos terrestre y solar se llama **magnetopausa**. Ella constituye una verdadera superficie de choque entre el viento solar y el escudo magnético terrestre. El plasma solar se frena y es desviado. La magnetopausa se encuentra aproximadamente a 60 000 km de la superficie del planeta en dirección hacia el Sol, y a 300 000 km en la dirección contraria.

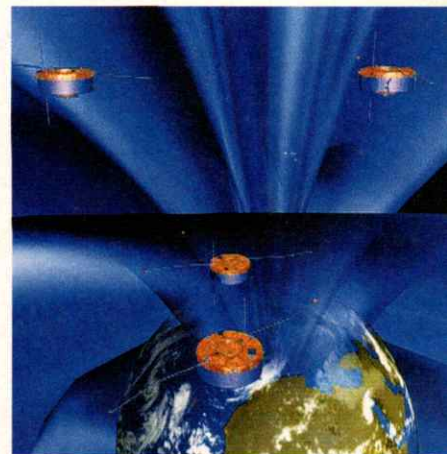
Algunas partículas cargadas que chocan contra la magnetosfera son conducidas hacia los polos de la Tierra, siguiendo las líneas de campo. Al ingresar hasta la ionósfera, interactúan con los iones presentes, principalmente nitrógeno y oxígeno. La interacción produce en ellos una absorción de energía que los lleva a un estado excitado. Al volver a su estado fundamental, emiten la energía en forma visible desde la Tierra: son las llamadas **auroras boreales**, o luces del norte. Las auroras boreales se forman en ambos polos, tanto en el norte como en el sur, y son visibles en amplias zonas próximas a ellos.

Las investigaciones han probado una cierta periodicidad en la actividad solar en cuanto a la aparición de las manchas solares: siguen ciclos de aproximadamente 11 años, entre períodos de máxima y de mínima actividad. La aparición de una mancha solar importante está asociada a la emisión de ráfagas solares.

Estas regiones de un poco más de 10 000 kilómetros de diámetro se ven oscuras, aunque son en realidad zonas más frías que otras. Se ha probado que su presencia indica también una fuerte concentración del campo magnético solar.

El aumento cíclico del número de manchas solares tiene relación con los cambios en el campo magnético solar, el cual se va reconfigurando como consecuencia de su rotación y de los movimientos del gas en su estructura.

La actividad solar se ha constituido en un foco de interés en los últimos años, ya que los efectos del viento solar no se limitan a la formación de bellas auroras boreales. Las tormentas solares son responsables, por ejemplo, de interferencias en las comunicaciones, que acarrearán múltiples incomodidades y graves perjuicios económicos.



Esta imagen tomada por el satélite Cluster II permite observar la magnetosfera que, puede considerarse un escudo protector contra los efectos del viento solar.

En las auroras boreales como la que puede observarse en la fotografía, sacada en Michigan, Estados Unidos, la emisión de luz por parte de los iones oxígeno es verde y la de los iones nitrógeno es roja. Constituyen sin duda uno de los espectáculos más bellos de la naturaleza.



Aceleradores de partículas

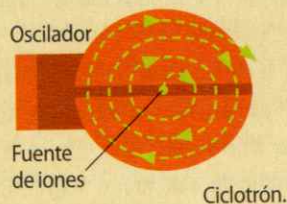
EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA ÍNTIMA DE LA MATERIA, LA PRODUCCIÓN DE NUEVOS MATERIALES Y OTROS MUCHOS CAMPOS DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DEPENDEN DE LA CAPACIDAD DE CONTAR CON PARTÍCULAS PEQUEÑAS QUE, VIAJANDO A GRAN VELOCIDAD, IMPACTAN A MODO DE VERDADEROS PROYECTILES SOBRE LA ESTRUCTURA QUE SE DESEA ESTUDIAR.

Las partículas cargadas pueden ser aceleradas por fuerzas eléctricas, cuya expresión es

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

El método para acelerar cargas requería trabajar con diferencias de potencial muy altas, lo cual traía muchas dificultades experimentales. Por este motivo, en 1932, Ernest Lawrence puso por primera vez en funciones un acelerador de partículas llamado *ciclotrón*, con el que logró comunicar energías cinéticas muy altas a protones. Un ciclotrón requiere una fuente de iones, que provee las partículas cargadas que serán aceleradas por él. La aceleración en los protones se logra por la acción de una diferencia de potencial relativamente baja, de por ejemplo 10^5 V, pero que actúa en forma repetida gracias a la presencia de campos magnéticos que desvían la carga y la hacen atravesar el campo eléctrico una y otra vez.

El diseño esquemático de un ciclotrón es el que muestra la figura. Es indispensable que el acelerador se encuentre en un tanque de vacío, ya que de otra manera las partículas aceleradas chocarían con otras



presentes en el medio. Allí se ubican las llamadas *des* del acelerador. Estos objetos de cobre forman parte de un oscilador eléctrico que establece una diferencia de potencial a través del hueco entre las des. Este oscilador hace que el sentido de la diferencia de potencial cambie varios millones de veces por segundo. Las des se encuentran dentro de un campo magnético de alrededor de 1,6 T, producido por un potente electroimán, que debe considerarse saliente respecto del plano del dibujo. Para comprender el funcionamiento, puede suponerse que un protón sale de la fuente de iones y es acelerado hacia la des que tiene enfrente. Dentro de ella, a modo de jaula de Faraday, la estructura metálica la protege de la acción de campos eléctricos. El campo magnético que crea el electroimán provoca una desviación en su trayectoria, curvándola y haciéndola salir de la des a la que había ingresado. El radio de esta

trayectoria obedece a la ecuación:

$$r = \frac{m \cdot V}{q \cdot B}$$

donde m es la masa de la partícula, V su velocidad, q su carga y B el vector inducción magnética. Al salir el protón de la placa de la primera des, es necesario que encuentre una inversión en la diferencia de potencial original entre las placas para que se acelere hacia la que tiene enfrente. Esta inversión la logra el oscilador. El radio de la trayectoria es proporcional a la velocidad de la partícula, por lo que en cada giro éste es mayor, aunque tarda lo mismo. El tiempo que tarda un ión en completar un giro cuando es desviado por un campo magnético tiene una expresión independiente de la velocidad:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

La clave del funcionamiento del ciclotrón está en ajustar el oscilador a las características de cada partícula que se desea acelerar. De esta manera, cuando la partícula completa una cierta cantidad de ciclos, emerge del acelerador a altísimas velocidades.

Luego de la lectura del texto indiquen:

- ¿cuáles son las características de la partícula que resultan significativas para ajustar el oscilador de un ciclotrón?
- busquen datos acerca de las velocidades que se logran con los actuales aceleradores de partículas y para qué disciplina científicas resultan útiles;
- ¿cuál estiman que es el tamaño que puede tener un acelerador de partículas? ¿Por qué?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ Las **fuerzas eléctricas y magnéticas** constituyen una única interacción fundamental llamada **electromagnética**.

■ La piedra magnetita y el planeta Tierra son imanes naturales.

■ Los polos norte y sur de los imanes toman su nombre de la dirección geográfica a la que se orientan libremente en el campo magnético terrestre.

■ No existen monopolos magnéticos.

■ La **Ley de Faraday** indica que la fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del circuito.

■ Los **materiales ferromagnéticos** presentan en su estructura dominios magnéticos con una alineación particular de campo magnético.

■ El campo magnético está caracterizado por dos vectores: $\vec{B}$, llamado **inducción magnética** y $\vec{H}$, llamado **intensidad de campo magnético**.

■ Los **solenoides** y los **toroides** son conductores enrollados de tal manera que se potencia el efecto de inducción magnética. Pueden tener o no un núcleo ferromagnético.

■ En un **motor eléctrico** se convierte energía eléctrica en mecánica, y en una **dinamo** o generador se convierte energía mecánica en eléctrica.

■ Existen materiales que por sus propiedades magnéticas se denominan **paramagnéticos** y **diamagnéticos**.

■ El **campo magnético terrestre** se explica por el efecto dinamo: corrientes de partículas de hierro cargadas en el interior ígneo del planeta. La magnetosfera constituye una protección frente a las partículas del viento solar.

Fórmulas

$$\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}$$

Fuerza magnética

$$\vec{F} = i \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

Fuerza sobre un conductor en un campo magnético

$$B = \mu \cdot \frac{nI}{L}; \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Campo magnético en el interior de un solenoide

$$fem = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Fuerza electromotriz inducida. Ley de Faraday

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿En qué sentido podría afirmarse que el polo norte de un imán señala al polo sur de la Tierra?

2. ¿Por qué las brújulas necesitan haber sido magnetizadas para señalar al norte terrestre y en cambio las limaduras de hierro lo necesitan para señalar el norte de un imán?

3. ¿Existe fuerza magnética entre los polos de un imán?

4. ¿Por qué un imán puede atraer unos clips metálicos y no unos plásticos?

5. ¿Por qué la agitación térmica puede hacer perder las propiedades magnéticas a un imán?

6. ¿Siempre que una carga eléctrica ingresa a un campo magnético experimenta una desviación lateral?

7. ¿Qué es más conveniente para lograr el mayor efecto magnético en el interior de una bobina: apretar, o estirar las espiras?

8. Una carga eléctrica que experimenta una aceleración en la misma dirección y sentido de su velocidad, ¿ha recibido la acción de un campo eléctrico, o de uno magnético?

9. ¿Por qué es más difícil retirar un imán de dentro de una bobina cuando tiene muchas espiras que cuando tiene pocas?

10. ¿Por qué cuando se introduce un imán en una bobina la corriente circula en un sentido y, cuando se retira, en otro?

11. ¿Por qué un transformador solo funciona con corriente alterna?

12. ¿Sobre qué bases es posible afirmar que el campo magnético estuvo invertido en varias oportunidades en el pasado del planeta?

13. En cada uno de los siguientes casos indiquen qué sentido tiene la fuerza magnética. Recuerden que $\otimes$ indica el campo hacia adentro de la hoja y $\ominus$ indica el campo hacia afuera de la hoja.

a. $\vec{V} \longrightarrow \ominus \ominus \ominus \vec{B}$

b. $\vec{V} \uparrow \otimes \otimes \otimes \vec{B}$

c. $\otimes \vec{B} \longrightarrow \vec{V}$

d. $\ominus \vec{B} \longrightarrow \vec{V}$

14. ¿Cuánto vale la fuerza total que actúa sobre una partícula cargada positivamente que ingresa a una región del espacio en la cual existen un campo eléctrico y uno magnético con los valores que se indican en la figura?

La masa de la partícula vale $9 \cdot 10^{-31}$ kg; su carga $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C; $|\vec{E}| = 3$ N/C; $|\vec{B}| = 4 \cdot 10^{-2}$ T; $\vec{V} = 5 \cdot 10^4$ m/s.



15. ¿Cuánto valdrá el campo magnético en el interior de una bobina de 300 vueltas acomodadas de tal manera que el largo total es de 40 cm? La corriente que circula por ella es de 1,2 A y no se le coloca núcleo.

16. ¿Cuánto valdrá el campo en la bobina anterior si se le coloca un núcleo de un material cuya permeabilidad relativa es 1000?

17. Una bobina de 100 espiras cerradas de 4 cm de diámetro se mueve en relación a un campo magnético de tal manera que su flujo disminuye a razón de $4 \cdot 10^{-5}$ Wb cada 0,05 segundos. ¿Cuánto vale la fem inducida?

18. Una bobina formada por 10 espiras cuadradas de 10 cm de lado está ubicada de tal manera que un campo magnético de 0,2 T resulta perpendicular a ella. Gira en 0,1 segundo hasta ponerse paralela al campo, por lo que el flujo se hace cero. Calculen la fuerza electromotriz inducida durante el giro.

19. El flujo en una bobina de 400 vueltas que se mueve en un campo magnético cambia de $1,4 \cdot 10^{-2}$ weber a $0,4 \cdot 10^{-2}$ weber en 0,05 segundos. ¿Cuánto vale su fem inducida?

20. Se dispone de una bobina que se puede mover barriendo las líneas del campo magnético terrestre. ¿Cuáles serían las condiciones experimentales para lograr que un amperímetro conectado a la bobina registre alguna lectura?

21. ¿Cómo cambia la fem inducida por la bobina del ejercicio 20, si se aumenta al doble la velocidad con que gira la bobina?

22. Se desea transformar la tensión de 220 V de la red domiciliar a 110 V requerida por un aparato. ¿Cómo sería la relación entre el número de vueltas de la bobina de entrada y de salida en el transformador que habría que utilizar para que el aparato funcionara adecuadamente?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	Los únicos imanes naturales son la magnetita y el planeta Tierra.	☐
2	Una corriente eléctrica puede ser inducida por un imán en movimiento.	☐
3	La fuerza eléctrica y la fuerza magnética provienen del mismo tipo de interacción.	☐
4	No es posible aislar un polo magnético.	☐
5	Un imán puede perder sus propiedades magnéticas si se lo calienta demasiado.	☐
6	Un imán puede atraer un trozo de hierro solo si éste está magnetizado.	☐
7	Según la trayectoria en la que se desvía una partícula en un campo magnético, es posible conocer el signo de su carga.	☐
8	Las líneas de fuerza del campo magnético sostenido por un imán apuntan hacia el sur fuera del imán y hacia el norte dentro del imán.	☐
9	Mediante un espectro magnético, es posible ubicar los polos de un imán.	☐
10	Si una carga tiene una velocidad paralela al campo $\vec{B}$ en el que se mueve, no se desvía.	☐
11	Entre dos cables por los que circula corriente puede haber atracción o repulsión.	☐
12	Como la Tierra es grande, su campo magnético tiene un valor muy alto.	☐
13	Es posible desviar un haz de electrones mediante un campo magnético.	☐
14	Un electroimán es una clase de material magnético.	☐
15	No existen muchos materiales paramagnéticos.	☐
16	La corriente eléctrica inducida en una bobina tiene el mismo sentido tanto cuando se introduce en ella un imán como cuando se lo retira.	☐
17	La fuerza electromotriz inducida depende de la rapidez con que cambia el flujo magnético.	☐
18	Una brújula siempre se alinea con un cable por el que circula corriente.	☐
19	Una bobina no genera campo magnético si no tiene un núcleo ferromagnético.	☐
20	Las manchas solares tienen relación con turbulencias en el campo magnético solar.	☐

La ciencia es la progresiva aproximación del hombre al mundo real.

Max Planck

CONTENIDOS

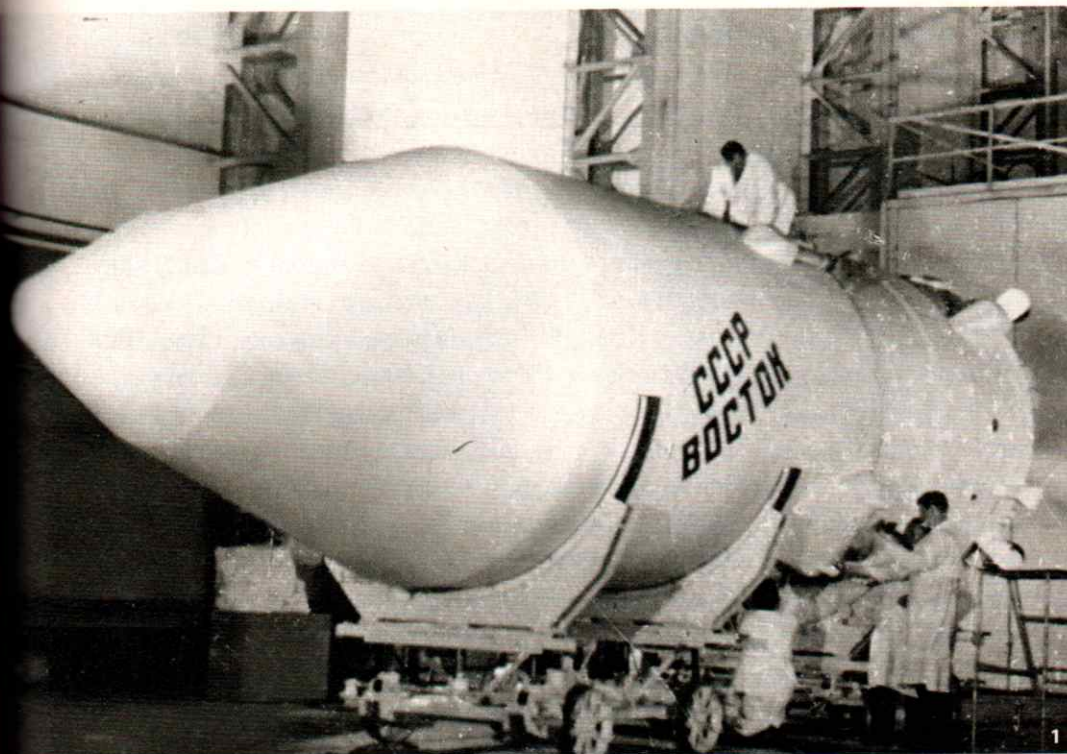
- Introducción
- El movimiento ondulatorio
- Tipos de ondas
- Movimiento oscilatorio
- Ondas armónicas
- Características de una onda
- Ecuación de las ondas
- Propiedades de las ondas
- Ondas estacionarias
- Las ondas y la comunicación satelital

12 LAS ONDAS Y LA TECNOLOGÍA ACTUAL

El estudio de las **ondas** constituye un campo de esencial importancia en Física, ya que permite explicar numerosos hechos y fenómenos de la naturaleza como el sonido y la luz, e interpretar el funcionamiento de varios aparatos de uso cotidiano como radios, televisores o controles remotos, y otros de tecnología más avanzada como teléfonos celulares, horno de microondas, radares, satélites, etc. En cuanto a estos últimos, la era satelital comenzó el 4 de octubre de 1957 cuando la que entonces se llamaba Unión de las Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) ponía en órbita el primer satélite llamado *Sputnik*, hecho que dio inicio a la gran carrera por la conquista del espacio. Más tarde, el 12 de abril de 1961, una nave espacial de cinco toneladas llevaba al espacio al primer astronauta, el ruso Yuri Gagarin. A partir de entonces y hasta la actualidad, fueron lanzados miles de satélites de alta tecnología, no solo para comunicaciones, sino también para llevar a cabo estudios meteorológicos, misiones militares, y distintas investigaciones científicas como las relacionadas con el origen del universo. Todos estos satélites requieren comunicaciones con antenas o radares ubicados en distintos puntos de la Tierra, los cuales emiten y reciben señales mediante procesos ondulatorios. Por otra parte, uno de los principales avances en las últimas décadas ha sido la aplicación de las ondas electromagnéticas en el campo de las ciencias de la salud. Esto permitió, por ejemplo, la construcción de tomógrafos, mamógrafos, y otros aparatos que hacen uso de las radiaciones electromagnéticas para diagnóstico y prevención de enfermedades.

A fines del siglo XVI y principios del XVII, comenzó una gran actividad en el campo de la **Óptica**. El uso de espejos, lentes y algunos aparatos ópticos permitió realizar numerosas experiencias que explicaron y predijeron el comportamiento de algunos fenómenos, como la reflexión y refracción de la luz, su propagación en línea recta, o el cálculo de su velocidad.

Se inició así una discusión científica sobre la naturaleza de la luz, acerca de la que, en esa época, existían dos posturas: el **modelo corpuscular** y el **modelo ondulatorio**.



1. Nave espacial.
2. Yuri Gagarin (primer astronauta ruso).

En su obra *Óptica* (1704), Isaac Newton (1642-1727) enunció la teoría que sostenía que la luz está formada por pequeños corpúsculos emitidos por el objeto luminoso, que se mueven en línea recta. La formación de sombras y penumbras parecía confirmar esta teoría.

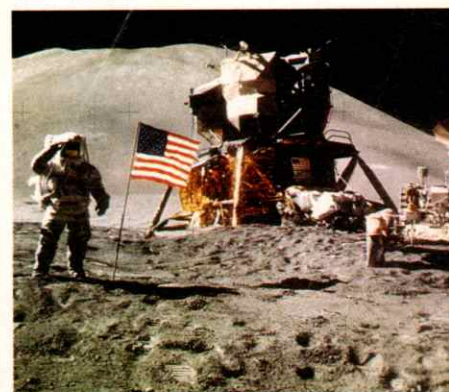
El físico holandés Christian Huygens (1629-1695) adoptó el modelo ondulatorio en el que se reconocía cierta analogía entre los fenómenos ópticos y los sonoros. Para los seguidores de esta última teoría, la luz se producía por la vibración de un medio material transparente con propiedades desconocidas al que llamaron **éter**.

El físico escocés James Clark Maxwell (1831-1879) presentó en 1865 su teoría en la que demostró matemáticamente la existencia de campos electromagnéticos que, en forma de ondas, podían propagarse tanto en el vacío como en un medio material.

Max Planck (1858-1947), al estudiar los fenómenos de emisión de radiación electromagnética por parte de la materia, admitió que esta emisión no se da en forma continua, sino discreta, es decir, como a saltos o paquetes de energía, a los que Planck denominó **cuantos** de energía.

Albert Einstein (1879-1955) analizó un fenómeno conocido como **efecto fotoeléctrico**. Dicho efecto consiste en que algunos metales emiten electrones cuando son iluminados. Según Einstein, este fenómeno no podía ser explicado desde el modelo ondulatorio, y tomando como base la idea planteada por Planck, afirmó que no solo la emisión de la radiación se produce en forma discontinua, sino que la propia radiación es discontinua. Estas ideas supusieron el replanteo del modelo corpuscular. Según este nuevo modelo, la luz estaría formada por una sucesión de cuantos elementales. Estos corpúsculos o partículas energéticas recibieron el nombre de *fotones* (tomado del griego *photós*, que significa luz).

Las controversias entre corpúsculos y ondas han dejado paso, al cabo de los siglos, a la síntesis de la Física actual: la luz es tanto onda como corpúsculo, y se manifiesta de uno u otro modo en función de la naturaleza del fenómeno que se pretende estudiar.



En esta imagen puede observarse al astronauta James Irwin saludando desde la Luna en su viaje en agosto de 1971 a bordo del Apolo XV.

El movimiento ondulatorio

La transmisión de una **perturbación** que se propaga en el tiempo en un medio material, e incluso en el vacío, se puede producir a través de ondas.

Perturbaciones como la luz y el sonido son formas de energía que se propagan en el espacio tiempo a través de ondas.

Cuando una persona habla, vibran sus cuerdas vocales las que transmiten cierta cantidad de su energía interna al aire que rodea su garganta y su boca, y también al espacio que está más cercano a la persona. Esta perturbación se propaga y llega, por ejemplo, a los oídos de otros. Allí impacta sobre el tímpano, una membrana delgada que al vibrar a su vez, transmite la perturbación a un conjunto de huesos muy pequeños que también vibran y producen señales que son captadas finalmente por el nervio auditivo y decodificadas por el cerebro.

Si se pulsa una cuerda tensa de guitarra, se produce una perturbación que se propaga a lo largo de la cuerda y que también se transmite a través del aire que la rodea. Cada partícula de la cuerda se encuentra en reposo hasta que es pulsada. A partir de ese instante oscila durante un cierto tiempo y luego, cuando la onda pasa, vuelve a la posición de equilibrio. El pulso se ha propagado a lo largo de la cuerda transmitiendo energía, pero no materia. Ninguna partícula de la cuerda se ha desplazado junto con el pulso.

Si se arroja una piedra en la superficie de un lago en la que flota un corcho, se produce un movimiento vibratorio en las partículas de agua alcanzadas por la piedra. Luego de un tiempo, el corcho también oscilará.

La piedra produce una perturbación sobre la superficie del agua que se propaga en forma de ondas circulares. Si la onda llega al corcho, éste oscila y cuando la onda ha pasado, el corcho retoma su posición de equilibrio sin desplazarse con la onda. La piedra transfiere cierta cantidad de energía al medio, en este caso al agua, que se propaga en forma de onda.

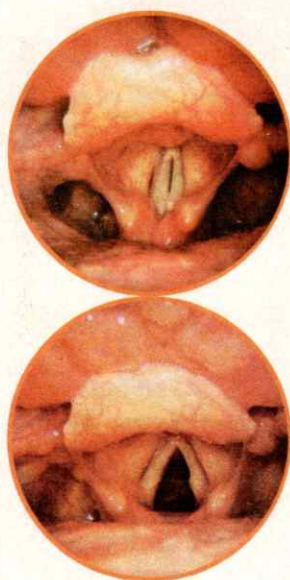
■ En estos ejemplos están comprendidos diferentes tipos de ondas, pero todas ellas tienen en común que resultan de una perturbación que se propaga en el espacio y en el tiempo.

■ Para que se originen ondas, tiene que existir un sistema emisor que oscile y transmita energía.

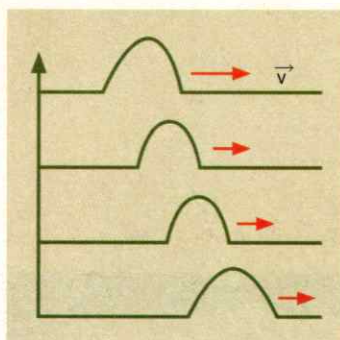
■ En algunos casos, es necesario un medio material de propagación, como por ejemplo el aire, la cuerda, el agua, etc.

■ Las ondas de luz y las radiaciones producidas por las oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos en el tiempo, se propagan en el vacío a una velocidad de 300 000 km/s.

■ La velocidad de propagación de una determinada onda depende del tipo de onda y de las características del medio en el que se transmite la perturbación.



Las cuerdas vocales vibran al emitir sonidos.



Propagación de un pulso en una cuerda.



Si se arroja una piedra en una superficie de agua, se genera una perturbación que se propaga a través de ondas circulares.

Tipos de ondas

Se denomina **onda mecánica** a una perturbación que se propaga por un medio material transportando energía mecánica.

Por ejemplo, si una persona genera un pulso en el extremo de una soga, se producen vibraciones en los puntos de la soga cercanos a la mano. La energía se transmite a través de cada partícula de la soga (medio material), una a una si las consideramos puntuales, hasta llegar al otro extremo. Cada punto de la soga oscila hacia arriba y abajo con respecto a su posición original en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Si en lugar de producir un pulso se genera un movimiento continuo hacia arriba y abajo con respecto a la posición de equilibrio, se produce una sucesión de pulsos. En este caso, todas las partículas de la soga vibran al ser alcanzadas por el movimiento ondulatorio.

Por el contrario, si se considera un resorte y se comprime en uno de sus extremos, las espiras oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda. Cuando se suelta el extremo, las espiras tienden a regresar a su posición original. El movimiento de compresión y elongación de las espiras se transmite a lo largo de todo el resorte con una determinada velocidad de propagación, que depende del tipo de pulso generado y de la elasticidad del medio o características del resorte.

En estos dos ejemplos se originan ondas mecánicas que transmiten energía a través de un medio material. Si las partículas del medio en el que se propaga la perturbación vibran en un eje perpendicular a la dirección de propagación, las **ondas** se llaman **transversales**, como el caso de la soga.

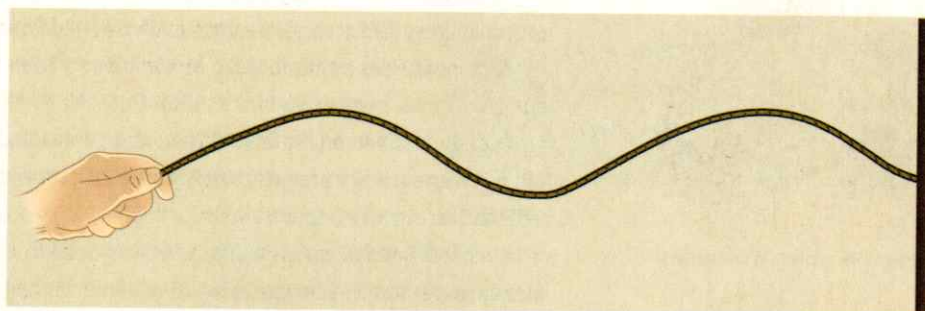
Si las partículas vibran en un eje paralelo a la dirección de propagación, las **ondas** se denominan **longitudinales**, como ocurre en el resorte.

Una onda longitudinal siempre es mecánica, es decir se propaga en un medio material. Las ondas sonoras son un ejemplo típico de esta forma de movimiento ondulatorio.

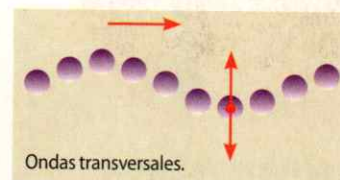
Las ondas transversales pueden ser mecánicas, como las que se propagan a lo largo de una cuerda tensa cuando se produce una perturbación en uno de sus extremos, o **electromagnéticas**, como las de la luz, los rayos X, la radio, o las microondas.

En el caso de las ondas electromagnéticas, que también pueden propagarse en el vacío, el campo eléctrico oscila en un eje perpendicular a la dirección de propagación; el campo magnético también oscila, pero en dirección perpendicular al campo eléctrico.

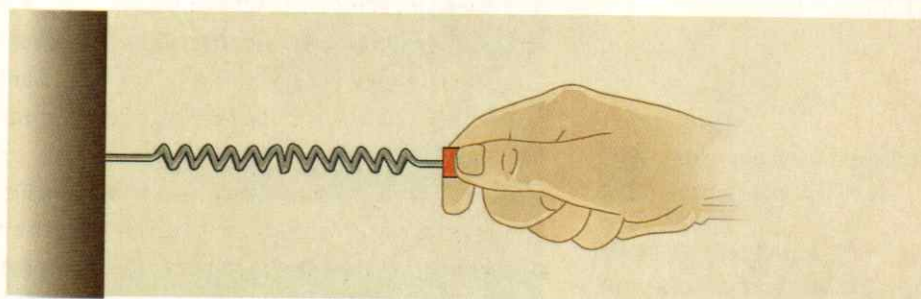
Algunos fenómenos ondulatorios mecánicos, como las olas superficiales de los líquidos, son combinaciones de movimientos longitudinales y transversales más complejos, por lo cual las partículas de líquido se mueven de forma elíptica.



Ondas mecánicas transversales generadas por un pulso sobre un extremo de una soga.



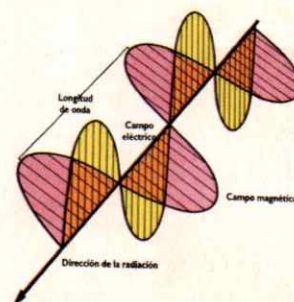
Ondas transversales.



Ondas mecánicas longitudinales generadas en un resorte.

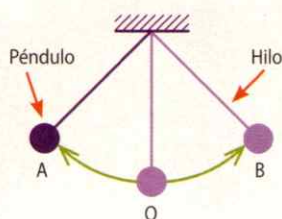


Ondas longitudinales.

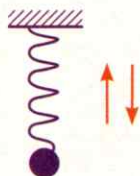


Las ondas electromagnéticas se originan por la variación de campos magnéticos y eléctricos en el tiempo, en forma perpendicular a la dirección de propagación.

Movimiento oscilatorio armónico



Movimiento oscilatorio de un péndulo.



Movimiento oscilatorio vertical de un cuerpo colgado de un resorte.

Para comprender y describir las perturbaciones que se producen en un punto alcanzado por una onda, resulta necesario analizar el denominado **movimiento oscilatorio armónico**.

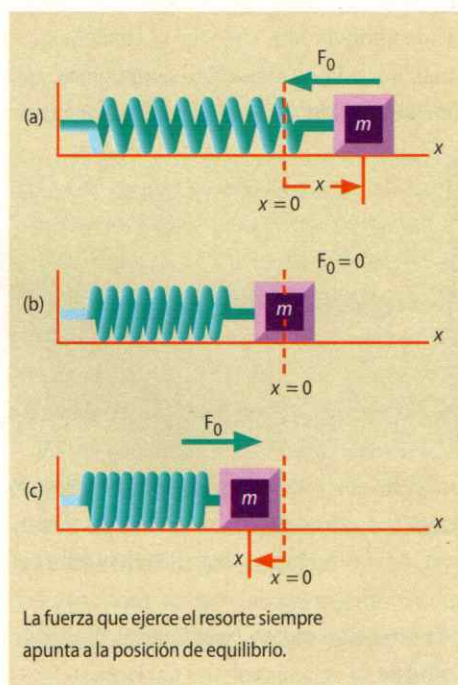
Si se considera un dispositivo formado por un pequeño cuerpo que cuelga de un hilo fijo en un extremo, que se denomina **péndulo**, y se aparta el cuerpo de su posición de equilibrio O hasta la posición A y se lo suelta, el cuerpo alcanzará otra posición, B, después de pasar por O. Luego volverá a la posición A y así continuará con este movimiento cíclico, si el rozamiento con el aire es despreciable.

Todo movimiento que se repite cada cierto período regular de tiempo se denomina **periódico**. El tiempo que tarda el cuerpo en efectuar un movimiento completo se llama **período**, se representa con la letra T y en el SI se mide en segundos como ya se analizó para el movimiento circular uniforme.

El movimiento del péndulo, además de ser periódico, es **oscilatorio**. Los cuerpos que tienen movimientos oscilatorios se caracterizan, como ocurre con el péndulo, por tener una posición de equilibrio. Apartados de esa posición pasan sucesivamente por ella apartándose igual distancia a ambos lados durante su movimiento.

Este tipo de movimiento también lo realiza un cuerpo unido a un resorte fijo a una pared (suponiendo despreciable el rozamiento con el piso).

Si se desplaza el cuerpo de su posición de equilibrio, se origina una fuerza elástica de restauración que tiende primero a regresar el sistema hacia la posición de equilibrio, luego a superar esta posición, y finalmente a frenarlo en el otro extremo. Desde este lugar, la fuerza elástica vuelve a llevarlo hasta la posición de equilibrio y luego hasta el otro extremo, generando en el cuerpo oscilaciones que se mantienen por acción del resorte.



La fuerza que ejerce el resorte siempre apunta a la posición de equilibrio.

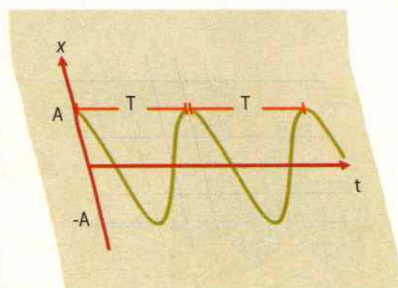
Para determinar experimentalmente la

forma de la ecuación horaria de este movimiento se propone un sistema cartesiano en el que el eje x coincide con la dirección del movimiento y el origen está en la posición de equilibrio, y se miden los tiempos para las distintas posiciones.

Esto se puede hacer tomando fotos del cuerpo en determinados intervalos de tiempo, o utilizando unos dispositivos llamados **sensores de posición**, que permiten el registro de los datos por medio de programas informáticos.

Para representar gráficamente la función que relaciona las posiciones del cuerpo en función del tiempo, se consideran los tiempos sobre el eje x y, sobre el eje de las ordenadas, las sucesivas posiciones que alcanza el cuerpo con respecto a su posición de equilibrio.

Las curvas que se obtienen en esta representación gráfica son similares a las funciones trigonométricas seno y coseno, características de estos movimientos y que además, confirman su periodicidad.



Este gráfico relaciona las posiciones del cuerpo que oscila en el sistema cuerpo-resorte con el tiempo, y muestra que el movimiento que se produce es periódico.

Para deducir la ecuación horaria del movimiento oscilatorio armónico (MOA) se puede utilizar la proyección de un cuerpo que gira con movimiento circular uniforme sobre un eje vertical que pasa por el centro de su trayectoria.

Si se considera el punto O, centro de la circunferencia, como origen del eje vertical y se supone que el cuerpo que recorre la circunferencia se encuentra en el punto O', para un tiempo $t = 0$ la proyección coincide con el centro de circunferencia O.

Cuando el cuerpo recorre una vuelta completa, su proyección sobre el eje vertical hará un movimiento similar al que haría un cuerpo unido a un resorte vertical.

Para un tiempo que corresponda a un cuarto del período, es decir, para $t = \frac{T}{4}$, el recorrido del cuerpo corresponde a un cuarto de vuelta y su proyección llegará al punto más alto; para un tiempo $t = \frac{T}{2}$, el cuerpo recorre la mitad de la circunferencia y su proyección, hacia abajo, coincide nuevamente con O etc. Cuando el cuerpo ha recorrido la circunferencia completa, el tiempo transcurrido es equivalente a un período y el movimiento se repite. El valor de la coordenada de la proyección se puede calcular a partir de la expresión: $y = A \cdot \sin \alpha$ (1) en la que A (amplitud del MOA) corresponde al radio de la trayectoria del movimiento circular, y α al ángulo central considerado en la circunferencia.

En el movimiento circular uniforme, la velocidad angular es: $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (2) donde ω es la velocidad angular y T es el tiempo empleado en dar una vuelta completa. El período de dicho movimiento coincide en este caso con el del MOA, ya que el móvil tarda el mismo tiempo en dar una vuelta completa que el que su proyección tarda en una oscilación completa.

Además, según la definición de velocidad angular ya vista, es posible escribir: $\alpha = \omega \cdot t$ (3)

O sea $\omega = \frac{\alpha}{t}$.

Por lo tanto se deduce que (2) y (3) $\frac{2\pi}{T} = \frac{\alpha}{t} \Rightarrow \alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot t$

Con lo cual, reemplazando esta última igualdad en (1) se obtiene la expresión de la ecuación horaria del un MOA que es:

$$y = A \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t \right)$$

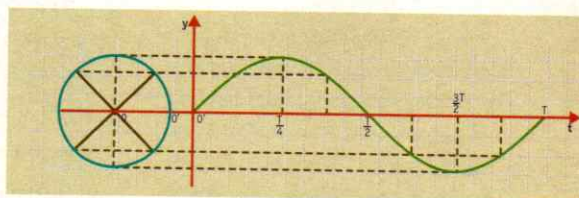
donde y es la posición en el tiempo t, A es la amplitud del MOA y T al intervalo de tiempo en el que se produce una oscilación completa.

Las ondas armónicas

Si se perturba el extremo de una cuerda, de modo tal que se produzca un movimiento oscilatorio armónico en torno a la posición de equilibrio, la onda que se propaga se denomina **onda armónica**. Cada punto del medio alcanzado por la perturbación producida por la fuente también oscila con igual amplitud y período. Este proceso no solo sucede con las ondas mecánicas; también se puede dar en ondas electromagnéticas en las que las oscilaciones armónicas se producen en los campos eléctrico y magnético de los puntos alcanzados por la onda.

Muchos fenómenos ondulatorios se pueden explicar teniendo en cuenta que las ondas resultantes pueden surgir de la superposición de ondas armónicas o periódicas.

El matemático francés Jean Fourier (1768-1830) demostró que cualquier vibración, por compleja que sea, puede ser reconstruida mediante una suma de vibraciones armónicas simples. En el que se conoce como **Teorema de Fourier**, sostiene que toda función periódica continua puede desarrollarse como una combinación de funciones sinusoidales. A partir de esta propiedad es posible analizar ondas complejas como el sonido de una orquesta, mediante la superposición de ondas armónicas.



▶ Por ejemplo, si una partícula se mueve con MOA y su ecuación es:

$$y = 10 \text{ cm} \cdot \sin \frac{\pi}{4s} \cdot t,$$

su posición en el instante $t = 5$ s será:

$$y = 10 \text{ cm} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4s} \cdot 5s \right) \approx -7 \text{ cm}$$

Entonces, la partícula se encuentra a -7 cm, es decir a 7 cm del origen considerado, pero en el semieje negativo.

Características de una onda

Como se ha dicho, el **modelo de ondas** permite describir muchos fenómenos físicos. Las ondas no se ven, pero pueden observarse sus efectos, por lo tanto su representación gráfica no es la realidad misma sino solo una forma de interpretarla, un modelo que permite su descripción y comprensión. Para caracterizar una onda y diferenciarla de otra, es necesario tener presentes algunas magnitudes que aportan información sobre sus propiedades.

Si se considera un par de ejes cartesianos, de modo que el eje y corresponde a la dirección de oscilación y el eje x a la dirección de propagación de la onda, y se analizan las posiciones de los puntos del medio alcanzados por la onda en un **cierto instante**, se puede observar que existen valores máximos y mínimos. Para obtenerlos se considera el desplazamiento de la onda respecto del eje positivo o negativo de las ordenadas (posición de equilibrio) una misma cantidad A . Este valor se denomina **amplitud** de la onda.

A las posiciones máximas se las denomina **crestas** y a las mínimas, **valles**.

Las posiciones o puntos intermedios están caracterizados por una coordenada y que se denomina **elongación**.

La distancia entre dos máximos o dos mínimos consecutivos se llama **longitud de onda** y se simboliza λ . Cada onda tiene su longitud de onda característica que se mide en metros. También se utilizan algunos de sus múltiplos y submúltiplos como kilómetros, centímetros, nanómetros (10^{-9} m), ángstroms (10^{-10} m), etc.

El **período** de la onda (T) corresponde al intervalo de tiempo en el cual se produce una oscilación completa. En ese tiempo, la perturbación recorre una longitud de onda.

La **frecuencia** (f) es el número de oscilaciones completas que se realizan por unidad de tiempo. Su unidad de medida es la oscilación por segundo o **hertz** (Hz). Si $f = \frac{1}{T}$ la onda tiene una frecuencia de un hertz. Es decir $1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$.

Para frecuencias muy altas se utilizan algunos múltiplos como kilohertz ($1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$) o megahertz ($1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$).

La velocidad de propagación de la onda depende del tipo de onda y del medio en el que se propaga. Por ejemplo, la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20°C es aproximadamente 340 m/s , mientras que la velocidad de propagación de la luz en el vacío es $300\,000 \text{ km/s}$. Como la velocidad es constante para cada medio, en tanto se mantengan las condiciones, su módulo se puede calcular tomando en cuenta la distancia recorrida por la perturbación y el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia.

Considerando que la señal recorre una longitud de onda, λ , en un período T , se puede calcular su velocidad mediante la expresión:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Además, teniendo en cuenta que la frecuencia se define también como la inversa del período $f = \frac{1}{T}$ y reemplazando en la fórmula anterior, se obtiene que:

$$v = \lambda \cdot f$$

donde v es la velocidad de la onda, λ su longitud y f su período.

Aplicaciones de las características de una onda

1. Calculen la longitud de onda de una señal electromagnética emitida por la estación de radio FM 106.3.

Como la emisora de radio transmite en una frecuencia de aproximadamente 106.3 megahertz $\nu = \lambda \cdot f$, entonces:

$$\lambda = \frac{\nu}{f} = \frac{300\,000\text{ km/s}}{106,3 \cdot 10^6\text{ Hz}} = \frac{3 \cdot 10^8\text{ m/s}}{1,063 \cdot 10^8\text{ 1/s}} \approx 2,83\text{ m}$$

La longitud de onda de esta señal es aproximadamente 2,83 m.

2. Calculen la frecuencia de la nota musical mi, sabiendo que tiene una longitud de onda aproximada de 103 cm.

Como se trata de una señal sonora, se considera la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20 °C que es 340 m/s. Como $\nu = \lambda \cdot f$, entonces:

$$f = \frac{\nu}{\lambda} = \frac{340\text{ m/s}}{1,03\text{ m}} \approx 330\frac{1}{s} = 330\text{ Hz}$$

La frecuencia de la nota musical mi es 330 Hz.

1. El emisor de ultrasonidos de un ecógrafo emite ondas de $2 \cdot 10^5\text{ Hz}$ que penetran en el cuerpo humano donde su velocidad de propagación es de 1500 m/s. Si el aparato puede detectar detalles del tamaño de su longitud de onda, ¿cuál es el mínimo tamaño de los detalles que puede captar?

2. ¿Cuál es la frecuencia de una onda de luz monocromática de longitud de onda $6 \cdot 10^{-7}\text{ m}$ que se desplaza en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$)?

3. Una onda de luz monocromática de frecuencia $4 \cdot 10^{14}\text{ Hz}$ penetra en vidrio donde su longitud de onda es $5 \cdot 10^{-7}\text{ m}$. ¿Cuál es la velocidad de propagación de la luz en ese tipo de vidrio?

La ecuación de las ondas

La propagación de una onda se describe con una ecuación que permite predecir el estado de oscilación de cualquier punto alcanzado por la onda en cualquier instante. Esta ecuación se denomina **ecuación de onda** y debe ser función tanto de la posición como del tiempo.

Si se considera una onda que se propaga, por ejemplo, por una soga, con una velocidad constante, al trazar los ejes cartesianos se observa que el pulso se mueve a lo largo del eje x y el desplazamiento transversal de la soga se mide sobre el eje y . Una función que permite estudiar esta situación es $y = f(x)$ siempre que el tiempo se mantenga fijo. Si se toma una fotografía de un auto en movimiento, la imagen representará su posición en ese instante. Es posible decir lo mismo para el caso de la soga por la cual se propaga la onda. Pero como la posición de cada punto varía con el tiempo, otra función que podría representar esta situación sería, para cada punto, $y = f(t)$.

La ecuación de onda debe contemplar simultáneamente ambas situaciones, es decir predecir la primera situación para cualquier tiempo y la segunda, para cualquier punto del medio alcanzado por la onda, por lo que deberá ser una función de la posición y del tiempo: $y = f(x, t)$. El desarrollo matemático de esta expresión se puede escribir como:

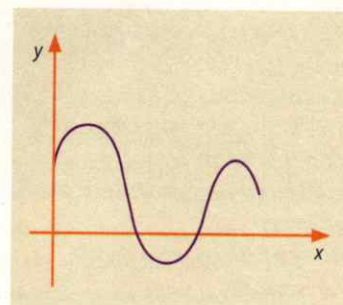
$$y = A \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (5)$$

donde A es la amplitud, λ la longitud de onda y T es el período.

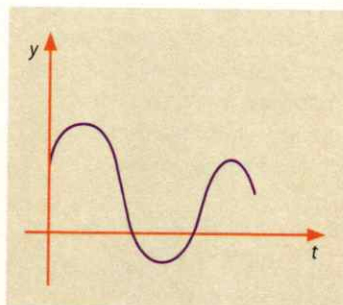
Por lo tanto, la ecuación de una onda permite calcular la perturbación de cualquier punto del medio en cualquier instante;

■ si se fija el valor de x , la ecuación permite conocer la elongación de una partícula concreta en cualquier instante;

■ si se fija el valor de t , la ecuación de onda representa la forma de la onda en un instante determinado.



$y = f(x)$ da la perturbación en un tiempo t .



$y = f(t)$ da las elongaciones de un punto de la onda.

Aplicaciones de la ecuación de ondas

1. Si la ecuación de una onda transversal que se propaga a lo largo de una cuerda está dada por la expresión: $y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t)$, hallen:
- la amplitud de la onda;
 - el período;
 - la longitud de onda;
 - la velocidad de propagación;
 - la magnitud de la perturbación en un punto que se encuentra a 0,4 m de la fuente al cabo de 0,5 segundos de comenzar a contar el tiempo.

Para conocer las características de esta onda en particular se puede comparar su ecuación $y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t)$, con la ecuación general de las ondas $y = A \cos 2\pi (\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T})$.

Para que la comparación sea más sencilla, se puede sacar 2 como factor común del argumento en la ecuación de la onda transversal a lo largo de una cuerda:

$$y = 0,1 \text{ m} \cos \pi (8 \text{ m}^{-1} \cdot x - 4 \text{ s}^{-1}t) = 0,1 \text{ m} \cos 2\pi (4 \text{ m}^{-1} \cdot x - 2 \text{ s}^{-1}t) \quad (6)$$

- La amplitud A es el factor que multiplica a la función coseno, en este caso $A = 0,1 \text{ m}$
- Si se compara el argumento de la función coseno en la ecuación de onda y en la expresión (6), se tiene: $\frac{1}{T} = 2 \text{ s}^{-1}$ por lo que $T = 0,5 \text{ s}$.
- Para hallar la longitud de onda se procede de igual manera. La comparación de los argumentos de ambas ecuaciones lleva a que $\frac{1}{\lambda} = 4 \text{ m}^{-1}$ por lo que $\lambda = 0,25 \text{ m}$.
- La velocidad de propagación se puede calcular con la ecuación $v = \frac{\lambda}{T}$.

$$v = \frac{0,25 \text{ m}}{0,5 \text{ s}} = 0,5 \text{ m/s}.$$

- Reemplazando los valores $t = 0,5 \text{ s}$ y $x = 0,4 \text{ m}$ en la ecuación (5) se tiene:
 $y = 0,1 \text{ m} \cos 2\pi (\frac{0,4 \text{ m}}{0,25 \text{ m}} - \frac{0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s}}) = 0,1 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (0,6) \approx 0,1 \cdot (-0,8) \text{ m} = -0,8 \text{ cm}.$

Esto significa que en este punto y en ese instante la magnitud de la perturbación está dada por la elongación que alcanza la cuerda, es decir $y = -0,8 \text{ cm}$.

2. Si la onda generada en una cuerda tensa tiene una amplitud de 0,05 m, una frecuencia de 20 Hz y una velocidad de propagación de 10 m/s,

- escriban la ecuación de onda;
- determinen la posición de un punto ubicado a 0,5 m del origen cuando transcurrió 0,1 segundo desde que se comenzó a tomar el tiempo.

- La ecuación de onda es $y = A \cos 2\pi (\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T})$. Como $v = \lambda \cdot f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$. Luego,

$$\lambda = \frac{10 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = \frac{10 \text{ m/s}}{20 \text{ 1/s}} = 0,5 \text{ m}$$

Teniendo en cuenta, además, que la relación entre el período y la frecuencia es: $T = \frac{1}{f}$, se verifica que $T = \frac{1}{20 \text{ s}^{-1}} = 0,05 \text{ s}$, entonces la ecuación de onda es:

$$y = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (\frac{x}{0,5 \text{ m}} - \frac{t}{0,05 \text{ s}})$$

- La posición de un punto ubicado a $x = 0,5 \text{ m}$ del origen en $t = 0,1 \text{ s}$ es:

$$y = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (\frac{0,5 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} - \frac{0,1 \text{ s}}{0,05 \text{ s}}) = 0,05 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (-1) = 0,05 \text{ m}$$

El punto ubicado a 0,5 m del origen, a 0,1 segundo tiene una elongación de 0,05 m.



4. Una onda de 8 s de período y 4 cm de longitud de onda presenta una elongación de 20 cm en un punto ubicado en la posición $x = 1 \text{ cm}$ cuando ha transcurrido 1 s de movimiento.

- Calculen su amplitud y escriban su ecuación.
- Determinen la velocidad de propagación.

5. La ecuación de una onda es:
 $y = 0,5 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (\frac{x}{2 \text{ m}} - \frac{t}{2 \text{ s}})$

Determinen:

- su amplitud, longitud de onda, frecuencia y velocidad;
- la elongación de un punto ubicado en la coordenada $x = 1 \text{ m}$ cuando ha transcurrido 0,5 s.

6. Una onda que tiene una ecuación $y = 0,4 \text{ m} \cdot \cos 2\pi (\frac{x}{2 \text{ m}} - \frac{t}{4 \text{ s}})$ pasa del medio en el que se propagaba a otro donde su velocidad se duplica y su amplitud se reduce a la mitad. Escriban la ecuación de propagación de la onda en el segundo medio, considerando que su frecuencia permanece constante.

Propiedades de las ondas

Existen propiedades que caracterizan a los fenómenos ondulatorios. En cuanto a su propagación, las ondas se reflejan y se refractan. Al llegar a obstáculos comparables con su longitud de ondas, sufren el fenómeno de difracción y se interfieren entre ellas al llegar simultáneamente al mismo lugar.

Reflexión

Si una onda incide sobre un cuerpo que obstaculiza su propagación, se **refleja**. Esto significa que vuelve al medio en el cual se propaga. Como la onda transporta energía, cierta cantidad de esta energía es absorbida por el cuerpo sobre el cual incide, y otra parte de energía vuelve como una onda de igual frecuencia y velocidad.

Cuando la luz llega por ejemplo a un espejo, se refleja y cambia su dirección al incidir sobre la superficie del espejo, transfiriendo al mismo medio gran parte de la energía que transporta.

Del mismo modo, el sonido puede reflejarse cuando incide sobre un obstáculo que impide su propagación. El **eco** es un ejemplo característico de esta propiedad.

Refracción

La **refracción** se produce cuando una onda llega a una superficie que separa dos medios de propagación distintos. Parte de la energía vuelve al medio por el que se propagaba y el resto pasa al otro medio.

La onda refractada mantiene su frecuencia porque es una característica de la fuente de emisión de la onda, pero varía su velocidad de propagación, ya que los medios son diferentes. Al variar su velocidad de propagación, también varía su longitud de onda. El ángulo de desviación o de refracción formado por la dirección en que se propaga la onda incidente y una recta perpendicular a la superficie de separación en el punto de incidencia, depende de las características de los medios de propagación.

Por ejemplo, una onda luminosa que llega desde el aire sufre mayor desviación en el vidrio que en el agua.

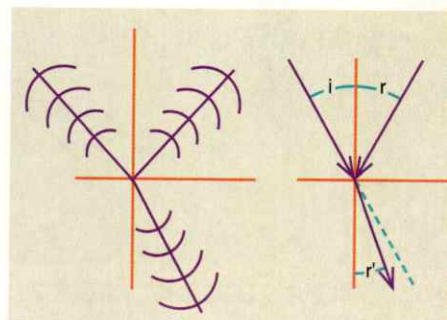
Difracción

Cuando una onda llega a una ranura o un obstáculo de tamaño comparable con su longitud de onda, se produce un fenómeno denominado **difracción** que consiste en la desviación de la onda como si el obstáculo emitiera una onda esférica.

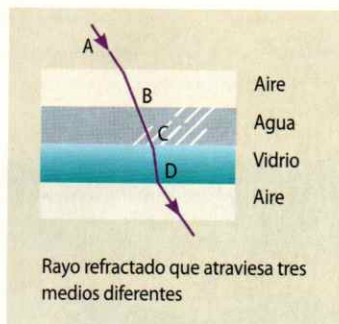
Si la longitud de onda es comparable con el tamaño del obstáculo, el efecto de la difracción es muy notable. La onda se desvía y de esa manera lleva energía a lugares que serían inaccesibles para la onda si no hubiese difracción. Por ejemplo, si se trata de ondas luminosas que llegan a un obstáculo pequeño, como un cabello, la propagación rectilínea de la luz prevé sombras detrás de éste. La difracción hace que la luz dé una sombra difusa y regiones iluminadas a su alrededor.

Si las dimensiones del obstáculo o de la ranura son mucho más grandes que la longitud de onda, no se observará tal difracción, por lo cual los bordes del objeto formarán sombras bien definidas.

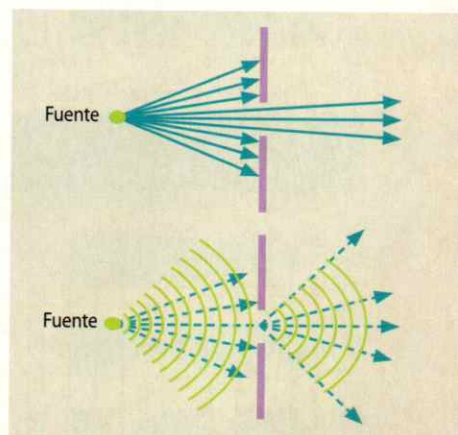
En el campo de las comunicaciones, las señales de radio de grandes longitudes de onda se utilizan para mejorar el alcance, ya que pueden difractarse al pasar por edificios cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con las longitudes de estas ondas.



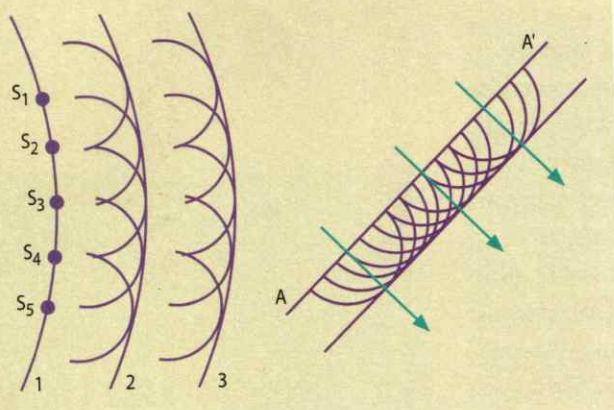
Cuando una onda llega a una superficie de separación entre dos medios de propagación distintos, la onda se refleja y se refracta.



Este gráfico representa una onda luminosa, que se refracta de formas diferentes en diferentes medios de propagación.



Difracción de ondas al pasar por una ranura pequeña.



Producción de frentes de ondas según el Principio de Huygens.

Principio de Huygens

Un **frente de onda** es una superficie que pasa por todos los puntos del medio alcanzados por el movimiento ondulatorio en el mismo instante. La perturbación en todos esos puntos tiene la misma fase. El **Principio de Huygens** proporciona un método geométrico para hallar, a partir de una forma conocida del frente de ondas en cierto instante, la forma que adoptará dicho frente en otro instante posterior. Para ello se trazan una serie de líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda. Estas líneas se denominan **rayos** y corresponden a las líneas de propagación de la onda. Cuando el movimiento ondulatorio alcanza los puntos S_1, S_2, S_3 , etc. que forman un frente de onda, cada partícula del frente se convierte en un centro emisor de nuevas ondas secundarias (indicadas en el gráfico por semicircunferencias) cuya envolvente es un nuevo frente de ondas que alcanza la siguiente

zona de partículas del medio.

Este principio permite comprender el fenómeno de la difracción. Cuando una onda llega a un obstáculo, los puntos de éste se convierten en nuevos centros emisores de ondas secundarias. De esta forma, las ondas pueden llegar a regiones ocultas por el obstáculo.

Interferencia

Si existe una única fuente emisora de ondas, la perturbación de cada punto del espacio corresponde a la onda que procede de esa fuente. Pero puede ocurrir que existan varias fuentes emisoras en un mismo lugar, por lo cual se produce una **superposición** de ondas.

En dos ondas que avanzan por una soga en sentidos opuestos pueden ocurrir tres sucesos:

- las dos ondas se encuentran en un punto en el cual coinciden sus máximas amplitudes; se dice que están en **fase**; la amplitud de la onda resultante es la suma de las amplitudes de cada onda;

- las dos ondas llegan a un mismo punto pero la máxima amplitud de una onda hacia arriba coincide con la máxima amplitud de la otra, hacia abajo; en este caso sus efectos se restan y no se produce oscilación en ese punto (si ambas ondas tienen la misma amplitud). Esta situación se denomina **oposición de fase**;

- las ondas llegan a un mismo punto pero no están en concordancia de fase ni en oposición de fase. Entonces sus efectos también se suman.

Dos ondas son **coherentes** si llegan al mismo punto manteniendo igual diferencia de fase, siempre en concordancia o en oposición de fase, independientemente del tiempo. Una superposición de ondas coherentes se denomina **interferencia**.

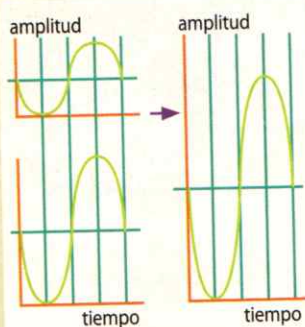
Si a un punto A llegan dos ondas coherentes en concordancia de fase, se potencian sus efectos. La onda resultante tendrá mayor amplitud. Este punto será un máximo de interferencia y se llama **constructiva**.

Si las ondas coherentes son emitidas por dos fuentes F_1 y F_2 y para llegar al punto A, cada onda recorre respectivamente una distancia D_1 y D_2 , la diferencia entre los caminos para llegar a A es $\Delta D = D_1 - D_2$.

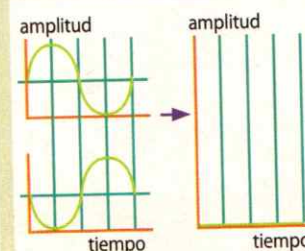
Si ΔD es un múltiplo entero de la longitud de onda λ , en el punto A habrá un máximo de interferencia. Es decir, para que haya un punto de interferencia constructiva debe ser $\Delta D = n \cdot \lambda$ donde n es un número entero.

En cambio, si las ondas coherentes llegan al mismo punto en oposición de fase, se produce una interferencia **destructiva** en ese punto. El efecto resultante en ese punto es menor que el efecto provocado por cada onda y hasta puede anularse. Esta situación ocurrirá cada vez que $\Delta D = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda$, etc., o bien $\Delta D = \frac{p}{2}\lambda$, donde p es un número impar.

Dos ondas en fase



Dos ondas en oposición de fase



Dos ondas iguales en fase opuesta se cancelan.

Ondas estacionarias

Cuando dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia avanzan en sentidos opuestos a través de un medio, se producen **ondas estacionarias**, que resultan de la superposición de las anteriores y presentan interés para la explicación de algunos fenómenos, como la emisión de sonido por parte de instrumentos musicales de cuerda o de viento. Por ejemplo, si se sujeta una cuerda a una pared y se mantiene fijo el otro extremo, cuando se produce una perturbación continua, la onda avanza hasta un extremo donde se refleja en sentido opuesto. La onda primitiva y la reflejada interfieren y el resultado es una onda estacionaria en la cuerda.

Esta onda se caracteriza por la existencia de puntos que se mantienen sin oscilar, denominados **nodos**. Entre dos nodos hay un punto denominado **vientre**, que oscila con una amplitud igual al doble de la que tenía la onda inicial.

Como se observa en las figuras, en las ondas estacionarias la amplitud de oscilación de cada punto del medio se mantiene constante en el tiempo. Cuando se generan ondas en una cuerda fija en ambos extremos, estos puntos son nodos, ya que por estar fijos no pueden oscilar. Por lo tanto si se perturba una cuerda se puede generar una onda estacionaria, cuya longitud de onda es el doble del largo de la cuerda L . Si se duplica la frecuencia, se obtiene una onda estacionaria con una longitud de onda igual a la mitad de la anterior.

Esto se puede generalizar en forma matemática mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (7)$$

donde L es la longitud de la cuerda, n el número de nodos y λ la longitud de onda.

Además como $v = \lambda \cdot f$, despejando f , resulta que:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (8)$$

Luego, reemplazando convenientemente la ecuación (7) en (8) resulta que:

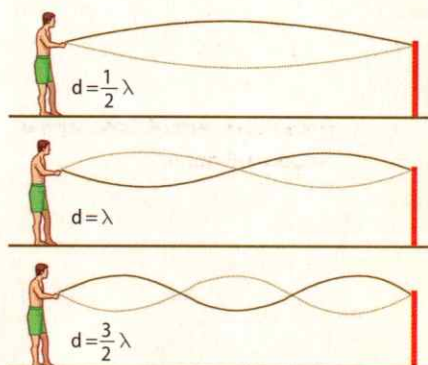
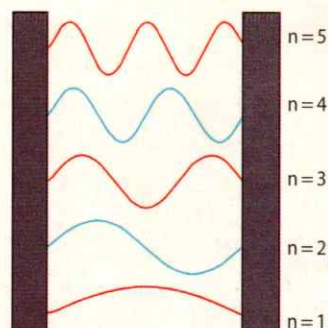
$$f = n \cdot \frac{v}{2L}$$

Esta última ecuación permite calcular las posibles frecuencias de las ondas en una cuerda de longitud L donde la velocidad de propagación es v debido al material de que esté hecha y tensión a la que esté sometida.

La frecuencia más baja, llamada **frecuencia fundamental**, corresponde a una longitud de onda $\lambda = \frac{v}{2L}$. Las restantes frecuencias de las demás ondas son múltiplos de la fundamental y se las llama **frecuencias armónicas**.

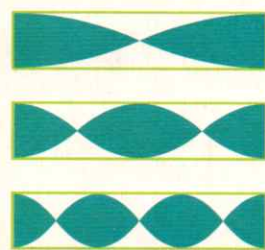
Por ejemplo, en las cuerdas de instrumentos musicales que se puntean, se golpean o se rozan con un arco, así como en los tubos de los instrumentos de viento, se forman ondas estacionarias que dan lugar a las notas musicales y al timbre característico de cada instrumento.

Si un tubo es abierto, el aire vibra con su máxima amplitud en los extremos. Como la distancia entre dos vientres es de media longitud de onda, si la longitud del tubo es L , las posibles ondas estacionarias podrán tener las longitudes de onda que cumplan la condición: $L = \frac{\lambda}{2}$, $L = \lambda$, $L = \frac{3}{2}\lambda$, ... en general $L = \frac{n}{2}\lambda$, $n = 1, 2, 3...$ es un número entero. Si el tubo es cerrado, se origina un vientre en el extremo por donde penetra el aire y un nodo en el extremo cerrado. Como la distancia entre un vientre y un nodo consecutivo es $\frac{\lambda}{4}$, la longitud L del tubo es en las figuras representadas es $L = \frac{\lambda}{4}$, $L = \frac{3}{4}\lambda$, $L = \frac{5}{4}\lambda$, ... En general $L = \frac{2n+1}{4}\lambda$; con $n = 0, 1, 2, 3...$

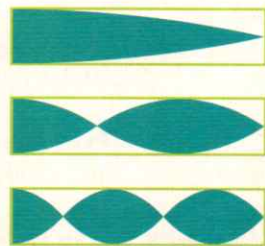


Ondas estacionarias en una cuerda sujeta a una pared por uno de sus extremos.

Ondas estacionarias en tubos abiertos

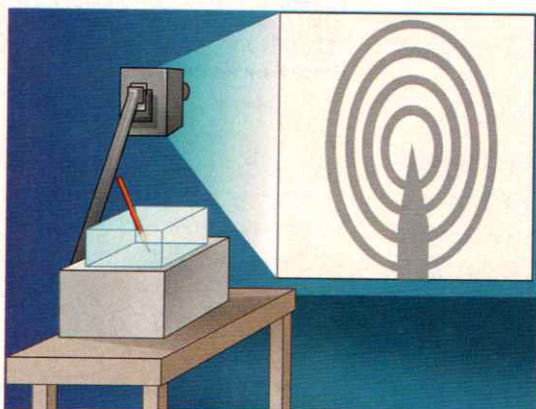


Ondas estacionarias en tubos cerrados



La cuba de ondas

Una cuba de ondas es un dispositivo para poner en práctica diseños experimentales con el objeto de estudiar el tipo de ondas que se generan en el agua, y su relación con los fenómenos ondulatorios ya sean mecánicos, eléctricos u ópticos. La cuba tiene un fondo de vidrio transparente que permite proyectar las imágenes de las ondas que se generan en el agua contenida en su interior. Una cuba de ondas se puede construir en forma sencilla con los siguientes elementos.



Materiales

Una fuente rectangular de vidrio transparente. Un proyector para diapositivas (o retro proyector). Un telón o pantalla para captar las imágenes. Lápiz o cuenta gotas. Tela fina o malla. Barras de acrílico, aluminio o vidrio. Reglas. Una manguera fina con un alambre en su interior para darle forma parabólica.

Objetivos

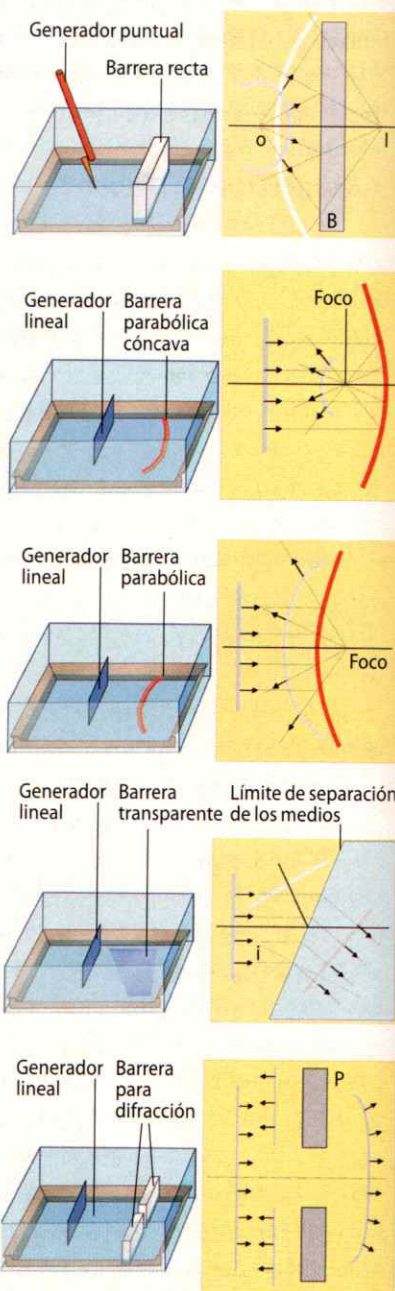
Con este dispositivo se puede comprobar la formación de ondas circulares, frentes de ondas planas, y fenómenos como la reflexión, la refracción y la difracción de ondas.

Procedimientos

1. Coloquen la fuente sobre el proyector.
2. Agreguen agua hasta 1 cm de altura.
3. Enciendan el proyector.

4. Con el lápiz o el cuenta gotas, generen una perturbación sobre la superficie de agua. Luego generen más pulsos sucesivos.
5. Observen y registren las formas de las perturbaciones que se producen sobre la superficie del agua.
6. Realicen la misma perturbación, es decir, generen pulsos sucesivos, pero con una regla larga.
7. Observen si también se generan ondas con la misma forma.
8. Cubran las paredes de la fuente con alguna malla o tela fina.
9. Coloquen una barra de acrílico o vidrio en la fuente.
10. Generen con el lápiz un frente de onda circular.
11. Expliquen qué sucede cuando el frente de ondas llega a la barra.
12. Utilicen una regla como generador de la perturbación y un obstáculo parabólico como una manguera pequeña. Generen una perturbación con la regla frente a este obstáculo.
13. ¿Qué ocurre con los pulsos rectos cuando se utiliza la manguera como superficie reflectora? ¿Qué forma tienen los pulsos reflejados?
14. ¿En algún punto se genera un pulso que tenga la misma forma?
15. Inviertan la manguera y repitan este procedimiento. Expliquen qué ocurre en este caso.
16. Coloquen un trozo de vidrio o material acrílico transparente dentro de la cubeta, de forma tal que no se adhiera al fondo (pueden colocarle un sostén o apoyo de goma o plástico) y el agua apenas sobrepase la superficie del vidrio.
17. Generen con la regla un frente de ondas planas. Observen y expliquen qué fenómeno se produce.
18. Luego coloquen dos trozos de materiales similares a los que usaron para las barreras rectas, de forma tal que quede un espacio entre ellos. Generen un frente de onda plano. ¿Qué ocurre cuando las ondas atraviesan la abertura de separación de estas barreras?

19. Preparen un informe en el que sinteticen los fenómenos y propiedades de las ondas que se analizaron con esta actividad.
20. ¿Qué modificaciones harían al diseño experimental para lograr una mayor precisión en esta comprobación?



Las ondas y las comunicaciones satelitales

En toda sociedad la comunicación es esencial para facilitar el intercambio de información entre los individuos. Muchos de los avances científicos y tecnológicos relacionados con los fenómenos ondulatorios contribuyen a mejorar el acceso de gran parte de la población a fuentes de información de todo el mundo.

Algunos de los inventos importantes que se pueden señalar a lo largo de un recorrido histórico en el ámbito de las comunicaciones, son por ejemplo, el telégrafo, la telegrafía sin cables, la radiodifusión (que tiene lugar desde 1920, con fines de entretenimiento e información), la televisión (que se emite en forma comercial desde la década de 1940).

En 1957, como se dijo al comienzo del presente capítulo, con el lanzamiento por los rusos del primer satélite *Sputnik* se inicia la era satelital, que permitiría tiempo después la creación de importantes compañías de comunicaciones internacionales. Sus propietarios venden la información o señales emitidas por tiempo de transmisión, en segundos, minutos, horas, semanas o incluso años.

Los satélites artificiales

Un satélite artificial es un cuerpo lanzado desde la superficie terrestre que se coloca en órbita alrededor de un cuerpo celeste, como un planeta o un satélite natural. No solo existen satélites para comunicaciones; también hay **satélites meteorológicos**, que aportan datos sobre condiciones climáticas; **satélites de navegación**, que informan sobre posiciones precisas espaciales o geográficas; **satélites de observación** de la Tierra para estudios científicos; **satélites militares**, y **satélites antimisiles** que protegen de iniciativas bélicas.

Satélites de comunicación

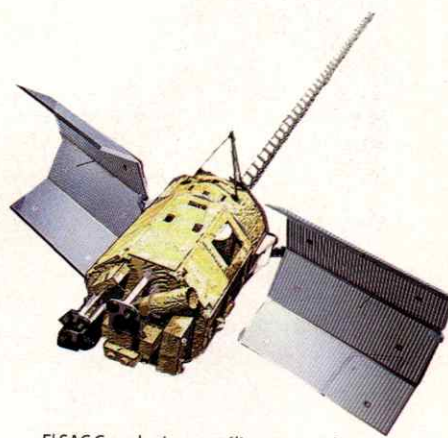
Un radioaficionado ubicado en una determinada localidad emite una señal que es recibida por el satélite. Éste la amplifica y la retransmite inmediatamente. Otro radioaficionado ubicado en otra localidad la recibe y le contesta. Así se inicia una comunicación por satélite. Estos mensajes pueden ser también llamadas telefónicas, imágenes de televisión y conexiones de Internet. Los satélites de comunicaciones permanecen siempre situados sobre un punto en la Tierra, por eso se llaman **geoestacionarios**. Se sitúan a 36 000 km del Ecuador de la Tierra y rotan con un período de 24 horas.

De esta forma, los satélites geoestacionarios parecen fijos para un observador situado en la Tierra y sus señales se pueden recibir mediante antenas receptoras fijas en la Tierra. Permiten conseguir una cobertura global del planeta, excepto las zonas polares.

Las señales llegan al satélite desde la estación en Tierra por el enlace ascendente y se reenvían desde el satélite por el enlace descendente. Para evitar interferencias, las frecuencias son distintas. Se han dispuesto, mundialmente, varias bandas de frecuencia para su uso comercial por satélites. Las más comunes constan de una banda central de aproximadamente 500 MHz (10^6 Hz) centrada en 6 GHz (10^9 Hz) en el enlace hacia arriba (hacia el satélite) y centrada en 4 GHz en el enlace hacia abajo (hacia la Tierra). La banda de 500 MHz, en cada una de las frecuencias, está normalmente dividida en 12 bandas, servidas por cada *transponder* o estación terráquea de recepción y transmisión, de 36 MHz de ancho de banda cada una, más 2 MHz de protección en ambos extremos. Cada banda de transponder está, a su vez, dividida en un cierto número de canales de frecuencia, según el tipo de aplicación o la señal que se transmita.



Un satélite artificial explorando el espacio.



El SAC es el primer satélite construido en la República Argentina que orbita la Tierra.

La televisión y la transmisión satelital

Las transmisiones de televisión se realizan con ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia, VHF (*very high frequency*) y ultra altas frecuencias, UHF (*ultra high frequency*).

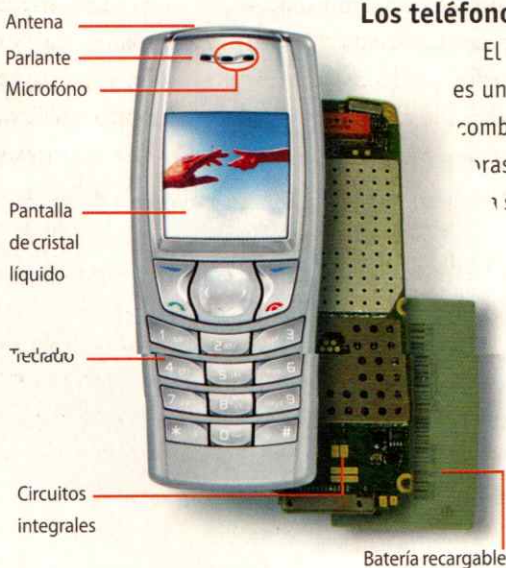
Esto es válido tanto para las transmisiones terrestres captadas por antenas, como para las que llegan por un cable en la modalidad "video-cable". Sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado también el sistema de televisión vía satélite para uso hogareño, que opera en las bandas de las microondas (entre 1000 MHz y 100 000 MHz / 300mm - 3mm).

El programa de televisión se transmite desde una estación terráquea hacia un satélite artificial de comunicaciones ubicado en órbita terrestre. Este satélite está equipado con receptores que captan la señal, equipos que la procesan, y transmisores que dirigen la señal hacia la Tierra donde es captada por las antenas domiciliarias.

Los teléfonos celulares

El principio de la telefonía móvil o celular es un sistema telefónico en el que mediante la combinación de una red de estaciones transmisoras-receptoras de radio (estaciones base) y una serie de centrales telefónicas, se posibilita la comunicación entre terminales telefónicas portátiles (teléfonos celulares).

Las estaciones base están dispuestas sobre una ciudad en forma de una red de células o celdas hexagonales. Se eligió la forma de hexágono porque proporciona una transmisión más efectiva, ya que al ser una figura aproximada a la circular, se aprovechan más los espacios entre las celdas. Cada celda tiene



El teléfono fue inventado por **Alexander Graham Bell** en 1876, y la comunicación inalámbrica tiene sus raíces en la invención de la radio por **Nikolai Tesla** en la década de 1880 (formalmente presentado en 1894 por un joven italiano llamado **Guglielmo Marconi**). Era de esperarse que un día ambas tecnologías fueran combinadas en un mismo aparato.

una estación base situada en un nudo de estas celdas que consiste en una torre y un pequeño edificio que contiene el equipo de radio. Cada estación base tiene asignado un grupo de frecuencias de transmisión y recepción propias. Como el número de frecuencias es limitado, con esta disposición es posible reutilizar las mismas frecuencias en otras células, siempre que no sean adyacentes, para evitar interferencia entre ellas.

Las celdas se definen por su tamaño físico y, lo más importante, por la cantidad de la población que cubren. Los teléfonos celulares tienen una potencia baja que puede variar entre 0,6 watt a 3 watt. La estación central también transmite a bajas potencias, y esto tiene las siguientes ventajas:

- las transmisiones de la base central y de los teléfonos en la misma celda no salen de ésta. Por lo tanto, cada celda puede reutilizar las mismas frecuencias a través de la ciudad;
- el consumo de energía del teléfono celular, que generalmente funciona con baterías, es relativamente bajo. Esto posibilita el uso de baterías más pequeñas, lo que a su vez permite utilizar aparatos de menor tamaño.

La tecnología celular requiere un gran número de bases o estaciones en una ciudad de cualquier tamaño. Una ciudad grande puede llegar a tener cientos de torres, y cada ciudad necesita tener una oficina central que maneje todas las conexiones telefónicas a teléfonos convencionales, y controle todas las estaciones de la región.

Las ondas del éter

ESTE TEXTO, ESCRITO POR CHRISTIAN HUYGENS, PONE DE MANIFIESTO LAS HIPÓTESIS DE ESTE CIENTÍFICO SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ, QUE DESAFÍAN OTRAS TEORÍAS VIGENTES HACIA FINES DE 1600.

“No hallo que nadie haya dado una explicación probable de los fenómenos primeros y más notables de la luz, a saber, por qué no se propaga sino en línea recta, y cómo es que los rayos visibles, que proceden de infinitos lugares distintos, se cruzan unos con otros, sin estorbarse mutuamente de ninguna manera (...).
(...) Si tomamos cierto número de esferas de igual tamaño, fabricadas de una sustancia muy dura, y las disponemos en línea recta, de modo que mutuamente se toquen, vemos cómo, golpeando con una esfera parecida a la primera de las esferas dichas, el movimiento pasa en un momento hasta la última de ellas, la cual se aparta de la hilera sin que podamos percibir que las demás se han movido. Y hasta la misma que nos sirvió para dar el golpe se queda inmóvil junto con las demás. Por donde se ve cómo el movimiento pasa con extremada velocidad; la cual es tanto mayor cuanto mayor es la dureza de la sustancia de las esferas. Pero con todo y con eso sigue

siendo cierto que este avance del movimiento no es instantáneo, sino sucesivo y que, por lo tanto, requiere tiempo. Porque si el movimiento, o si queréis, la disposición para el movimiento, no pasase sucesivamente por todas esas esferas, todas ellas cobrarían movimiento a la vez, y, por ende, juntas avanzarían, lo cual no acontece así. Porque la última se aleja de toda la hilera y adquiere la velocidad de la empujada (...).
(...) Ahora bien, al aplicar esta especie de movimiento al que produce la luz, nada nos impide pensar que las partículas de éter son de una sustancia tan cercana a la dureza y dotadas de una elasticidad tan pronto como queremos. No hace falta examinar aquí las causas de esa elasticidad ni de esa dureza, lo cual nos alejaría demasiado de nuestro asunto.
Con todo diré, de paso, que podemos figurarnos que las partículas del éter, no obstante su pequeñez, se componen a su vez de otras partes y que su elasticidad consiste en el movimiento rapidísimo de una materia sutil que las penetra

por todos lados y obliga a su estructura a tomar una disposición tal, que dé a esa materia fluida la salida más abierta y expedita posible (...). He demostrado, pues, de qué manera puede concebirse que la luz se propague sucesivamente en ondas esféricas, y cómo es posible que esta propagación se haga a una velocidad tan grande como las que exigen los experimentos y las observaciones astronómicas. Y puede notarse además que, aun suponiendo que las partículas estén en movimiento continuo (que para ello hay muchas razones), no puede estorbarse la propagación sucesiva de las ondas, porque la propagación no consiste de ninguna manera en el traslado de tales partículas, sino simplemente en una leve agitación que no pueden menos de comunicar a las que las rodean, pese a cualquier movimiento que actúe sobre ellas, haciéndolas cambiar su posición respectiva.”

(Fuente: *Antología de Física*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1971.)

Luego de la lectura respondan.

- ¿Con qué ideas o hipótesis sobre la naturaleza de la luz no estaba de acuerdo Huygens? ¿Qué intentó demostrar?
- ¿Utilizó alguna analogía o modelo explicativo?
- ¿Cuáles son las conclusiones a las que llega?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- La descripción de muchos fenómenos físicos es posible gracias al **modelo de ondas**.
- Una **perturbación** se puede propagar en el espacio a través de ondas.
- El movimiento ondulatorio está asociado a la producción de oscilaciones de una fuente emisora y al medio de propagación.
- Hay ondas que necesitan de un medio para propagarse, como las **ondas mecánicas** (por ejemplo: el sonido) y otras no, como las **ondas electromagnéticas** (por ejemplo: la luz).
- Las ondas pueden clasificarse en **ondas longitudinales** y **ondas transversales**.
- Para caracterizar distintas ondas es necesario conocer su amplitud, longitud de onda, frecuencia y velocidad de propagación.
- La velocidad de propagación en el vacío de las ondas electromagnéticas es 300 000 km/s, mientras que el sonido se propaga en aire a 20 °C a una velocidad de 340 m/s.
- Todo movimiento que se repite cada cierto período regular de tiempo se denomina **periódico**.
- Muchos fenómenos ondulatorios se pueden explicar teniendo en cuenta que las ondas resultantes pueden surgir de la superposición de ondas simples o periódicas.
- Los movimientos oscilatorios simples se llaman **armónicos simples** porque pueden ser estudiados mediante funciones armónicas o simples, como las funciones seno o coseno.
- Cuando dos ondas armónicas de igual amplitud y frecuencia avanzan en sentido opuesto a través de un medio, se producen ondas estacionarias.
- Las ondas presentan propiedades tales como la reflexión, refracción, difracción e interferencia.

Fórmulas

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} t$$

Ecuación horaria del MOA

$$V = \lambda \cdot f$$

Velocidad de una onda

$$y = A \cdot \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

Ecuación de ondas

$$\Delta D = n \cdot \lambda$$

Interferencia constructiva
donde n es un número entero.

$$\Delta D = \frac{p}{2} \lambda$$

Interferencia destructiva
donde p es un número impar.

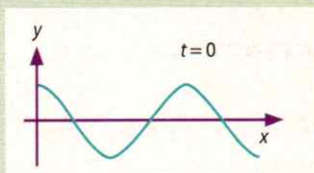
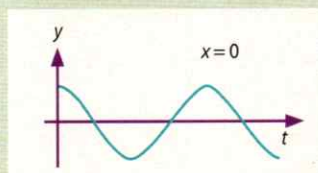
ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. El modelo ondulatorio permite explicar cómo se mueven las partículas del medio perturbado y cómo se propaga la perturbación. Propongan ejemplos que se describan a partir del modelo ondulatorio.

2. Cuando una persona habla por teléfono con otra, ¿cómo se transmite esta información? ¿Qué tipos de ondas intervienen en esta situación? Justifiquen sus respuestas.

3. Mencionen tres ejemplos de movimientos periódicos.

4. Describan las situaciones de los fenómenos ondulatorios que se representan en los siguientes gráficos.



5. Cuando aumenta la frecuencia de una onda sonora, ¿aumenta o disminuye su longitud de onda? ¿Por qué?

6. ¿Cuántas vibraciones por segundo representa una onda de radio de 105.4 MHz?

7. Las frecuencias de ondas que transmiten dos estaciones de radio AM son de 630 kHz y 790 kHz, ¿cuál de las dos señales tiene mayor longitud de onda? Justifiquen sus respuestas.

8. ¿Las ondas de radio son ondas sonoras? ¿Por qué?

9. ¿Cuáles son las ondas de radio que se difractan con más facilidad en torno a los edificios? ¿Las AM o las FM? ¿Por qué?

10. ¿Por qué el fenómeno de difracción en torno a los edificios no se produce con las ondas luminosas? Justifiquen sus respuestas.

11. ¿Es posible que una onda sonora se superponga con otra onda sonora y el resultado de este fenómeno sea el silencio? ¿Por qué?

12. ¿A qué se deben los puntos "claros" y "oscuros" cuando se produce una interferencia de ondas?

13. A través de una puerta abierta se oye hablar a una persona que no se visualiza. Expliquen este hecho en términos físicos.

14. Investiguen algunas aplicaciones cotidianas de las radiaciones electromagnéticas, como por ejemplo: rayos gamma, rayos X, ultravioletas, infrarrojos, microondas, ondas de radio.

15. Una emisora de FM transmite con una frecuencia de 93.4 MHz.

a. ¿Cuál es la velocidad con que se propaga esta señal?

b. ¿Cuál es su longitud de onda?

c. ¿Cuál es el período de las oscilaciones que produce esta onda?

16. Una onda tiene un período de 0,2 segundo y una longitud de onda de 40 cm. ¿Cuál es su velocidad de propagación?

17. Calculen las frecuencias de luz monocromática roja y verde que tienen longitudes de onda de 700 nanómetros (nm) y 500 nanómetros respectivamente.

18. En una cuerda que tiene una longitud de 2 m se produce una onda estacionaria entre extremos fijos. Se cuentan 3 nodos en el interior.

a. ¿Cuál es la longitud de onda de la vibración?

b. Si el pulso viaja en la cuerda a 4 m/s, ¿cuál es la frecuencia de la oscilación?

19. Una onda armónica se propaga en una soga en el sentido positivo del eje x. Sabiendo que su amplitud es 10 cm, su frecuencia 40 Hz y su velocidad 10 m/s, escriban la ecuación de esta onda.

20. Una onda transversal se propaga por una cuerda según la siguiente ecuación: $y = 0,4 \text{ m} \cos [\pi (100 \text{ s}^{-1} t - 2,5 \text{ m}^{-1} x)]$. Calculen:

a. la longitud de la onda;

b. la frecuencia;

c. la velocidad de propagación.

21. La ecuación de una onda transversal que se propaga a lo largo de una cuerda viene dada por la expresión:

$y = 25 \text{ cm} \cos [\pi (0,80 \text{ s}^{-1} t - 1,25 \text{ cm}^{-1} x)]$, donde x e y se expresan en cm y t en segundos. Determinen la amplitud y el período de oscilación que puede tener un punto cualquiera de la cuerda.

22. Dibujen dos ondas transversales:

a. de la misma amplitud, pero una de doble longitud de onda que la otra;

b. de la misma longitud de onda, pero con las amplitudes en relación $A_1 = 2A_2$.

23. Las ondas circulares en la superficie del agua ¿son longitudinales, transversales, o de ninguno de estos dos tipos o clasificaciones? Expliquen su respuesta.

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

24. Busquen información en diarios, revistas o Internet sobre el fenómeno del tsunami ocurrido el 26 de diciembre del 2004 en el sudeste de Asia. Sinteticen las ideas principales y señalen los conceptos relacionados con el tema de ondas presentado en este capítulo.

25. Presenten los trabajos realizados sobre el punto anterior en grupos de compañeros y discutan este fenómeno natural.

26. Una persona enciende un televisor por medio del control remoto.

- ¿Cómo llega al televisor la orden de encendido?
- ¿Qué tipo de ondas recibe la persona en el momento en que se enciende el televisor?
- De las ondas emitidas por el televisor, ¿cuál llega primero a la persona?

27. En un resorte se transmite una onda longitudinal con una velocidad de 1 m/s.

- ¿Qué se desplaza a esa velocidad?
- ¿Qué diferencias habría en la respuesta de la pregunta anterior si la onda fuese transversal?

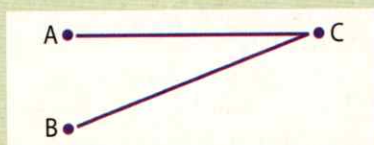
28. Las radios AM transmiten en frecuencias que van aproximadamente de los 530 a los 1600 KHz ($1 \text{ KHz} = 10^3 \text{ Hz}$). En cambio las emisoras de FM emiten entre los 88 y los 108 Mhz ($1 \text{ Mhz} = 10^6 \text{ Hz}$). ¿Cuál de ambos sistemas de emisión lo hace con mayores longitudes de onda?

29. Si solo se conoce el gráfico de $y = f(t)$ de una onda para uno de sus puntos, ¿cuáles de los valores que se requieren para escribir su ecuación se pueden obtener?

30. Si solo se conoce el gráfico de $y = f(x)$ de una onda en un determinado instante, ¿cuáles de los valores que se requieren para escribir su ecuación se pueden obtener?

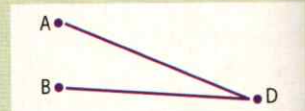
31. ¿Por qué para observar un fenómeno de interferencia se requiere que las ondas sean coherentes?

32. Desde los puntos A y B de una cuba de ondas se emiten ondas de 4 cm de longitud de onda.



- Determinen si en el punto C ubicado a 56 cm de A y a 60 cm de B se produce interferencia constructiva o destructiva.
- Ubiquen otros dos puntos en los que se produzca la misma interferencia.

33. Desde los puntos A y B de una cuba de ondas se emiten ondas de 4 cm de longitud de onda.



- Determinen si en el punto D ubicado a 80 cm de A y a 78 cm de B se produce interferencia constructiva o destructiva.
- Ubiquen otros dos puntos en los que se produzca la misma interferencia.

34. Un haz de luz de $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ de frecuencia pasa del aire, donde su velocidad es prácticamente igual que en el vacío, a un vidrio donde la velocidad de propagación es $2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Calculen las longitudes de onda en cada uno de los medios.

35. Un haz de luz que se propaga en el vacío tiene una longitud de onda de $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

- Determinen su frecuencia y su período.
- ¿Qué oscila con esa frecuencia?

36. ¿Cuáles de los siguientes movimientos son periódicos?

- Una calesita.
- Un ascensor.
- La hélice de una licuadora.
- Un auto de Fórmula 1 en carrera.

37. La ecuación de un MOA es $y = 0,25 \text{ m} \cdot \sin \frac{\pi}{6} t$. Determinen:

- su período;
- su elongación cuando han transcurrido 12 segundos.

38. Una onda de 120 Hz de frecuencia y 8 cm de amplitud se propaga en un medio con una velocidad de 60 m/s.

- Escriban una ecuación que describa esta onda, calculando previamente los valores necesarios.
- Calculen la perturbación de un punto ubicado a 20 metros del origen de coordenadas cuando han transcurrido 0,325 segundos.

39. Calculen la amplitud de una onda de 30 cm de longitud de onda y 6 segundos de período, si la elongación de un punto de coordenada $x = 10 \text{ cm}$ al segundo de haber comenzado a contarse el tiempo es de 50 cm.

40. La velocidad de propagación de una onda en una cuerda de 10 m de longitud es de 30 m/s. Calculen las posibles longitudes de onda y las frecuencias de las ondas estacionarias que se pueden producir en ella.

41. El tubo de un órgano está abierto en un extremo y cerrado en el otro. ¿Cuáles son las longitudes de onda de la onda estacionaria fundamental y de las primeras dos armónicas si su largo es de 2 m?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- | | | |
|----|--|-----------------------|
| 1 | Una perturbación se propaga a través de ondas que transportan materia y energía. | ☐ |
| 2 | La velocidad de propagación de una onda en una soga no depende del tipo de material de la soga. | ☐ |
| 3 | Las ondas mecánicas pueden ser longitudinales o transversales. | ☐ |
| 4 | Las ondas electromagnéticas se propagan solo en medios materiales. | ☐ |
| 5 | El sonido es una onda longitudinal que se propaga en un medio material. | ☐ |
| 6 | Los movimientos oscilatorios armónicos pueden describirse por funciones simples, como las funciones trigonométricas seno y coseno. | ☐ |
| 7 | Si dos ondas se encuentran en un punto en el cual coinciden sus máximas amplitudes, la amplitud de la onda resultante es la diferencia de las amplitudes de cada onda. | ☐ |
| 8 | Las ondas estacionarias se producen por el fenómeno de superposición de ondas. | ☐ |
| 9 | Solo las ondas luminosas pueden refractarse al atravesar una superficie de separación entre dos medios de propagación. | ☐ |
| 10 | El fenómeno de difracción es más pronunciado cuando la onda llega a una abertura de grandes dimensiones comparada con la longitud de onda incidente. | ☐ |
| 11 | Dos ondas que se propagan en un mismo medio, pero en sentido contrario, producen una interferencia destructiva. | ☐ |
| 12 | Cada vez que una onda atraviesa la superficie de separación entre dos medios, se producen los fenómenos de refracción y reflexión. | ☐ |
| 13 | Si una onda se refracta, su velocidad de propagación no varía. | ☐ |
| 14 | La luz es una onda electromagnética que se propaga en el vacío a 300 000 km/s. | ☐ |
| 15 | La teoría corpuscular de Newton quedó descartada definitivamente frente a la teoría de Huygens. | ☐ |
| 16 | La luz se comporta como corpúsculo o como onda. | ☐ |
| 17 | En las comunicaciones satelitales de radiodifusión se utilizan ondas sonoras. | ☐ |
| 18 | Las emisiones de televisión utilizan ondas de radio de VHF y UHF. | ☐ |
| 19 | La telefonía celular aprovecha muchas señales o frecuencias de comunicación al mismo tiempo. | ☐ |
| 20 | Las ondas que intervienen en una comunicación satelital son, por ejemplo, las ondas de radio cortas, como las microondas. | ☐ |

Cuando mi voz calle con la muerte, mi corazón te seguirá hablando.

Rabindranath Tagore

Habla para que yo te conozca.

Sócrates

CONTENIDOS

- Propagación, producción y percepción del sonido
- Aplicaciones de los ultrasonidos
- Las ondas sonoras
- Intensidad del sonido y sonoridad
- Características del sonido
- Reflexión y refracción del sonido
- Resonancia
- Efecto Doppler
- La audición y el oído humano
- Contaminación sonora

13 ONDAS SONORAS

Este es el sonar utilizado por The National Geographic en la búsqueda del barco A. R. A. General Belgrano.



El sonido es una de las formas de comunicación más importantes para los seres humanos y para otros seres vivos, como los animales, que pueden entenderse a través de los sonidos que emiten, y obtener información del medio que habitan por los sonidos que perciben.

El rápido avance tecnológico en el campo de las comunicaciones entre personas, que incluye no solo ondas mecánicas como las del sonido sino también ondas electromagnéticas, permite mejorar las formas de acceso a información de distintas índoles. A modo de ejemplo, se puede citar la evolución en las comunicaciones aprovechando los avances de la informática, que utiliza las redes de computación para la integración de sonidos e imágenes. También todos los sistemas de grabación y reproducción que almacenan señales sonoras como música, videos con imágenes, o películas.

En otros campos, las ondas sonoras se aplican para la detección de objetos. En la pesca se utiliza un aparato llamado **sonar** que permite detectar bancos de peces, u objetos perdidos en el fondo de mares, océanos, u otros cuerpos de agua de gran profundidad.

En medicina, los **ecógrafos** permiten el diagnóstico de las características y situación de distintas partes del cuerpo humano a través de la emisión y reflexión de ondas sonoras.

En otro orden, la relación del sonido con la música es uno de los campos más explorados por el ser humano y tiene miles de años de historia, ya que la actividad musical es anterior a la invención de la escritura.

Para la comprensión de muchos fenómenos sonoros, como algunos de los que aquí se mencionan, es necesario estudiar las propiedades físicas del sonido y sus aplicaciones, temas que serán tratados en este capítulo.



Auditorio Nacional de Música. Andalucía, España.

Desde la Antigüedad, la Física y la música han estado estrechamente unidas. Homero, el poeta griego del siglo VIII a.C, ya hace referencia en sus obras a las condiciones físicas de producción de sonidos, sobre todo en la descripción de las escenas de combate o naufragio.

Las investigaciones de los pensadores de la escuela pitagórica (fundada por Pitágoras alrededor del año 530 a.C) en la rama de la Física conocida como **Acústica**, se refieren a dos temas diferentes: la teoría de la naturaleza del sonido y la teoría matemática de la escala musical.

Aristóteles (384-322 a.C) por su parte, describe el sonido como un aliento con impulso.

En los siglos XVI, XVII y XVIII, junto con el desarrollo de la Mecánica, la Acústica se separa del arte musical para convertirse en una ciencia que estudia los fenómenos sonoros.

En este contexto, uno de los problemas fundamentales en las investigaciones teóricas sobre la emisión de sonidos, es el tema de las vibraciones de las cuerdas.

Galileo (1564-1642) en 1638 enuncia la noción de frecuencia de las vibraciones de una cuerda y demuestra que ésta depende de una serie de factores, tales como la longitud, la tensión y la masa de la cuerda. Newton (1642-1727) en 1687 considera que las vibraciones de las cuerdas provocan directamente el sonido y se lo imagina como choques que se propagan de partícula en partícula uniformemente y en todas direcciones.

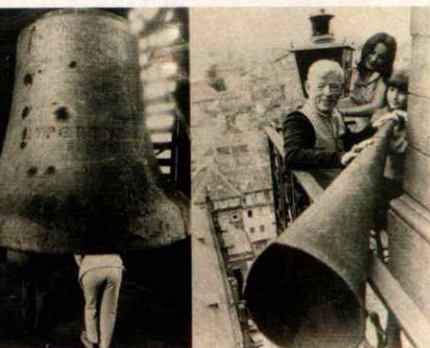
Los estudios sobre la luz realizados durante el siglo XVII comienzan a vincular el sonido con una forma de propagación (el movimiento ondulatorio) similar a la de la luz.

Una serie de experimentos durante los siglos XVII y XVIII confirman que el sonido se propaga a mayor velocidad en un líquido que en el aire, y que no lo hace en el vacío.

Los estudios teóricos y prácticos del siglo XIX parten de la concepción del sonido como una vibración que se propaga en un medio material, y llegan a investigar los fenómenos de reflexión y refracción del sonido. También se avanza en las explicaciones sobre los fenómenos de interferencia y resonancia, y en 1842 se descubre el efecto Doppler acústico.



La lira es un instrumento de cuerdas cuyo origen se desconoce pero que se utiliza desde la Antigüedad. Las notas se producen por la vibración de las cuerdas.



El sonido de una campana se produce por las vibraciones de este objeto. La campana más grande en funcionamiento se encuentra en Cologne, Nordrhein-Westfalen, Alemania.



El violín, un instrumento de cuerda. No es posible establecer con exactitud si es de origen europeo u oriental. En el siglo XVII el violín (*violino*) se encontraba bastante difundido en Italia aunque carecía de todo prestigio. El compositor Claudio Monteverdi fue uno de los que apreció sus posibilidades sonoras, y lo usó para complementar las voces corales en su ópera *Orfeo* (1607). Desde entonces se le dio creciente importancia.

La trompeta es un instrumento de viento que puede producir sonidos estridentes pero también suaves dependiendo de las vibraciones que sufre el aire mientras se propaga en el interior de los tubos metálicos. El instrumento tiene más de 3500 años de antigüedad: en el interior de la tumba del faraón egipcio Tutankamón se encontraron trompetas de bronce y de plata.

Producción, propagación y percepción del sonido

Para comprender la naturaleza del sonido, es necesario describir y analizar cómo se produce, cómo se propaga y cómo se percibe.

Todos los sonidos se producen por las vibraciones de algún objeto o medio material. Si se golpea, por ejemplo, una olla, una campana, una puerta, etc., se produce un sonido que perdura hasta que el objeto deja de vibrar.

En otros casos, el sonido se produce por la vibración de una columna de aire contenida en un tubo, como en un silbato.

Los instrumentos musicales de viento, trompetas, flautas y similares, también emiten sonidos debido a la vibración de una columna de aire. Se diferencian entre sí por el tamaño, la forma que adopta la columna o tubo de aire y el modo como se generan las vibraciones.

Algunos de ellos, como el clarinete, tienen una lengüeta o lámina fina. La corriente de aire que se produce cuando la persona sopla, hace vibrar la lengüeta, y ésta a su vez, hace vibrar la columna de aire en el instrumento.

En los instrumentos de cuerda como la guitarra o el violín, el sonido se produce por la vibración de las cuerdas.

Para la producción de sonidos es necesario que exista una fuente que vibre, como la campana, una columna de aire, una cuerda, etc., pero además, es imprescindible que la vibración se propague en algún medio material.

El sonido puede propagarse en los sólidos, líquidos y gases aunque no lo hace con la misma velocidad, ya que ésta varía según las características físicas y las propiedades del medio. Mientras que en el acero la velocidad es de 5900 m/s, en el agua a 20 °C es de 1500 m/s.

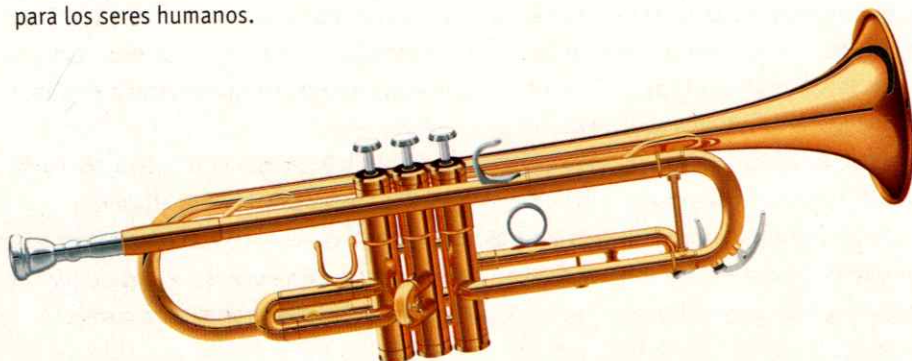
La temperatura del medio también influye en la velocidad de propagación. Por ejemplo: la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20 °C es de 343 m/s, mientras que si la temperatura es de 0 °C su valor desciende a 331 m/s.

Puede ocurrir que exista una fuente que produzca vibraciones que se propagan en un medio, pero que no pueden ser percibidas por el oído humano. Entonces para hablar de sonidos también debe considerarse su percepción.

El **rango de audición** para el oído humano está comprendido entre frecuencias de 20 Hz a 20 000 Hz, límites mínimo y máximo respectivamente de percepción del sonido. Se trata de valores promedio, ya que varían de persona a persona.

La mayor sensibilidad está comprendida normalmente entre las frecuencias de 1000 Hz a 5000 Hz. Algunas personas ancianas son menos sensibles a frecuencias superiores a 1000 Hz.

Aquellos procesos sonoros inferiores a los 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los superiores a 20 000 Hz se llaman **ultrasonidos**. Normalmente estas frecuencias no pueden ser percibidas por las personas, por lo cual no se consideran fenómenos sonoros para los seres humanos.



Aplicaciones de los ultrasonidos

En el campo de la medicina, los ultrasonidos son muy utilizados en distintas especialidades para explorar y obtener información sobre algunas partes del cuerpo humano. Por ejemplo, en obstetricia, la **ecografía** o **ultrasonografía** es un método diagnóstico que emplea ondas sonoras de alta frecuencia (ultrasonidos) para obtener imágenes de los órganos internos de un feto al captar el eco o reflejo de estas ondas.

Esta exploración no utiliza radiación electromagnética como los rayos X, que son más invasivos y riesgosos. La ecografía obstétrica puede confirmar un embarazo, estimar el tiempo de gestación, diagnosticar malformaciones congénitas, valorar la posición del feto, determinar si un embarazo es múltiple, etc.

Un ecógrafo está formado por un sistema de transductores o dispositivos que transforman señales eléctricas en ultrasonidos, y luego, cuando reciben el eco, transforman el ultrasonido en pulsos eléctricos. Cuando se coloca el transductor sobre la piel de la persona, se producen ultrasonidos que se propagan en la pelvis y el interior del abdomen. Al llegar al feto y a los tejidos que lo rodean, como los del útero o la placenta, las ondas se reflejan y el eco es captado por el transductor, que al traducir estas señales sonoras en eléctricas permite obtener en tiempo real la imagen de un feto en un monitor. Esto significa que es posible captar las características físicas y el movimiento del feto en el mismo tiempo en que se está efectuando el estudio médico. Estas imágenes se pueden grabar en un video y también imprimir en una placa o papel.

Los actuales ecógrafos permiten obtener imágenes 3D (tridimensionales) en movimiento, también en tiempo real.

Otras especialistas médicas como urólogos, gastroenterólogos, nefrólogos utilizan ecógrafos que funcionan con ultrasonidos para determinar posibles anomalías en las características físicas y funcionamiento de los órganos.

El nefrólogo, especialista en riñones, utiliza un nefroscopio que permite no solo visualizar los riñones de un paciente, sino también, en algunos casos, eliminar cálculos renales.

En los últimos años se produjo un sorprendente incremento de las técnicas de ultrasonido aplicadas al control de calidad de los alimentos. En ellas se aplica el principio que señala que las propiedades del medio a través del cual se propaga una onda sonora afectan su velocidad de propagación.

Por ejemplo, si en la leche, que se presupone esterilizada, hay un crecimiento de los microorganismos, el receptor de ultrasonidos detectará una variación en la velocidad normal de propagación de la onda. De esta forma no es necesario abrir los envases para descubrir una contaminación microbiana.

También se han desarrollado métodos para el control de las carnes y quesos por medio de ultrasonidos, que permiten evaluar la composición y la textura de estos alimentos.

En el ámbito de la industria se utilizan técnicas por ultrasonidos de alto rendimiento para oclusión de piezas metálicas, y para remachado y soldadura de algunos objetos de plástico poroso producidos en serie como lapiceras, bolígrafos, o focos traseros de automóviles.



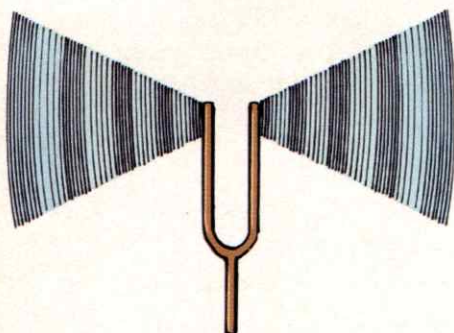
Las ecografías obstétricas permiten controlar el estado de un embarazo.

Esta es la imagen tridimensional de un bebé en gestación obtenida por un ecógrafo.



Imágenes de un bebé en gestación captada por un ecógrafo.

Las ondas sonoras



Un diapasón que vibra produce ondas sonoras.

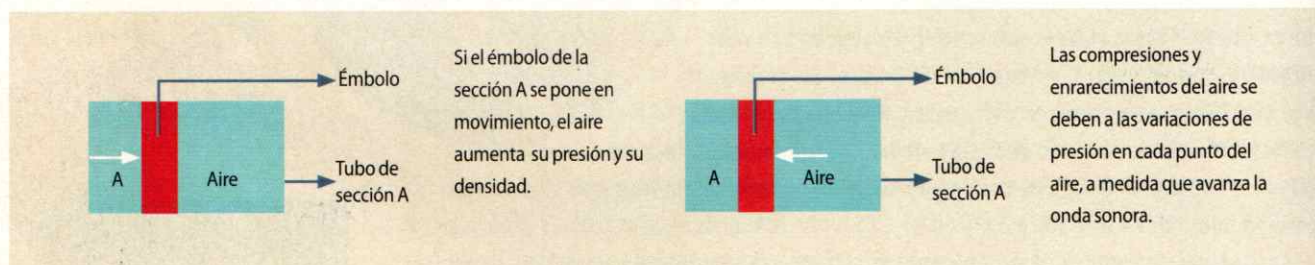
Las **ondas sonoras** son ondas longitudinales que se propagan en un medio material y se originan en las vibraciones que provoca una fuente emisora.

Para ejemplificar la propagación del sonido en un medio fluido como el aire, se puede analizar la siguiente experiencia: se coloca una regla de metal sobre una mesa, se sujeta un extremo mientras se levanta el extremo libre y luego se lo suelta. Las vibraciones que se producen llegan a las partículas sucesivas de aire en la dirección de propagación de la onda. Si el extremo libre de la regla oscila con movimiento armónico simple, se propagan en el aire un conjunto de ondas longitudinales periódicas que se alejan de la fuente.

De igual modo un diapasón (horquilla de metal que se utiliza para afinar instrumentos musicales) al vibrar produce ondas armónicas longitudinales, ya que las partículas del aire vibran en la misma dirección en que se propaga la onda.

También es posible describir este fenómeno considerando las variaciones de presión que se producen en cada punto del aire alcanzado por la onda de sonido.

Se puede suponer que cada pequeño volumen de aire alcanzado por la onda es como un tubo de sección A con un émbolo o dispositivo móvil, que contiene una determinada cantidad de aire. Si el pistón del émbolo se encuentra en reposo, el aire del tubo está en equilibrio, lo cual implica que la presión y densidad se mantienen constantes.

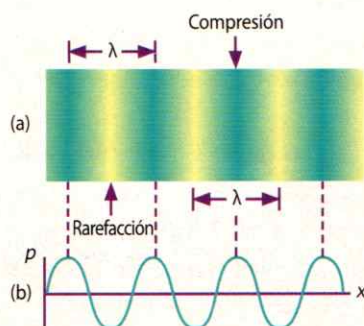


Si el pistón se mueve, las vibraciones de la capa de aire más cercana se moverán en la misma dirección en que se propaga la perturbación. Esta capa de aire ejerce presión sobre las capas vecinas y se forma una región de **compresión** donde los valores de presión y densidad del aire son mayores que los que corresponden a la situación de equilibrio.

El movimiento de regreso del pistón, se forma una zona de **enrarecimiento** del aire donde la presión y la densidad alcanzan valores más bajos que los de la situación en equilibrio.

El movimiento oscilatorio del pistón produce una serie de compresiones y enrarecimientos del aire que se propagan a lo largo del tubo. De esa manera se propaga una onda sonora en el aire: en cada punto se producen pequeñas variaciones de presión.

Es posible representar gráficamente la presión p de cada punto del aire en función del desplazamiento x . La distancia entre dos compresiones o enrarecimientos sucesivos determina la longitud de onda.



El gráfico (a) muestra las compresiones y enrarecimientos de una onda sonora en el aire en un determinado tiempo.

El gráfico (b) muestra la variación sinusoidal de la presión p en función del desplazamiento x .

Intensidad del sonido y sonoridad

La **intensidad** de una onda sonora es una medida de la energía que se propaga por unidad de tiempo y por unidad de área.

Si una fuente emisora, por ejemplo un parlante, vibra, se genera una onda que avanza en todas las direcciones con una velocidad característica para el medio, transfiriendo energía en una superficie esférica.

Si el parlante tiene una potencia (rapidez con que se emite energía) de 1000 watt, emite más energía por segundo que otro de 500 watt, y además, a medida que la onda esférica se propaga, la energía se distribuye en áreas esféricas cada vez mayores.

Se define entonces la **intensidad sonora** como la potencia transferida por una onda sonora a través de una superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Matemáticamente:

$$I = \frac{P}{S}$$

donde P es la potencia, S la superficie perpendicular a la dirección de propagación, e I la intensidad sonora.

La intensidad sonora se mide en W/m^2 , es decir, watt sobre metro cuadrado.

La menor intensidad de sonido que puede percibir el oído humano es del orden de $10^{-12} W/m^2$; a este valor se lo denomina **umbral de la audición**.

La intensidad de sonido máxima llamada **umbral de dolor** es de $1 W/m^2$. Este valor representa el máximo tolerado por el oído humano, y es un billón de veces mayor que el valor mínimo audible. Si se supera este valor máximo la sensación se vuelve dolorosa y con riesgo de daños físicos u otros tipos de trastornos en la salud.

No todas las personas tienen la misma sensibilidad frente a los sonidos, pero es indudable que este intervalo de intensidades detectadas por el oído humano es muy amplio. Debido a esto se adopta una escala logarítmica para analizar y comparar las intensidades de distintos sonidos. La unidad de esta escala es el **decibel** (dB) en homenaje a Alexander Graham Bell (1847-1922), científico e inventor inglés a quien se le atribuye la invención del teléfono. El valor $10^{-12} W/m^2$ corresponde a 0 dB; las restantes escalas son factores de diez, con lo cual un sonido diez veces más intenso que el umbral de la audición, tiene una intensidad de 10 decibeles (corresponde al valor $10^{-11} W/m^2$). Un sonido de 20 dB corresponde a un sonido 100 veces más intenso que el umbral de la audición.

La **intensidad relativa**, β , de un sonido en decibeles se expresa de la siguiente forma:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12} W/m^2}$$

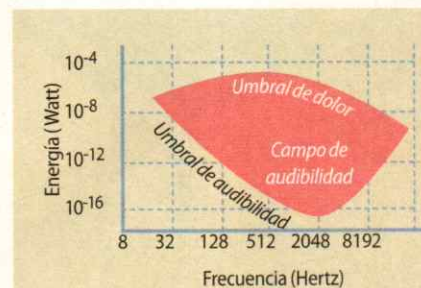
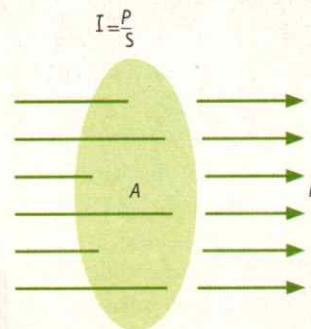
donde I es la intensidad del sonido e I_0 representa al umbral de la audición.

Se denomina **sonoridad** a la sensación de intensidad del sonido (no a la intensidad misma) relacionada con las características fisiológicas del sistema auditivo de cada persona y además con la frecuencia del sonido.

Tabla del nivel de sonoridad de algunos fenómenos

Nivel de sonido	Umbral de audibilidad	Susurro	Conversación	Tráfico urbano	Concierto de rock	Reactor a 10 m de distancia
dB	0	30	60	90	120	150

La **intensidad sonora** es una medida de la potencia con que la onda atraviesa una unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación.

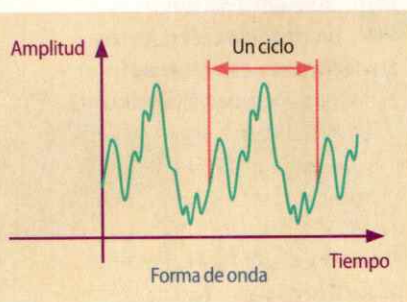


Esquema gráfico del campo de audibilidad del oído humano.

1. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 70 dB respecto de otro de 40 dB?



Características del sonido



Representación de la onda sonora emitida por un piano. Este gráfico indica los valores de presión o amplitud que toma el aire en cada punto, representados en el eje vertical, en función del tiempo, representado en el eje horizontal.

Para distinguir un sonido de otro es necesario conocer sus características, que son la intensidad, la altura y el timbre.

Cuando se habla de sonidos fuertes como el de un avión al despegar y débiles como el murmullo de voces, se hace referencia a la intensidad de los sonidos, que como ya se ha dicho, está relacionada con la sonoridad.

Cuando la propagación se produce en el aire, la intensidad del sonido depende de las diferencias de presiones máximas y mínimas que puede alcanzar el medio en cada punto considerado. Si se representa gráficamente la propagación de la onda sonora en el aire, la intensidad está asociada a la amplitud de la onda. Los sonidos más intensos o fuertes tienen mayor amplitud de onda que los sonidos menos intensos o débiles.

La altura o tono de un sonido determina si es grave o agudo. Se relaciona con la frecuencia de la onda: los sonidos agudos corresponden a mayores frecuencias que los sonidos graves.

Por ejemplo, el sonido más grave de una guitarra corresponde a una frecuencia de 82,4 Hz, y el sonido más agudo, a 698,5 Hz.

Una cuerda de violín produce un sonido más agudo que la cuerda en la misma posición de una viola.

En música se designa el tono por las notas, por ejemplo, una nota fundamental o estándar es el LA que tiene una frecuencia de 440 Hz, es decir que al tocar la tecla correspondiente de un piano se producen en la cuerda 440 oscilaciones por segundo.

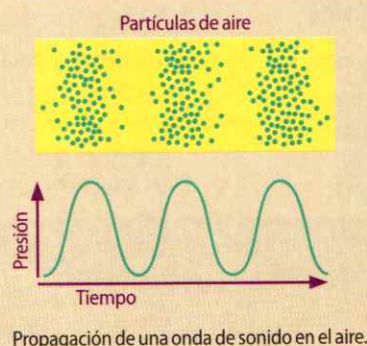
Las notas musicales se obtienen variando las frecuencias de las fuentes sonoras que vibran en el instrumento musical, lo que se logra modificando el tamaño, la tensión o la masa del cuerpo que al oscilar emite el sonido. Cuando los guitarristas o violinistas afinan su instrumento lo hacen ajustando las clavijas, ya que de este modo varían las tensiones de las cuerdas.

En los instrumentos de viento, el largo de la columna de aire que vibra se puede modificar como en el caso de la trompeta. En otros instrumentos, como la flauta, el clarinete o el saxofón, se puede variar la altura o tono de las notas que se ejecutan abriendo y cerrando agujeros que forman parte de estos instrumentos.

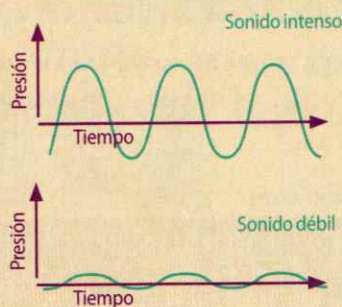
Aunque el oído humano puede detectar frecuencias entre los 20 Hz y 20 000 Hz, las frecuencias de las notas musicales llegan solamente a los 4500 Hz, como el caso del piano, cuyo rango de frecuencias (32 Hz a 3950 Hz) cubre el rango de todos los otros instrumentos.

Teniendo en cuenta que el oído humano puede diferenciar sonidos con 1 Hz de diferencia, se podrían tener unas 4000 notas en la escala musical, aunque solo hay 88 en un piano.

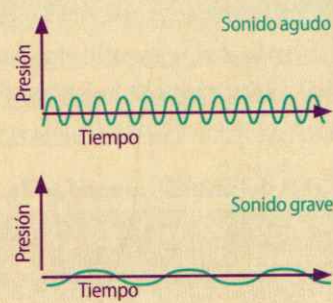
La voz humana está comprendida entre frecuencias del orden de los 80 Hz, la más grave, de bajo, y 1200 Hz, la más aguda, de soprano.



Propagación de una onda de sonido en el aire.



Intensidad del sonido.



Tono del sonido.

Timbre de un sonido

El timbre es la cualidad del sonido que permite distinguir qué instrumento lo está emitiendo, aun cuando tenga igual tono e intensidad que otro. Una nota emitida por un violín, por ejemplo, suena diferente de la misma nota emitida por una guitarra.

Debido a esta cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta una característica de cada individuo. Las oscilaciones que se producen en las cuerdas vocales por el pasaje del aire que llega de los pulmones y pasa por la laringe hacia la boca, permiten la emisión de la voz humana. La lengua, el paladar, la boca y los labios, la nariz y la garganta son verdaderas cajas de resonancia que producen un efecto de amplificación de los sonidos emitidos y caracterizan el timbre de voz propio en cada ser humano.

El **timbre** está relacionado con la complejidad de las ondas sonoras que llegan al oído. Pocas veces las ondas sonoras corresponden a sonidos puros, como el caso del diapasón que emite un sonido de una única frecuencia.

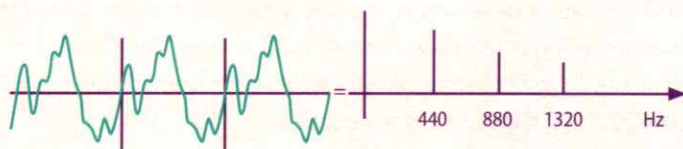
Los instrumentos musicales, por el contrario, emiten sonidos que resultan de vibraciones complejas. Según se ha visto en el capítulo anterior, el Teorema de Fourier permite analizar una onda compleja como la suma de ondas armónicas simples de una frecuencia y amplitud determinadas, cada una de las cuales, en forma separada, corresponde a un sonido puro.

La frecuencia que más se percibe se denomina **frecuencia fundamental** que es la más baja que emite el instrumento. A esta onda se le suman otras denominadas **armónicas** o **sobretonos**, cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental, pero de amplitudes (volumen) muy inferiores. Por ejemplo, la primera armónica tiene una frecuencia igual al doble de la fundamental. Cuando un sonido tiene el doble de frecuencia que el otro, se dice que está una octava por encima, o que es una octava más agudo.

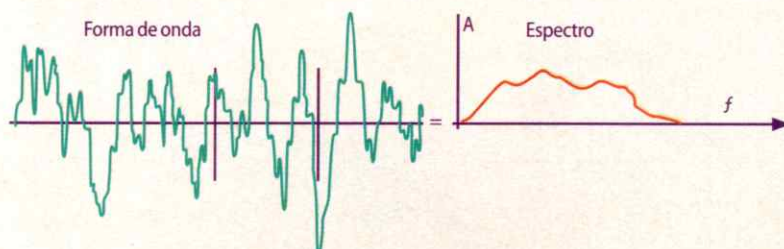
En un piano se disponen grupos de siete teclas blancas y cinco teclas negras. Cada octava tecla cierra un grupo y abre otro. Por esta razón la distancia musical entre esas teclas se llama **octava**. La frecuencia de cada tecla de la octava que sigue es el doble de la tecla de la octava anterior y la frecuencia de la misma nota que corresponde a la octava anterior, es la mitad.

También se pueden analizar las frecuencias armónicas de un sonido mediante un gráfico del espectro sonoro emitido por el instrumento, como se muestra en la siguiente figura.

En el eje de las abscisas se representan los valores de la frecuencia y en el eje de las ordenadas, la amplitud de la onda. Para un sonido armónico como el de una guitarra o un piano, el gráfico que se obtiene es una sucesión de barras.



Los ruidos no tienen frecuencias definidas, de modo que el espectro ya no se muestra como un conjunto de barras aisladas sino como una curva que representa la suma de infinitas sinusoides de todas las frecuencias.

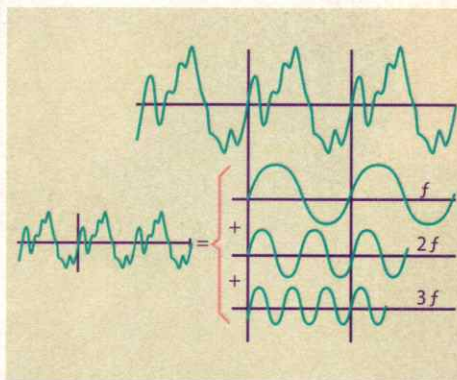


Alrededor del año 1695 un italiano llamado

Bartolomeo Cristofori construyó un instrumento muy similar al piano que hoy conocemos.

Las primeras composiciones específicas para piano aparecieron en 1732. Son las famosas 12 sonatas para piano de **Giustini**.

Juan Sebastián Bach tomó contacto por primera vez con un piano hacia el año 1750.



Frecuencia fundamental y armónicas de una onda sonora de un piano, donde f es frecuencia fundamental o primera armónica, $2f$ es la segunda armónica (frecuencia doble de la fundamental), $3f$ es la tercera armónica (frecuencia triple de la fundamental).

Reflexión y refracción del sonido

Cuando una onda se encuentra con un obstáculo o con una superficie de separación de otro medio, se **refleja** en forma parcial o total.

Si la superficie reflectora no tiene rugosidades de dimensiones parecidas a la longitud de onda, la onda incide sobre ella y regresa al medio del cual proviene, con una dirección de propagación que forma un ángulo igual al ángulo de incidencia.

El **eco** es un fenómeno que se explica por la reflexión del sonido. El oído humano puede captar sonidos distintos si estos le llegan separados entre sí por lo menos por un intervalo de 0,1 segundo, en caso contrario, los sonidos se superponen y no se diferencian unos de otros. Por este motivo y dado que el sonido viaja en el aire a una velocidad de aproximadamente 340 m/s, para que una persona que se encuentra en una habitación cerrada con paredes reflectantes oiga su voz, este sonido debe viajar ida y vuelta en un intervalo de por lo menos 0,1 segundo. Con lo cual, el sonido debe llegar a la pared en por lo menos 0,05 segundo. Como la velocidad del sonido se considera constante, la distancia a la que debe encontrarse la persona de la pared es:

$$x = v \cdot \Delta t = 340 \text{ m/s} \cdot 0,05 \text{ s} = 17 \text{ m}$$

O sea, la persona debe ubicarse a 17 m u índulo arpochofa. escuchar su voz reflejada.

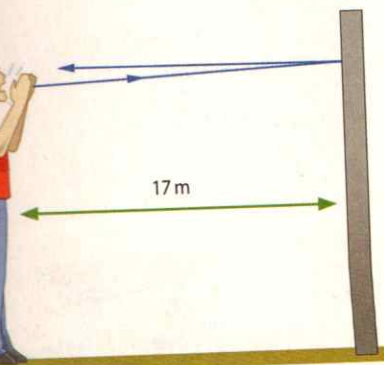
La reflexión del sonido es aprovechada en la navegación para localizar objetos perdidos en el fondo del mar, en la pesca comercial para encontrar grandes bancos de peces, y en operaciones militares para determinar la posición de los submarinos.

En 1912 se hundió el enorme trasatlántico *Titanic* con casi todos sus pasajeros. La causa de esta catástrofe fue el choque con un iceberg. A partir de este hecho, se intentó emplear el eco para evitar casos semejantes y descubrir estos obstáculos de hielo durante la noche y en los días de niebla. Este procedimiento fracasó, pero impulsó otra idea muy acertada: la de medir la profundidad de los mares valiéndose de la reflexión del sonido en el fondo.

Los sonares modernos utilizan ultrasonidos de muy alta frecuencia, imperceptibles para el oído humano, en el orden de varios millones de oscilaciones por segundo.

El eco es también utilizado por distintas especies animales para localizar presas y obstáculos. Por ejemplo, los murciélagos, que son los únicos mamíferos que pueden volar, utilizan una especie de sonar natural. Emiten sonidos de alta frecuencia (ultrasonidos del orden de los 80 kHz) por la boca y la nariz, que les permiten no solo volar en plena oscuridad o en lugares de luz muy tenue, sino también dirigirse hacia insectos, que son sus presas.

Los delfines emiten sonidos cuya frecuencia oscila entre menos de 2000 Hz y más de 100 000 Hz para obtener información sobre el ambiente, localizar a sus presas e informar su propia localización. Son sonidos audibles como una serie de golpecitos, que pueden presentarse separados o como una sucesión de sonidos unidos entre sí. Las emisiones de los golpecitos nacen dentro de la cabeza del delfín, probablemente en la protuberancia que tiene en la frente, y se reflejan en la sustancia grasa de los costados de la cabeza y la mandíbula inferior; se producen incluso mientras el animal está bajo el agua.



La voz puede reflejarse al llegar a una pared. En ciertas condiciones se produce el eco de la propia voz.



Los murciélagos emiten sonidos inaudibles muy agudos (ultrasonidos entre 40 000 y 80 000 Hz), y reciben ecos que les aportan información de su medio.



Los delfines utilizan un sonar natural para orientarse.

*tiempo : la Superposición de todos los sonidos que se reflejan en algo
reverberación se juntan y luego se pierden*

Además de la reflexión del sonido, puede producirse, al mismo tiempo, la **absorción** parcial de la onda sonora por el obstáculo, según las propiedades del material y las características del objeto.

En algunos espacios cerrados, el sonido puede reflejarse sucesivamente en las paredes en las que es parcialmente absorbido y en otros objetos, lo que hace que su intensidad disminuya hasta hacerse inaudible.

Se llama **tiempo de reverberación** al intervalo necesario para que un sonido se haga un millón de veces menos intenso por absorción.

El tiempo de reverberación depende de las dimensiones de los espacios y de los objetos que se encuentran en él, y disminuye al aumentar la absorción sonora de las superficies del recinto. Por lo tanto, recubriendo las paredes, el piso y/o el cielorraso con materiales absorbentes, es posible reducir el tiempo de reverberación.

En general los materiales comunes de construcción (hormigón o concreto, mampostería, mosaicos, cerámicos) suelen ser poco absorbentes, por lo cual si no son tratados implican tiempos de reverberación demasiado largos.

En cambio, los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, la espuma de poliuretano, las alfombras gruesas, las cortinas pesadas y con muchos pliegues, y los plafones o baldosas de fibra vegetal, en general aumentan la absorción sonora.

En un recinto con superficies poco absorbentes, las ondas sonoras se reflejan, volviendo la energía sonora al ambiente. Esta energía reflejada se suma a la nueva energía que está emitiendo la fuente, y, por consiguiente, aumenta el nivel de ruido.

En el diseño de un auditorio, sala de conferencias o de conciertos, recintos de grabaciones de música, etc., se intenta buscar un equilibrio entre los fenómenos de reverberación y absorción para mantener la armonía sonora.

Cuando la onda sonora atraviesa distintos medios de diferentes propiedades, sufre un cambio en la velocidad de propagación. Este fenómeno se denomina **refracción** del sonido.

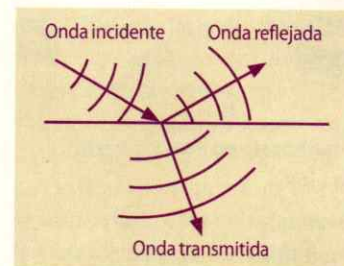
La propagación del sonido en el aire sufre refracciones debido a que la temperatura del aire no es uniforme.

Como la velocidad del sonido aumenta con la temperatura, en un día caluroso es mayor en las capas de aire bajas o más próximas a la superficie de la Tierra que en las más alejadas.

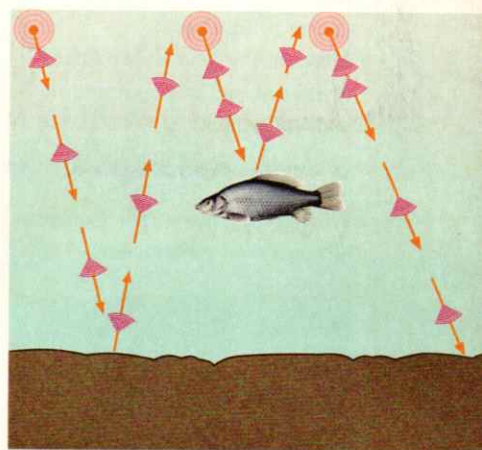
Como consecuencia de la refracción, el sonido se desvía hacia arriba. En esta situación, la comunicación entre dos personas lo suficientemente separadas se dificulta.

El fenómeno contrario ocurre en un día frío o por las noches, cuando las capas de aire cercanas a la superficie terrestre se encuentran a menor temperatura que las capas de aire más alejadas. Las ondas sonoras se desvían hacia el suelo y esto permite que el sonido se pueda escuchar a mayores distancias y con más nitidez.

La refracción del sonido en el agua es muy importante para los barcos que emiten ultrasonidos. Como la temperatura del agua tampoco es uniforme, la refracción del sonido deja como huecos, y es allí donde se ubican los submarinos, por ejemplo, para no ser detectados por los barcos enemigos en época de guerra.



Cuando una onda sonora llega a un obstáculo, parte se refleja, parte es absorbida por el objeto, y parte se refracta.



Ondas sonoras emitidas, reflejadas y refractadas en el agua.

Reverberación y absorción del sonido en un recinto cerrado, por ejemplo, un auditorio.





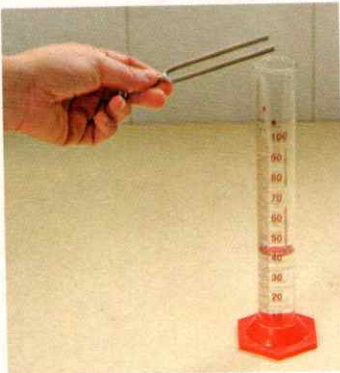
Resonancia en una columna de aire

Materiales

Una probeta. Un diapasón. Agua.

Procedimiento

1. Coloquen un poco de agua en la probeta.
2. Hagan vibrar el diapasón dándole un golpe y ubíquelo en la boca abierta de la probeta.
3. Varíen la longitud de la columna de aire de la probeta, agregando o quitando agua.
4. Repitan el procedimiento 2 y observen si notan algún cambio.
5. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.



Resonancia con diapasones

Materiales

Dos diapasones iguales. Dos cajas de madera con soportes para diapasones.

Procedimiento

1. Coloquen los diapasones sobre las cajas de madera con una boca abierta, a modo de caja de resonancia.
2. Ubiquen los diapasones uno cerca del otro.
3. Hagan vibrar uno de ellos, por ejemplo, con un golpe fuerte.
4. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.

Resonancia

Cuando los objetos o sistemas materiales vibran, lo hacen con una frecuencia natural que depende de algunas características de dichos sistemas, tales como la elasticidad del material, la distribución de su masa y la forma en que se produce la perturbación que los hace vibrar.

Por ejemplo, el sonido de un golpe en un vaso de vidrio es diferente del emitido por uno de metal, porque al ser de distintos materiales, vibran con distintas frecuencias. Si un sistema, en este caso un vaso de vidrio, se somete reiteradamente a una fuerza externa y la frecuencia de las vibraciones que se producen coincide con la frecuencia de vibración natural del sistema, se genera un importante aumento de la amplitud de las vibraciones.

A este fenómeno se lo llama **resonancia**. Se presenta siempre que se apliquen impulsos sucesivos a un objeto que vibra en concordancia con la frecuencia natural de vibración del objeto.

Por ejemplo, con impulsos pequeños aplicados al ritmo de frecuencia natural de una hamaca, se puede lograr que la hamaca se mueva con gran amplitud. Para mantener o aumentar las oscilaciones de la hamaca se tienen que dar las siguientes condiciones:

- la perturbación tiene que ser periódica, con una frecuencia igual a la frecuencia natural del sistema;

- el sentido de la perturbación tiene que estar en fase con la oscilación, es decir, que debe coincidir con el sentido del movimiento;

- si la perturbación es muy intensa y el rozamiento es despreciable o existe poco rozamiento, el aumento de la amplitud de las oscilaciones puede provocar roturas en el sistema.

Por ejemplo, en el puente de Tacoma Narrows, en el estado de Washington, Estados Unidos, en el año 1940, comenzó a soplar un viento que produjo la resonancia del puente. Este importante aumento de la amplitud de su vibración provocó su destrucción.

También los mecanismos o sistemas resonantes de los instrumentos musicales pueden variar. En los instrumentos de viento (flautas, quenas, etc.) la columna de aire tiene una frecuencia de vibración natural que puede modificarse si se tapan o destapan los orificios del instrumento. En los instrumentos de cuerda (guitarra, violín, etc.) la forma de la caja, su masa, y el material utilizado en su construcción producen fenómenos de resonancia para determinadas frecuencias que les dan el sonido característico.

No solo las oscilaciones mecánicas pueden producir resonancia; también las oscilaciones eléctricas y magnéticas provocan efectos similares. Por ejemplo, al sintonizar una emisora de radio girando la perilla del sintonizador u oprimiendo las teclas, se produce un cambio en el circuito eléctrico que altera su frecuencia natural. Este es un ejemplo de resonancia electromagnética. Los principios de este fenómeno se utilizan también en algunas técnicas de diagnóstico médico, como las resonancias electromagnéticas. Esta técnica se basa en el envío de una señal sonora sobre un objeto imantado, en este caso el cuerpo humano, y la recogida de la señal electromagnética o de retorno al estado de equilibrio, con posterior localización de los órganos o sistemas analizados y formación de la imagen.



Una hamaca puede resonar si se la impulsa con una frecuencia que coincida con su frecuencia natural de oscilación.

El efecto Doppler

El físico austriaco Christian Doppler (1803-1853) explicó los cambios de frecuencia de las ondas debido al movimiento del emisor o receptor, fenómeno que hoy se conoce como **efecto Doppler**.

Si el receptor está detenido y el emisor se mueve, el tono del sonido emitido por la fuente no se percibe igual que cuando el emisor está en reposo.

Por ejemplo, el silbato de un tren al aproximarse se percibe más agudo que el del tren detenido. A medida que el tren se aleja, el tono del sonido que se escucha es más bajo que el normal, es decir el sonido emitido por la fuente en reposo.

Lo mismo ocurre con la sirena de una ambulancia. Por el cambio en la altura del sonido de la sirena, se puede saber si se está alejando o acercando al receptor.

Este fenómeno no se restringe al movimiento del emisor. Si la fuente de sonido está detenida y es el receptor quien se mueve hacia la fuente, también percibirá un aumento en la frecuencia del sonido. En cambio, si se aleja, advertirá un sonido de tono más bajo.

En general, el efecto Doppler explica el cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo entre el emisor y el receptor.

Para explicar este fenómeno se considera la representación gráfica de las ondas periódicas emitidas por una fuente en forma de círculos concéntricos que se mueven en forma radial. La distancia entre los círculos representa la longitud de onda del sonido que se propaga con una determinada velocidad.

Si el emisor S se mueve hacia un observador, A, detenido, las ondas emitidas por S se acercan al receptor A. Como cada onda sucesiva se emite desde un punto más cercano al receptor que la onda anterior, la distancia entre las onda sucesivas, es decir la longitud de onda, es menor que la que corresponde a la onda sonora emitida por la fuente en reposo.

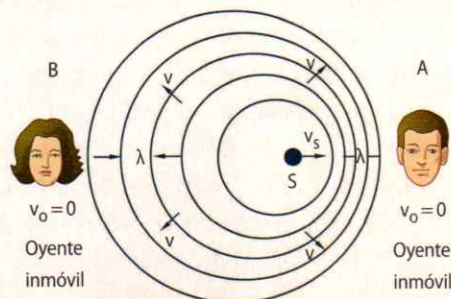
Una disminución de la longitud de onda implica un aumento de la frecuencia, lo que provoca un aumento en el tono del sonido.

Si el emisor S se aleja de otro observador, B, detenido, se produce un aumento de la longitud de las ondas que llegan al receptor, por lo cual B percibe un sonido de menor frecuencia. El cambio de la frecuencia depende de la velocidad relativa entre el emisor y el receptor y se puede calcular mediante la siguiente expresión matemática:

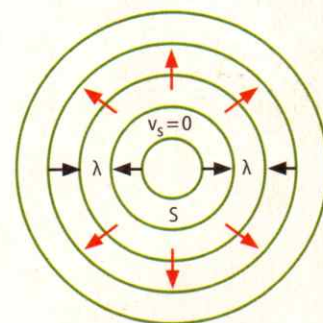
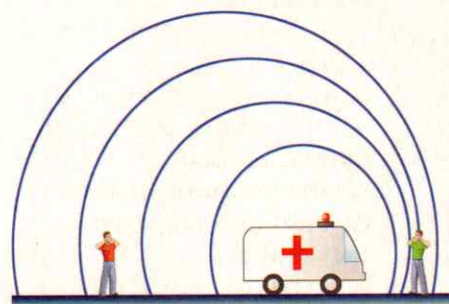
$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f$$

donde f' es la frecuencia medida por el receptor, f es la frecuencia medida por el emisor, v es la velocidad de la onda que depende del medio en el cual se propaga, v_r es la velocidad del receptor y v_e la velocidad del emisor con respecto al medio en el que se propaga el sonido.

Si el emisor se acerca al receptor A en reposo, éste percibirá un tono más alto del sonido emitido, es decir de mayor frecuencia, mientras que el receptor B, también en reposo, percibirá un sonido de menor frecuencia ya que el emisor se aleja de él.



El efecto Doppler se origina cuando hay un movimiento relativo entre la fuente sonora y el receptor. El resultado es la aparente variación de la altura del sonido ya que se produce un cambio de la frecuencia que percibe el receptor comparada con la frecuencia de ondas que origina el emisor.



Esquema de las ondas sonoras emitidas por una fuente fija.

Aplicaciones del efecto Doppler

1. Si la frecuencia del sonido emitido por la bocina de un automóvil descompuesto detenido en una autopista es 500 Hz, ¿cuál es la frecuencia que percibe un auto de auxilio que se aproxima al automóvil a una velocidad de 90 km/h?

La velocidad del sonido en el aire es $v = 340$ m/s. Como el receptor se mueve hacia la fuente emisora, se puede considerar el signo positivo (+) para v y negativo (-) para v_r , ya que el auxilio se mueve en sentido opuesto al sonido de la bocina. Dado que el auto va a una velocidad de 90 km/h, el valor de v_r es 25 m/s. Además, la velocidad del emisor, v_e , es cero porque el auto está detenido. Luego:

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f = \frac{340 \text{ m/s} - (-25 \text{ m/s})}{340 \text{ m/s}} \cdot 500 \text{ Hz} = 537 \text{ Hz}$$

El auxilio percibe una frecuencia de aproximadamente 537 Hz.

2. Una ambulancia viaja por una calle con una velocidad de 40 m/s y su sirena emite un sonido de 400 Hz. ¿Qué frecuencia de esta sirena mediría un conductor que viajase a 20 m/s en sentido contrario, alejándose de la ambulancia?

Si se considera como positivo el sentido de la propagación del sonido desde la ambulancia hacia el otro conductor, la velocidad v_r de su vehículo se considera también positiva (+). En cambio, la velocidad de la ambulancia, v_e , que se desplaza en sentido opuesto, se considera negativa.

Con lo cual:

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f = \frac{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - (-40 \text{ m/s})} \cdot 400 \text{ Hz} = 337 \text{ Hz}$$

Por lo tanto el conductor del auto mide una frecuencia aproximada de 337 Hz.



No es conveniente que los soldados marchen todos juntos cuando cruzan un puente ya que sus pasos acompasados pueden provocar la resonancia del puente.



El fenómeno de resonancia

El fenómeno de la resonancia se puede comprobar con algunas actividades experimentales sencillas.

Objetivo

Comprobar la resonancia en sólidos.

Resonancia mecánica con péndulos

Materiales

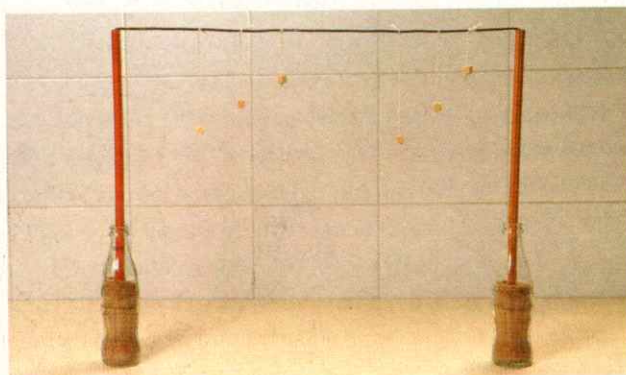
Seis péndulos. Dos hilos de 10 cm cada uno. Dos hilos de 15 cm cada uno. Dos hilos de 20 cm cada uno. Un soporte construido con dos varillas de más de 20 cm de altura sobre un pie como se ve en la figura que soportan entre ellas un hilo.

Procedimiento

1. Coloquen un hilo en cada péndulo.
2. Aten un hilo de cada medida al hilo del soporte, como se indica en la figura a una distancia de 6 cm.
3. Tomen un péndulo entre los

dedos y háganlo oscilar.

4. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.
5. Repitan lo anterior para los péndulos de las otras dos longitudes.



La audición y el oído humano

La percepción del sonido en los seres humanos es un fenómeno muy complejo en el que se pueden señalar los siguientes procesos:

- captación y procesamiento mecánico de las ondas sonoras;
- conversión de las señales sonoras en impulsos nerviosos;
- transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro;
- procesamiento de la información codificada en forma de impulsos nerviosos.

En el sistema auditivo se pueden diferenciar dos regiones o partes.

La región periférica

En ella los estímulos sonoros conservan su carácter original de ondas mecánicas hasta el momento de su conversión en señales electroquímicas.

La región central

En ella se transforman las señales en sensaciones. En esta región también intervienen procesos cognitivos, mediante los cuales los sonidos tienen sentido según un contexto, es decir, se puede reconocer una palabra, una música o el sonido de un violín o de un piano.

El **oído** o región periférica se divide usualmente en tres zonas, llamadas oído externo, oído medio y oído interno, de acuerdo con su ubicación en el cráneo.

El **oído externo** está formado por el pabellón de la oreja que se encarga de captar las ondas sonoras; éstas se propagan hacia la membrana timpánica o **tímpano**, que constituye la entrada al oído medio.

El **oído medio** está formado por una cavidad llena de aire, en cuyo interior se encuentran tres pequeños huesos, denominados **martillo**, **yunque** y **estribo**, articulados entre sí, y que cumplen la función de amplificar la señal recibida. Uno de los extremos del martillo está unido al tímpano, lo que le permite captar las vibraciones y transmitirlas al yunque y al estribo; éste comunica con la **ventana oval**, orificio que permite la entrada del sonido al oído interno.

En el **oído interno** se encuentra la **cóclea** o **caracol**, un conducto rígido en forma de espiral de unos 35 mm de longitud, lleno de fluidos de distintas composiciones químicas.

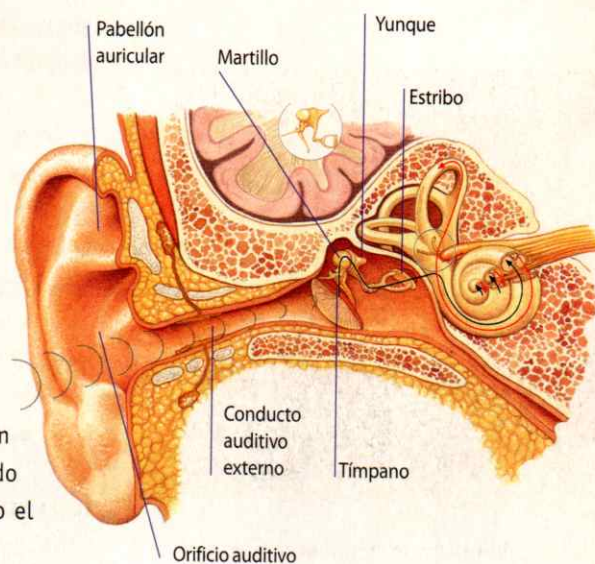
Las vibraciones captadas por la membrana oval son transmitidas a estos fluidos dentro del caracol.

Sobre una membrana ubicada dentro de la cóclea, llamada **membrana basilar**, se encuentra el **órgano de Corti**, que contiene células ciliares internas y externas; cuando son estimuladas al recibir las vibraciones, llevan estos impulsos al cerebro, que decodificará la información.

En el complejo fenómeno de la audición humana se destacan los siguientes procesos.

- Los sonidos llegan a través del conducto auditivo hasta el tímpano.
- Los cambios de presión en la pared externa de la membrana timpánica, asociados a la señal sonora, provocan la vibración del tímpano.
- Las vibraciones del tímpano se transmiten a lo largo de una cadena de pequeños huesos.
- Estos huesos se encuentran en contacto con los fluidos contenidos en el oído interno; por lo tanto, el tímpano y la cadena de pequeños huesos actúan como un mecanismo para transformar las vibraciones del aire en vibraciones de los fluidos.
- El movimiento del líquido provoca, a su vez, las vibraciones de una membrana elástica que hace que sus células ciliares se compriman contra las partes rígidas del caracol.
- Los estímulos de las células ciliares son transmitidos hasta el cerebro por las fibras nerviosas.

Estructura del oído humano.

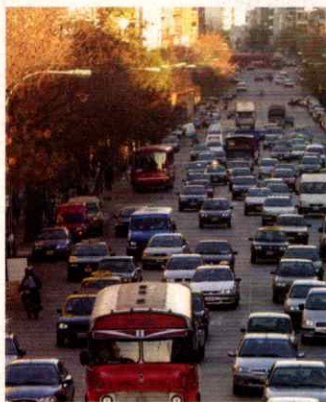


La contaminación sonora

La contaminación sonora es una característica de las sociedades industrializadas y los grandes núcleos urbanos, que se suma a otros agentes de contaminación atmosférica como el smog, el humo, las partículas en suspensión de polvo y de materiales tóxicos como el plomo, los gases, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, radiaciones, microbios, entre otros.

En las últimas décadas se produjo un aumento importante de los ruidos ambientales debido al crecimiento de la densidad de población, al uso de maquinarias muy ruidosas como martillos neumáticos o palas mecánicas, sirenas, incremento de la cantidad de automóviles y otros vehículos como motocicletas, ómnibus, camiones, aviones, trenes, etc.

Los adolescentes y personas jóvenes están expuestos a elevados niveles de ruido debido al uso de aparatos para escuchar música, como el walkman, el discman o mp3, o a los ruidos de los lugares bailables, de diversión, etcétera.



En una calle céntrica de una ciudad ruidosa, la intensidad del sonido puede superar los 75 dB.



Los martillos neumáticos pueden superar los 130 dB.



En los salones de baile y en los recitales de música como el rock, se pueden superar los 120 dB.

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) el nivel máximo tolerable por el oído humano es de 70 dB, si bien estos valores son subjetivos y dependen de la sensibilidad de percepción de cada persona. Sin embargo, se ha comprobado que las exposiciones prolongadas a niveles superiores a este valor máximo tolerable pueden producir trastornos en la salud, como cefaleas (dolores de cabeza), disminución de

la percepción auditiva, alteraciones en los ritmos cardíacos y respiratorios, problemas digestivos, daños en el sistema nervioso, dificultades en la capacidad de concentración, cambios del comportamiento, conductas agresivas, trastornos en el sueño, estrés, etc.

Si los ruidos superan los 120 dB pueden causar dolor en los oídos, y si la intensidad sonora es mayor que 140 dB, puede provocar desorientación en el espacio y hasta sordera permanente; más allá de los 160 dB el tímpano puede estallar.

Es necesario tomar conciencia de estos factores y niveles de contaminación sonora y adoptar medidas que tiendan a mejorar este problema de las sociedades modernas y sus grandes ciudades.

Algunas de estas acciones para tener en cuenta son las siguientes.

- El uso de protectores del oído, como audífonos, en las profesiones o empleos que exponen a niveles altos de ruido.

- La instalación de pantallas o sistemas de protección entre el foco de ruido y los oyentes, por ejemplo pantallas antiruido en las autopistas.

- Colocación de revestimientos aislantes o absorbentes del sonido en los lugares ruidosos, las máquinas u otras fuentes de sonido intenso.

- Reducción de la circulación de vehículos en zonas residenciales.

- Realización de campañas de educación ambiental para la real toma de conciencia de este problema.

2. Luego de esta lectura respondan.

a. ¿Qué otras medidas se pueden adoptar para disminuir el ruido en una ciudad, en una casa, o en una escuela?

b. ¿Cómo se puede promover una campaña de difusión de este problema?

c. Busquen artículos en diarios y revistas que traten este tema. Señalen y analicen las ideas principales.

Escalas musicales, músicos y físicos

LOS MÚSICOS SUPIERON DESDE SIEMPRE QUE HAY CIERTOS SONIDOS QUE RESULTAN AGRADABLES AL OÍDO Y OTROS QUE NO.

Los pitagóricos, en la antigua Grecia, descubrieron que los sonidos agradables se daban cuando las cuerdas de la lira tenían entre sí largos cuya relación era un cociente entre números enteros y no muy grandes, por ejemplo el cociente entre el largo de dos cuerdas que sonaran armoniosamente podía ser $\frac{9}{8}$. Sobre la base de conocimientos musicales por un lado y propuestas matemáticas que hoy se pueden interpretar como relaciones entre frecuencias, se diagramó una escala musical con las 7 notas que hoy se utilizan, dividida en 12 semitonos: es decir las frecuencias entre una nota, por ejemplo el LA de 440 Hz y el siguiente LA de 880 Hz se dividió en 12 intervalos parecidos, aunque no iguales, que corresponden a las 7 notas con sus sostenidos o bemoles. Esta escala tenía sus problemas. Como los intervalos entre las notas no eran iguales, al transponer una pieza musical para que sea más aguda o más grave debido a que tenía que ser interpretada por otro instrumento, su musicalidad se desajustaba.



Foto de Einstein en 1924 tocando el violín

Se propuso entonces una escala con todos sus intervalos iguales. A esta escala artificialmente construida se le llama **escala bien temperada**. Para calcular la frecuencia que corresponde a cada una de las 12 partes iguales, llamadas semitonos, en que se divide el intervalo de una octava, por ejemplo entre dos LA, se multiplica la frecuencia del semitono anterior por $\sqrt[12]{2} \approx 1,0586$. Así, para obtener la frecuencia del LA sostenido se hace:
 $f_{la} = 440 \text{ Hz} \cdot 1,058 = 466 \text{ Hz}$
 Para el SI:
 $f_{si} = 440 \text{ Hz} \cdot (1,058)^2 = 493 \text{ Hz}$
 y después de 12 pasos, uno por cada semitono:

$$f_{LA} = (\sqrt[12]{2})^{12} \cdot 440 \text{ Hz} = 880 \text{ Hz}.$$

La vinculación entre la física y la música no se ha dado solo desde la fundamentación acústica. Muchos físicos han estado vinculados con la música. Vincenzo Galilei, padre de Galileo era músico y fue uno de los promotores de la escala bien temperada. Einstein conservó hasta el final de su vida un vivo amor por la música.

Acostumbraba tocar el violín para sí mismo como un arma de descanso y relajamiento; lo hacía con talento y musicalidad suficientes como para haberse atrevido a tocar en más de una ocasión en público para coleccionar fondos con fines de beneficencia. Sus compositores predilectos eran Bach y Mozart, así como los italianos Vivaldi, Scarlatti o Corelli. Fuentes: Internet: http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/31/htm/sec_8.htm.

La física de los instrumentos musicales de J. Luzuriaga y R. Pérez. Eudeba, Bs. As., 2006.

La música de hoy está estrechamente relacionada con la física y la tecnología no solo a través de la acústica sino también por el uso de la electrónica.

- Busquen información acerca de la producción de sonido en los instrumentos musicales electrónicos utilizados habitualmente (teclados, bajos, guitarras etc).
- Busquen información acerca de la forma de grabar y reproducir música (CD y mp3).



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Para la producción de sonidos es necesario que exista una fuente que vibre.
- El **sonido** necesita un medio material para propagarse. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio.
- El **rango de audición humana** está comprendido entre frecuencias de 20 Hz a 20 000 Hz. Los procesos sonoros de frecuencias inferiores a los 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los de frecuencias superiores a 20 000 Hz se llaman **ultrasonidos**.
- Las **ondas sonoras** en el aire se explican por las variaciones de presión que se producen en cada punto del aire alcanzado por la onda.
- La **intensidad sonora** se define como la potencia transferida por una onda sonora, a través de una superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.
- La **sonoridad** es la sensación de intensidad del sonido relacionada con las características fisiológicas del sistema auditivo de cada persona y con la frecuencia de las ondas sonoras.
- Las características más importantes que permiten distinguir un sonido de otro son la **intensidad**, el **tono** y el **timbre**.
- El sonido puede reflejarse. El **eco** es un fenómeno que se explica por la reflexión del sonido.
- Un obstáculo puede producir al mismo tiempo la reflexión y la absorción parcial de la onda sonora.
- Cuando una onda sonora atraviesa distintos medios de diferentes propiedades, se **refracta**.
- La **resonancia** se produce cuando a un sistema se le aplica una perturbación periódica cuya frecuencia coincide con la frecuencia de vibración natural de dicho sistema.
- El fenómeno debido a los cambios aparentes de frecuencia de las ondas por el movimiento relativo del emisor con respecto al receptor se denomina **efecto Doppler**.
- Los ruidos son sonidos intensos y desagradables, capaces de producir la llamada **contaminación sonora**.

Fórmulas

$$I = \frac{P}{S} \quad \text{Intensidad sonora}$$

$$\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad \text{Intensidad relativa}$$

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f \quad \text{Variación de frecuencia por efecto Doppler}$$

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. En algunas películas de cowboys se muestra al personaje que coloca su oreja sobre la vía del tren para saber si éste se acerca. Expliquen por qué prefiere escuchar a través de la vía y no a través del aire.
2. Si dos astronautas llegan a la Luna, ¿se pueden comunicar entre sí mediante ondas sonoras?
3. Los gatos pueden percibir sonidos de hasta 70 000 Hz y algunas especies de murciélagos, ultra altas frecuencias de hasta 120 000 Hz. Comparen las longitudes de ondas percibidas por estos dos animales.
4. ¿Un sonido de 30 dB es 30 veces más intenso que el umbral de la audición humana? Justifiquen la respuesta.
5. Si se aumenta la temperatura del aire en un órgano de tubos, ¿qué sucede con las frecuencias resonantes?
6. Un parlante produce un sonido debido a la oscilación de un diafragma. ¿La intensidad del sonido producido depende de la frecuencia, o de la amplitud de la onda sonora?
7. ¿La intensidad sonora es una medida de la sonoridad de una fuente? Expliquen los significados físicos de cada término.
8. Un diapasón aumenta su sonoridad si se coloca sobre una caja de resonancia. ¿Por qué? Expliquen este fenómeno.
9. ¿Es posible que la voz de una persona se oiga mejor que lo habitual cuando canta en la ducha? Justifiquen su respuesta.
10. En noches de muy baja temperatura o luego de alguna nevada intensa, se produce una acentuada sensación de quietud y silencio. ¿A qué se debe este fenómeno?
11. Algunos cantantes de ópera prueban la capacidad sonora de su voz emitiendo sonidos que pueden romper, por ejemplo, una copa de cristal. ¿Cuál es la explicación física de este hecho?
12. ¿El eco de un sonido es más débil, o más intenso que el sonido original?
13. ¿Por qué un superior grita "rompan fila" a los soldados que marchan, antes de cruzar un puente?
14. Un tren está parado en la estación y suena su silbato; luego comienza a moverse alejándose de la estación. ¿Cómo describirían el tono del sonido emitido por el silbato del tren una persona que está parada en el andén de la estación? ¿Por qué?
15. Si la fuente emisora de sonido y el receptor se mueven con la misma velocidad, ¿se produce el efecto Doppler? Justifiquen la respuesta.
16. Si se tiene un tubo abierto y otro cerrado de igual longitud, ¿en cuál de los dos se producen notas más agudas? Expliquen.
17. Si se golpea un extremo de una barra de aluminio de 20 cm de longitud, ¿cuánto tarda el sonido en llegar al otro extremo?
18. La frecuencia de la nota DO central de un teclado es 256 Hz.
 - a. ¿Cuál es el período de una vibración de esta frecuencia?
 - b. ¿Cuál es la longitud de la onda sonora emitida?
19. Un barco pesquero emite un ultrasonido que se propaga en el agua y al cabo de 5 segundos recibe el eco del sonido reflejado en un cardumen. ¿A qué profundidad se encuentra dicho cardumen?
20. ¿Cuáles son los niveles de intensidad relativa, en dB, de dos sonidos cuyas intensidades son $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ e $I = 1 \text{ W/m}^2$?
21. Un sonido tiene una intensidad de 10^{-7} W/m^2 . ¿Cuál es su nivel de intensidad relativa?
22. ¿Cuál es la potencia transferida por una onda sonora cuando atraviesa una ventana de $1,5 \text{ m}^2$ de superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, si su nivel de intensidad es de 70 dB?
23. Un tubo abierto de un órgano tiene 80 cm de longitud. Calculen la frecuencia fundamental y la frecuencia de las dos primeras armónicas emitidas, sabiendo que las ondas sonoras en el tubo se propagan con una velocidad de 340 m/s.
24. Una ambulancia se mueve con una velocidad de 40 m/s emitiendo un sonido con su sirena cuya frecuencia es de 500 Hz. Determinen la frecuencia que percibe una persona en reposo a medida que la ambulancia se acerca y luego se aleja de ella.
25. El nivel del sonido tolerable por el oído humano es 70 dB. Si la intensidad de sonido de un lavarropas es de $I = 10^{-4} \text{ W/m}^2$, ¿es superior o inferior al nivel tolerable?

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

26. ¿Por qué no suena de la misma manera una cuerda de guitarra cuando se pulsa en su punto medio que cuando se pulsa en un extremo?

27. a. ¿Cómo se varía la tensión de las cuerdas de una guitarra?

b. ¿De qué materiales están hechas?

c. ¿Sus masas son iguales, o diferentes?

d. ¿En que aspectos o cualidades del sonido influyen estos factores considerados?

28. ¿Influye la forma de la guitarra en el timbre del sonido producido? ¿Por qué?

29. Busquen datos sobre la forma en que emite sonidos la guitarra eléctrica.

30. Busquen información sobre otros instrumentos musicales que les interese conocer y averigüen las características de los sonidos que producen.

31. Una persona se ubica a 40 metros de una pared y grita. ¿Cuánto tarda en escuchar el eco de su voz?

32. ¿Cuáles son las longitudes de onda más larga y más corta que puede oír una persona?

33. Cuando el sonido se propaga por el aire, se producen oscilaciones en la presión de los puntos alcanzados por la onda. ¿Qué ocurre con los puntos alcanzados por una onda sonora que se propaga en un metal?

34. Cuando un grupo de murciélagos vuelan juntos, ¿mediante qué característica del sonido distingue cada uno de ellos su propio eco?

35. Desde lo alto de una plataforma petrolera que se encuentra a 50 m de altura sobre el mar, se emite una señal de sonar verticalmente hacia abajo y tarda un segundo en registrarse el eco reflejado en el fondo. Si la velocidad del sonido en el agua es 1420 m/s, ¿cuál es la profundidad del mar en esa zona?

36. ¿Qué significa un valor negativo en decibels, por ejemplo -10 dB?

37. Un chico toca un silbato mientras se hamaca. Describan cómo varía la frecuencia del sonido que oye la persona que lo empuja.

38. ¿Varía la distancia mínima a una pared para escuchar el eco, si cambia bastante la temperatura del aire? Justifiquen la respuesta.

39. Para calcular la distancia a la que se encuentra una tormenta, se puede contar el tiempo entre la observación de un relámpago y el momento en que se oye el trueno. ¿A qué distancia se encuentra una tormenta si ese tiempo es de 5 segundos?

40. Una onda sonora de 70 dB de intensidad relativa llega a un tímpano cuya superficie es de $0,55 \text{ cm}^2$. ¿Cuánta energía absorbió el tímpano en 5 minutos?

41. Para obedecer a los requisitos legales, una fábrica diseña sus automóviles de modo que emitan un ruido con un máximo de 80 decibeles que corresponde al límite legal. En una inspección realizada en la calle se determinó que uno de esos vehículos emitía un ruido máximo de 90 decibeles. El fabricante afirma que la diferencia entre la intensidad medida y el límite legal es despreciable. Calculen el aumento de intensidad del ruido y verifiquen la afirmación del fabricante.

42. Existen murciélagos que se alimentan de peces. Para ubicarlos, emiten sus señales de ultrasonido que les permiten ubicar al pez sumergido cerca de la superficie. Describan los distintos procesos que sigue la onda desde que es emitida hasta que es oída nuevamente por el murciélago.

43. Un diapasón produce una onda sonora. ¿La longitud de onda del sonido aumenta, disminuye, o queda igual cuando la onda que se desplaza por el aire llega al agua? Justifiquen la respuesta.

44. En muchas especies animales el sonido es una de las principales fuentes de información para su supervivencia. Expliquen a partir de conceptos acústicos por qué esos animales tienen sus orejas muy desarrolladas.

45. Dos personas que discuten emiten sonidos de 60 decibeles cada una. ¿El nivel del sonido que percibe una tercera persona es de 120 decibeles? Justifiquen la respuesta mediante el cálculo de las intensidades y las intensidades relativas.

46. Una persona grita un gol con un sonido de intensidad relativa de 50 decibeles. Si la intensidad total se puede tomar como la suma de las intensidades de los sonidos emitidos por cada persona, ¿cuántas personas deberán gritar con igual intensidad para producir un nivel de 80 decibeles?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	Las ondas sonoras son longitudinales y pueden propagarse en el vacío.	☐
2	Es posible que exista una fuente que emita ondas sonoras que se propaguen en un medio, pero que no puedan ser percibidas por el oído humano.	☐
3	La intensidad de una onda sonora es una medida de la energía que se propaga por unidad de tiempo y por unidad de área.	☐
4	La intensidad de un sonido en cada punto del aire aumenta si aumenta la frecuencia de la onda emitida.	☐
5	Los sonidos graves se deben al aumento de la velocidad de propagación de la onda sonora.	☐
6	Los sonidos del mismo tono emitidos por dos instrumentos diferentes se pueden distinguir por su timbre.	☐
7	Un incremento de la intensidad relativa de 10 dB corresponde a un aumento de 100 veces la intensidad del sonido.	☐
8	Los sonidos de más de 70 dB no son audibles para las personas.	☐
9	El oído humano puede captar sonidos distintos separados entre sí por un intervalo de 1 s.	☐
10	La reflexión del sonido permite explicar el funcionamiento de los ecógrafos.	☐
11	El sonar de los barcos emite infrasonidos que se reflejan cuando llegan a un obstáculo.	☐
12	La refracción del sonido se produce cuando una onda sonora atraviesa distintos medios.	☐
13	El fenómeno de resonancia se produce cuando un sistema vibra con una amplitud de onda coincidente con la amplitud de onda natural del sistema.	☐
14	Si una fuente sonora está detenida y el receptor se mueve alejándose del emisor, percibirá un aumento en la frecuencia.	☐
15	El efecto Doppler explica el cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo entre el emisor y el receptor.	☐
16	El sistema de la audición humana es muy complejo y cambia en cada persona.	☐
17	El tímpano es una membrana delgada ubicada en el oído interno que vibra al ingresar las ondas sonoras a través del pabellón de la oreja.	☐
18	La contaminación sonora se debe a los ruidos que superan valores de intensidad relativa de 120 dB.	☐
19	Algunos materiales absorbentes pueden evitar la reflexión del sonido y disminuir los efectos del ruido.	☐
20	La exposición prolongada al ruido puede producir daños en la salud.	☐

*En este mundo traidor,
nada es verdad ni es mentira,
todo es según el color
del cristal con que se mira.*

Ramón de Campoamor

CONTENIDOS

- Óptica geométrica:
 modelo del rayo de luz
- Principio del tiempo mínimo
- Reflexión
- Refracción
- Espejos y lentes
- Óptica física
- Interferencia
- Difracción
- Colores

14

LOS FENÓMENOS LUMINOSOS

Existe una confianza muy grande en el valor de verdad de la información obtenida por los ojos. Se dice "ver para creer" dando por seguro que no es posible ser engañados por este sentido. Pero, *¿cuánto hay solo de aparente y cuánto de real en las imágenes percibidas?*

Por otra parte, frecuentemente se asocia a la sabiduría con la iluminación, a la comprensión con ver más claro y a una idea nueva con una lamparita encendida. También, cuando algo sorprende mucho, suele decirse que deslumbra.

Indudablemente, la luz tiene una importancia fundamental en la vida del hombre. El sentido de la vista es el que más influye en la capacidad de interacción con el entorno. No es raro, entonces, que en todas las épocas los fenómenos luminosos hayan atraído la curiosidad del hombre y alentado la formulación de distintas teorías para explicarlos. Algunas de ellas están incluidas en las próximas páginas.

En este capítulo se analizará cuánta información acerca de lo que un objeto es, viene con la luz reflejada por él, y también cómo se forma y adquiere sus características propias la imagen percibida. Se buscarán explicaciones para algunos fenómenos cotidianos y para otros no tan evidentes aunque igualmente accesibles a la observación.

La parte de la física que estudia los fenómenos asociados con la luz se denomina **Óptica**. Se aplica a un sector del espectro electromagnético que abarca las longitudes de onda visibles a los ojos y sus alrededores próximos, es decir las zonas del ultravioleta y del infrarrojo. A pesar de esto, los principios de la Óptica también pueden extenderse a otras regiones del espectro.



Rosetón de la catedral de La Plata.

La luz a veces surge de los cuerpos, que son llamados, por este motivo, fuentes luminosas. Otras veces, los cuerpos aparecen iluminados porque solo reflejan una luz que no es propia. Los cuerpos pueden clasificarse en:

- **transparentes**, si casi toda la luz que incide sobre ellos, denominada luz incidente, los atraviesa;
- **traslúcidos**, si solo los atraviesa una parte de la luz incidente.
- **opacos**, cuando la porción de luz que logra pasar es mínima.

Más adelante se analizará si estas categorías de opaco y transparente pueden ser enunciadas en términos absolutos para un cuerpo, o dependen también del tipo de luz que los ilumina.

Los fenómenos asociados a la luz, tanto sea la propia como la que le llega a un cuerpo e interactúa con él, cuentan en la actualidad con teorías físicas que los explican y permiten el desarrollo de tecnologías aplicadas a los más diversos campos.

Por ejemplo, la luz que llega hasta la Tierra procedente del Sol, de otras estrellas y galaxias puede ser interpretada y es posible conocer, de este modo, algunas de sus características a pesar de que son objetos muy lejanos. Para ello se utilizan técnicas de teledetección basadas en la interpretación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los cuerpos y que son aplicadas a la investigación de muy diversos problemas.

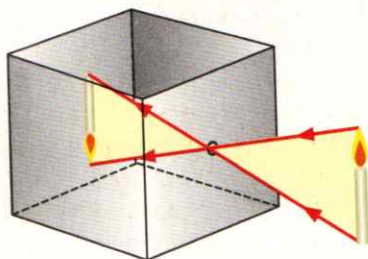
Con cierta limitación, también es posible comprender la interacción de la luz con los organismos vivos, como por ejemplo el complejo proceso de **fotosíntesis** o el comportamiento denominado **fototropismo** por los biólogos.

El grupo de fenómenos que atañen a la luz es muy grande. En este libro se apuntará solo a los modelos interpretativos más básicos que permitan la comprensión de algunos hechos cotidianos y otros que, aunque no lo sean tanto, resultan igualmente importantes por sus implicancias tecnológicas, históricas o sociales.



Los vitraux

Durante el siglo XIII, surgió en Europa un movimiento arquitectónico, aplicado sobre todo a la construcción de catedrales, que algunos llamaron arquitectura radiante. Este movimiento consistía en el reemplazo de los muros por láminas de vidrio de colores. La luz proyectada era interpretada simbólicamente como el reflejo de la luz celestial. Esta manera de desmaterializar las paredes de los templos intentó reproducir lo sobrenatural en dicho espacio de culto.



Cámara oscura

Solo si el agujero es suficientemente pequeño, se produce una imagen nítida del objeto sobre la pantalla. Los rayos que tienen una inclinación adecuada ingresan al interior de la cámara y logran llegar, manteniendo su trayectoria, hasta la pantalla donde se forma la imagen invertida del objeto.

Propiedades de la luz

Para poder leer la información contenida en esta página es necesario que el papel reciba luz desde alguna fuente luminosa, por ejemplo el Sol, o una lámpara, y que se refleje de modo de llegar hasta los ojos de quien lee. La luz debe ser suficientemente intensa y preferentemente blanca. La mejor ubicación para quien lee es justamente delante del texto, aunque es cierto que alguien ubicado hacia un costado también puede ver lo que está escrito, dentro de ciertos límites.

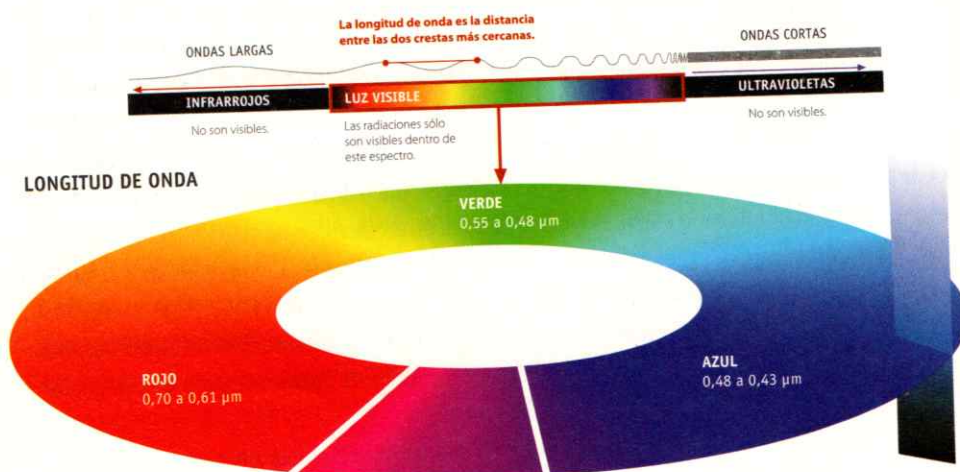
Hay un conocimiento intuitivo de los fenómenos luminosos que permite afirmar que la luz viaja en línea recta hacia la página y luego rebota, siempre en línea recta, para llegar hasta los ojos del lector. Esta intuición se basa en la idea de **rayo luminoso**. Es posible aceptar que un rayo de luz se visualiza cuando, por ejemplo, se observa que éste penetra a través de un pequeño orificio y se dispersa en las pequeñas partículas de polvo en suspensión en el aire.

La consideración de que la luz se propaga en línea recta puede explicar el funcionamiento de la **cámara oscura**. Se trata de la técnica más sencilla para obtener una imagen de un objeto luminoso o iluminado. Fue conocida desde la Antigüedad; las primeras noticias son del siglo III a.C. y recibió el nombre de *camera obscura* en el Renacimiento cuando fue usada habitualmente por pintores.

Una de las propiedades de la luz blanca es que puede descomponerse en los colores del arco iris y que si se reúnen estos colores se puede percibir luz blanca. Para explicar estos hechos es necesario recordar que cada color corresponde a luz de una determinada longitud de onda, que no es reflejada por igual por las distintas superficies.

Por otra parte, cabe destacar que en la percepción de un color están presentes propiedades fisiológicas, referidas a los receptores fotosensibles ubicados en la retina del ojo.

Otra de las propiedades de la luz es el **brillo**. Si bien se trata de una percepción que, como tal, no está ajena a consideraciones biológicas y psicológicas, en Física se relaciona con la densidad superficial de la energía emitida por la fuente por cada unidad de su superficie. Es posible entender entonces por qué un brillo débil, como el de una estrella es difícil de captar, por ejemplo, en una fotografía.



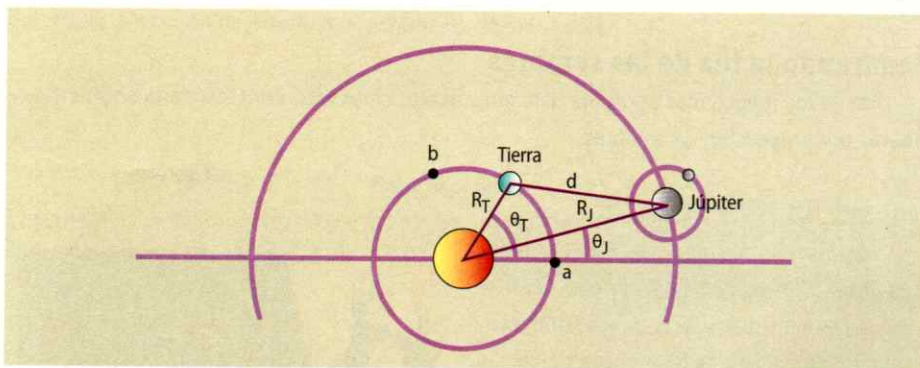
Nuestros ojos son sensibles a una franja muy angosta del espectro electromagnético.

La velocidad de la luz

La luz viaja a velocidades muy altas. De hecho, en algún momento se pensó que su propagación era tan infinitamente rápida que podía considerarse instantánea. Las primeras experiencias para medir esta velocidad fracasaron debido a que los diseños experimentales no resultaban de la precisión requerida por el orden de magnitud de la velocidad de la luz, cuyo valor indicado como c , es $300\,000\,000\text{ m/s} = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ aproximadamente, como todas las ondas electromagnéticas en el vacío.

La primera medición efectiva de la velocidad de la luz la obtuvo Olaf Roemer (1644-1710) a partir de un cálculo que se conoce como **método astronómico**. Se basa en la explicación de un retraso de algunos segundos entre el tiempo esperado y el efectivamente medido del eclipse de uno de los satélites de Júpiter. Roemer interpretó estos resultados como el tiempo que tardaba la luz en recorrer la distancia que separaba las distintas posiciones en su órbita. Obtuvo un valor de $298\,000\text{ km/s}$, muy cercano al aceptado actualmente.

El período entre dos eclipses para una de las lunas de Júpiter es aproximadamente $42,5\text{ h}$. Se obtienen valores mayores cuando las mediciones se efectúan en las posiciones en que la Tierra está más, alejada ya que la luz debe recorrer más distancia.



Al girar la Tierra en su órbita, la distancia d que recorre la luz desde Júpiter es mayor. Teniendo en cuenta ese valor y el retraso en el período de las lunas de Júpiter, Roemer calculó la velocidad de la luz.

Al mejorar los diseños experimentales destinados a la medición de la velocidad de la luz en distintos medios materiales, se probó que su velocidad de propagación en cualquier medio es menor que este valor en el vacío. Por ejemplo, la medición que realizó Jean Foucault (1819-1868) probó que la velocidad en el agua era menor que la que había sido medida en el vacío. Esta comprobación resultó crucial para decidir entre la teoría ondulatoria y la corpuscular, que predecía un resultado distinto derivado de una eventual aceleración de las partículas de luz por la interacción gravitatoria entre sus masas y la de las partículas del material que atravesaba.

En la actualidad, la velocidad de la luz se mide con tanta precisión que puede ser usada como parámetro en otras mediciones indirectas. Por ejemplo, la distancia entre la Tierra y la Luna fue medida en 1969 por los astronautas de la Apolo XI que instalaron en la Luna un retrorreflector, tipo ojo de gato, que reflejaba un pulso láser disparado desde la Tierra, con lo que logró así una precisión menor a 10 cm .



En sus escritos, Galileo representó sus discusiones

con otros pensadores de su época por medio de un diálogo entre tres personajes: Salviati, Sagredo y Simplicio. Simplicio era dogmático y discutía con Salviati que era el encargado de exponer los argumentos de Galileo. Sagredo mediaba entre ambos. En uno de sus diálogos, que figura en el libro *Dos nuevas ciencias* (1638) se expone lo que piensa el autor acerca de la propagación de la luz: "Simplicio: La experiencia cotidiana nos muestra que la propagación de la luz es instantánea; porque cuando vemos que se dispara un cañón a gran distancia, el fogonazo llega a nuestros ojos sin que transcurra ningún tiempo, mientras que el sonido llega a nuestros oídos solo después de un intervalo perceptible.

Sagredo: Bien, Simplicio, lo único que yo puedo inferir de esta experiencia tan común es que el sonido al llegar a nuestros oídos viaja más lentamente que la luz. No me informa si la llegada de la luz es instantánea o si, aun cuando sea sumamente rápida, de todas maneras invierte algún tiempo."

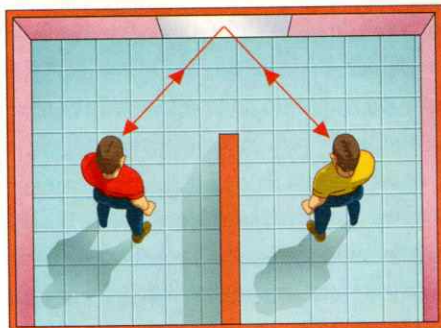


Las teorías de la luz

Durante el siglo XVII, dos importantes físicos propusieron teorías antagónicas para explicar qué es la luz. Isaac Newton proponía que la luz está constituida por un haz de partículas, en tanto que el holandés Cristian Huygens (1629-1695) explicó los fenómenos ópticos a partir de un modelo ondulatorio.

Si se observa a los ojos a una persona mediante un espejo, hay que considerar que también ella podría ver a quien lo mira, en iguales condiciones. El camino óptico es reversible.

Elementos de óptica geométrica



La **óptica geométrica** se basa en el concepto de rayo luminoso, asociado a la idea de la dirección en que se propagan las ondas. Los rayos se trazan perpendiculares a los frentes de onda y apuntando en el sentido de su propagación.

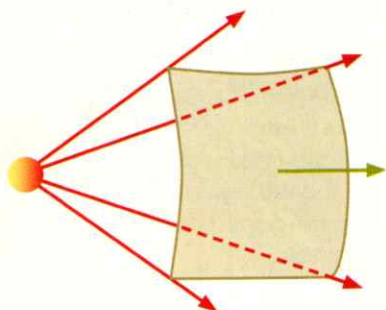
La geometría es la herramienta teórica que permite realizar la representación e interpretación de algunos hechos. Dentro de

ciertos límites, este modelo resulta adecuado para la interpretación sencilla de fenómenos en los cuales la luz puede ser considerada como un conjunto de rayos que viaja por materiales homogéneos y transparentes desde los cuerpos que la emiten o reflejan.

Una característica importante dentro de los límites de validez de este modelo es que el camino que sigue la luz entre dos puntos es el mismo en cualquier sentido que se lo recorra, es decir, a la ida y a la vuelta. A este hecho se lo llama **reversibilidad** del camino óptico.

Separando la luz de las sombras

Uno de los juegos más antiguos llamado *sombras chinescas*, consiste en la obtención de figuras por proyección de sombras.



En el modelo de rayos luminosos, éstos se dibujan perpendiculares a los frentes de onda.

▶ Todo cuerpo que emite radiación luminosa se denomina **fuerza luminosa**. Cuando sus dimensiones son muy chicas frente a las restantes dimensiones del problema considerado, se llama **fuerza puntual**.

Una zona se considera de **sombra** cuando la luz proveniente de una fuerza luminosa u objeto iluminado no llega a ella debido a la intersección por parte de un objeto opaco.

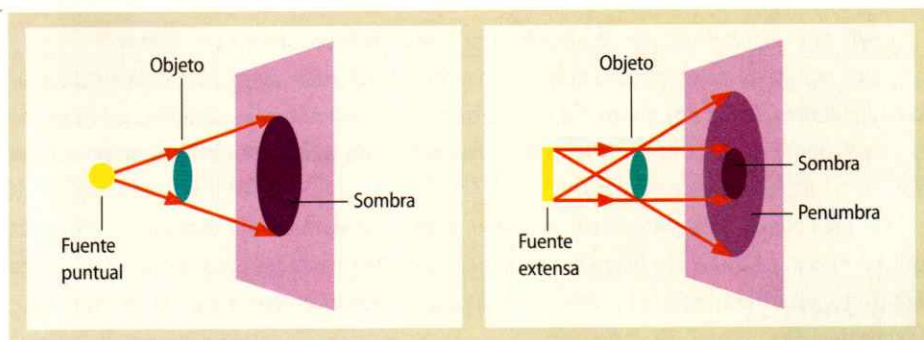
Una zona es de **penumbra** cuando la luz proveniente de una fuerza no puntual u otro objeto es parcialmente interceptada por un objeto opaco.

En ellas, la ilusión que se desea crear se logra interponiendo entre una fuerza de luz y una superficie de proyección, las manos entrelazadas de manera particular. Se ve entonces una zona iluminada rodeando otra oscura, donde no llega luz. Allí es donde se forma una zona que crea la ilusión de lo que se desea representar, al considerarla como su sombra.

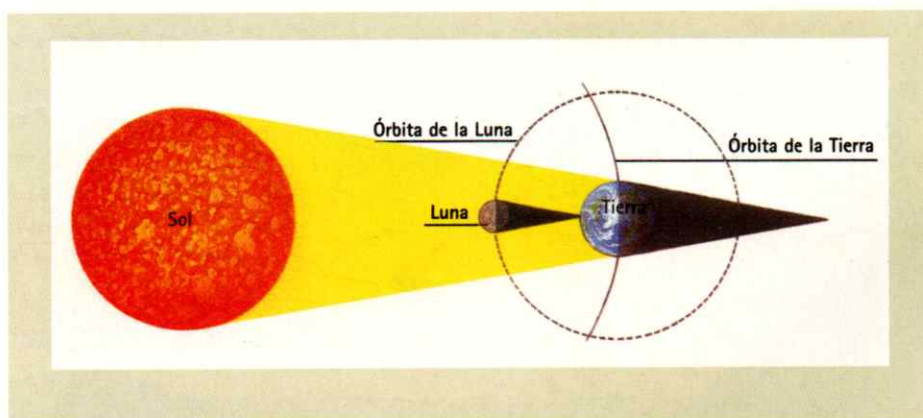


A veces, la zona de sombra está rodeada por otra zona menos oscura, de idéntico contorno, que se llama **penumbra**. Se pueden observar zonas de sombra y penumbra siempre que un objeto opaco se interpone entre una fuerza de luz extensa, es decir no puntual. La clasificación de las fuerzas en puntuales o extensas no depende del tamaño real de la fuerza de luz, sino de su tamaño relativo asociado con la distancia que la separa del objeto que se interpone. Por ejemplo, una estrella, por su lejanía, puede ser considerada una fuerza puntual de luz, a pesar de ser, en general, de tamaño mucho mayor que cualquier objeto, incluido a la Tierra. En cambio, en una habitación oscurecida, es posible observar la sombra y penumbra proyectadas sobre una pared por la luz de una linterna o la proveniente de la llama de una vela, si se coloca una mano delante de cualquiera de ellas.

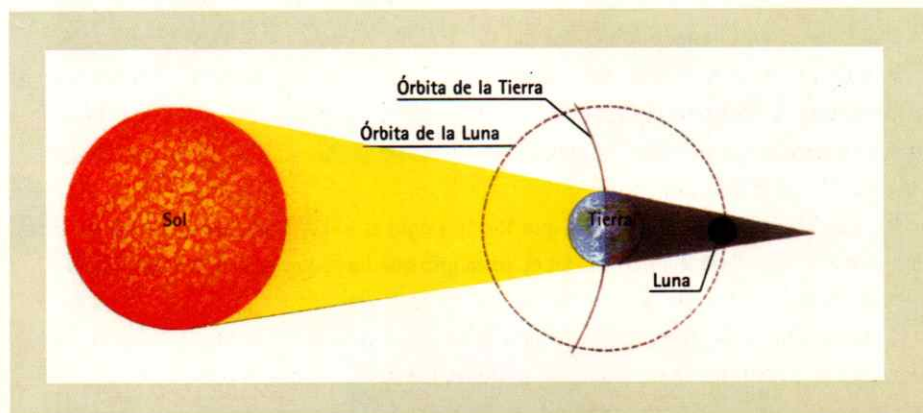
Se puede comprender este fenómeno de manera muy simple a partir del modelo geométrico.



Un ejemplo muy importante de este fenómeno ocurre en los eclipses de Sol, cuando la Luna se interpone entre éste y la Tierra. Debido al gran tamaño del Sol y su relativa cercanía, es una fuente de luz extensa, que permite la proyección de sombra y penumbra. Si la zona de la Tierra desde la cual se observa el eclipse está en la primera región, se podrá experimentar un período de oscuridad en pleno día. Si se está en la zona de penumbra, es notoria la sensación de disminución del brillo de la luz solar.



Por otra parte, a veces la Tierra se interpone entre el Sol y la Luna, proyectando su sombra y penumbra.



Un eclipse de Sol es normalmente visible solamente desde algunas regiones del planeta, en cambio el eclipse de Luna es apreciable para todo observador ubicado en el hemisferio que se encuentre de noche.



La Gioconda de Leonardo da Vinci.

En dibujo, el estudio de las luces y las sombras tiene una gran importancia porque es parte de las claves para dar ilusión de tridimensión a la imagen plana. Leonardo da Vinci (1452- 1519) expone en su *Tratado de pintura* lo siguiente acerca de las dos naturalezas de la luz: "Es separada la luz que ilumina a un objeto e inseparable aquella que participa por esa luz del objeto iluminado. La primera recibe el nombre de primitiva, llamándose a la otra derivada. Del mismo modo, también la sombra posee dos naturalezas distintas, una llamada primitiva y otra derivada. Es primitiva aquella que no puede separarse de los objetos y derivada la que sí se separa de éstos, arrastrando hasta la pared la forma de aquello que es su causa."

Principio de Fermat

Los autores de la antigüedad clásica no resolvieron el dilema emisor-receptor al referirse a la naturaleza de la luz. No estaban de acuerdo sobre si los rayos pasan del objeto al ojo o del ojo al objeto. Demócrito, Aristóteles, Epicúreo y Lucrecio eran partidarios de la primera teoría, mientras que Euclides, Empédocles y Tolomeo lo eran de la segunda. La idea de la emisión de rayos visuales fue indudablemente útil y avanzada para su tiempo, ya que permitió elaborar una teoría acertada de la formación de las imágenes en los espejos.

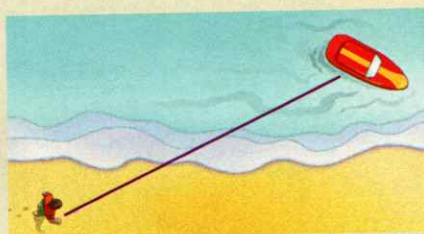
El Principio de Heron dice que: "El rayo, sea o no reflejado, sigue siempre el camino más corto entre el objeto y el ojo".

¿Cuál es la manera más rápida para recorrer la distancia que separa dos puntos?

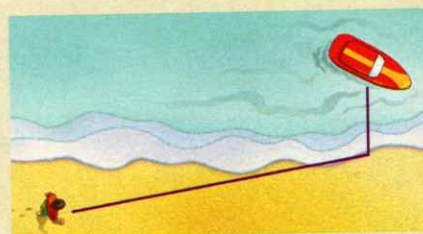
La respuesta es que el camino más rápido es aquél que sigue la luz para ir desde un punto hasta el otro. Si los dos puntos se encuentran en un mismo medio material, este camino es un segmento de recta que une a los puntos. Pero, si los puntos se encuentran en medios distintos, entonces puede no serlo.

Por ejemplo, en una película de suspenso, si el héroe está siendo perseguido e intenta huir corriendo en dirección hacia la playa, donde nadará hasta un bote que lo espera para rescatarlo, intentará seguir el camino más rápido, ya que es el que le dará mayores posibilidades de éxito.

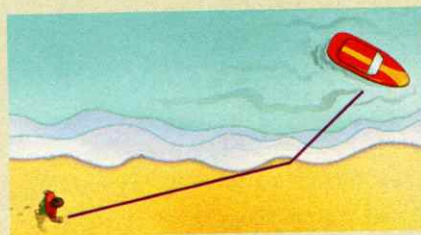
El camino más rápido es, en principio, el que une el punto inicial de su huida y el bote en línea recta.



Sin embargo, como se corre más rápido que lo que se nada, es mejor correr más y nadar menos. La mejor opción, entonces, podría ser aquella en la cual se corra al máximo y se nade lo mínimo indispensable.



Probablemente se note que lo que se corre de más puede significar un aumento de tiempo superior a lo que se ahorró al nadar menos. Por lo tanto, la solución más conveniente podría ser algo intermedio como:



Este razonamiento fue elaborado por Herón (siglo II a. C.) y enunciado con toda precisión por Pierre de Fermat en 1657. En el principio que lleva su nombre se afirma que:

La luz se propaga siempre a lo largo de aquella trayectoria que le suponga el mínimo tiempo, incluso si para lograrlo tuviera que desviarse del camino geoméricamente más corto.

MARTES PAPEL DE CALCAR
14 VELA,
CARTÓN



Formación de imágenes con la cámara oscura

El objetivo de esta actividad es obtener imágenes mediante la técnica sencilla conocida como cámara oscura y aplicar los principios básicos de la óptica geométrica.

Materiales

Una caja de cartón con tapa. Algún elemento punzante. Una tijera o una trincheta. Papel translúcido. Unos pedazos de cartón para cortar tarjetas. Goma o cinta para pegar. Una vela.

Procedimiento

1. Corten ventanas, bastante amplias, en dos caras opuestas de la caja de cartón.
2. Cubran una de las ventanas con el papel translúcido, el cual oficiará de pantalla.
3. Corten unas tarjetas de cartón cuyo tamaño sea mayor que la ventana y hagan una pequeña perforación en sus centros.

4. Fijen una de las tarjetas de cartón en la ventana que quedó libre.

5. Terminados estos ajustes, tapen la caja.

6. Prendan la vela y colóquenla delante de la tarjeta perforada.

7. Observen sobre la pantalla la imagen de la llama de la vela encendida.

Luego de realizado el experimento, analicen las siguientes cuestiones.

1. ¿Qué puede suceder con la imagen si se aleja o se acerca el cartón a la pantalla?
2. Elaboren un informe de las condiciones en que se desarrolló el experimento y de sus resultados.
3. ¿Qué sucederá si se repite el experimento con tarjetas cuyas perforaciones sean progresivamente más grandes? Discutan y escriban sus conclusiones.
4. Perforen otras dos tarjetas intentando que los agujeros sean cada vez mayores y traten de

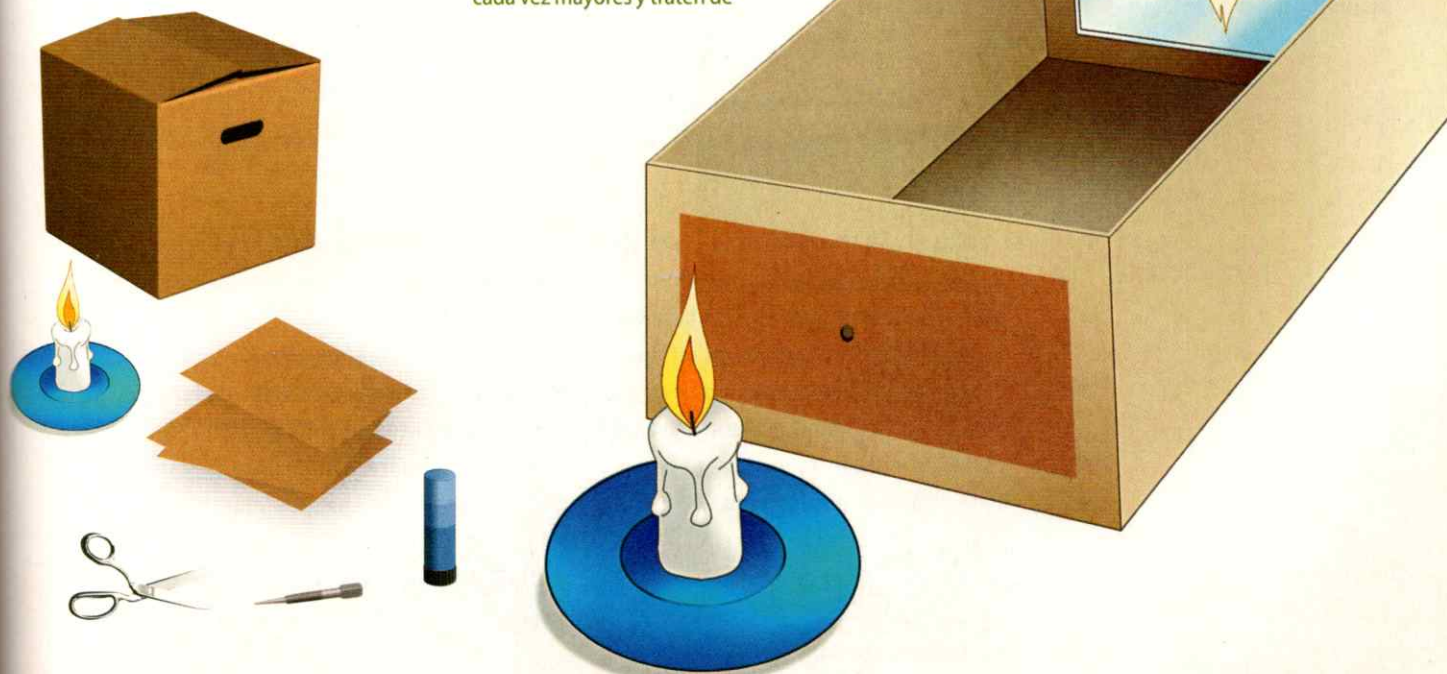
confrontar las observaciones con sus conclusiones del punto anterior.

5. Si las perforaciones fueran de otra forma, por ejemplo triangulares o cuadradas, ¿se obtendrían imágenes circulares, o manchas de luz con estas formas? Discutan y anoten sus conclusiones.

6. Realicen cortes con distintas formas en algunas tarjetas y comprueben la validez de sus conclusiones anteriores.

7. Expliquen lo observado utilizando el modelo de la óptica geométrica.

8. Discutan las posibilidades de esta técnica para obtener imágenes del disco solar. Escriban cuáles serían los ajustes al diseño experimental que podría utilizarse para este fin y cuáles serían las ventajas y desventajas de la observación del Sol por este método.



La reflexión de la luz

Las leyes de la reflexión fueron enunciadas, casi en su forma actual, en el siglo XVII por el físico **Al-Haitham**, (965-1039) conocido en occidente como Alhazen. Hizo importantes adelantos en la óptica de lentes y de espejos. Realizó también las primeras experiencias de la dispersión de la luz en sus colores. Fabricó lentes con vidrios y analizó, con recipientes esféricos de vidrio llenos de agua, la refracción de los rayos en un medio transparente. Fue el primero en describir exactamente las partes del ojo y dar una explicación científica del proceso de la visión. Contradiendo la teoría de Tolomeo y de Euclides, quienes sostenían que el ojo emite los rayos visuales a los objetos, él consideró que son los rayos luminosos los que van de los objetos al ojo. Sus experimentos se aproximaron mucho al descubrimiento de las propiedades ópticas de las lentes. Construyó espejos parabólicos como los que ahora se usan en los modernos telescopios y estudió sus propiedades de enfoque.

Solo es posible ver los objetos si es que la luz proveniente de alguna fuente se refleja en su superficie y llega hasta los ojos. Se llama **reflexión** al fenómeno por el cual la onda electromagnética, al llegar a una superficie que separa dos medios, como la superficie de un vidrio que lo separa del aire, vuelve a aquél por el que viajaba.

Este fenómeno puede ser explicado, siguiendo el modelo geométrico, por dos leyes sencillas.

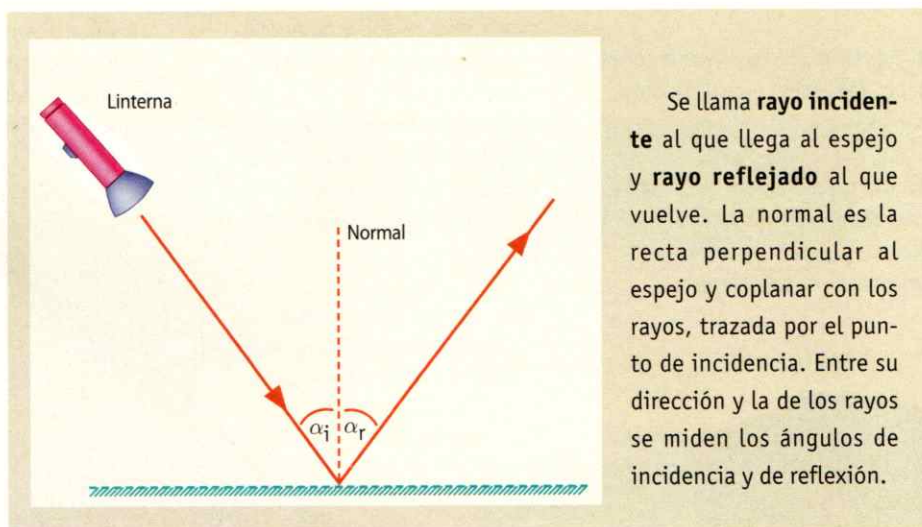
Primera ley de la Reflexión

El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en un mismo plano.

Segunda ley de la Reflexión

El ángulo de incidencia (α_i) es igual al ángulo de reflexión (α_r), es decir,

$$\alpha_i = \alpha_r$$



Es muy simple probar que esta ley es, en realidad una consecuencia del principio de Herón y de Fermat del tiempo mínimo. Dicho de otra manera, cualquier otro camino distinto del enunciado por las leyes de la reflexión, resulta más largo.

Normalmente, los cuerpos reflejan la luz que reciben en muy variadas direcciones; esto explica por qué se pueden observar desde ángulos tan variados. Esta clase de reflexión se conoce con el nombre de **reflexión difusa** o, simplemente, difusión de la luz. Su explicación se encuentra en que la superficie de los cuerpos es frecuentemente muy irregular. Observadas en detalle, con un instrumento de aumento, por ejemplo, muestran muchas caras orientadas al azar.

La reflexión que se realiza en los espejos se llama **especular**. Para que un objeto se transforme en espejo hay que lograr alisar la superficie, lo que se consigue por ejemplo con la técnica de pulido.

Comprobación experimental de las leyes de la reflexión

Para comprobar las leyes de la reflexión, es posible utilizar un diseño experimental que consta de una superficie reflectora (un espejo) y una fuente de luz a partir de la cual sea posible aislar un rayo. Es un modelo físico, aunque dentro de ciertos límites la luz que emerge de un puntero láser puede considerarse un rayo. Es necesario recordar que la radiación láser no debe incidir de ninguna manera directamente sobre los ojos. En esta experiencia no es necesario hacerlo y, además, se recomienda utilizar la luz láser el mínimo tiempo posible.

Materiales

Un espejo plano. Un puntero láser. Talco o polvo de tiza. Reglas, transportador, papel y lápiz. Varios pedazos de tirantes o tacos de madera que tengan un par de caras en escuadra.

Procedimiento

1. Fijen el plano del espejo en una orientación perpendicular al plano de la hoja de papel que se ubica sobre la mesa utilizando los tacos de madera.
2. Marquen la recta que corresponde a la intersección del plano del espejo y del papel. (Sugerencia: conviene ubicar el espejo en el medio de la hoja, y dibujar sobre una de sus mitades.)
3. Ubiquen el puntero láser sobre otro de los tacos o sobre una regla, para poder mover su orientación a voluntad y marcar de manera sencilla sobre el papel la dirección en la que incide el rayo láser.
4. Discutan cuál es el camino que recorre la luz, teniendo en cuenta el principio del tiempo mínimo para



lograr su reflejo en algún lugar en particular. Comprueben luego su predicción prendiendo el láser.

5. Espolvoreen en forma cuidadosa el talco o el polvo de tiza sobre la hoja. Realicen el experimento nuevamente y dibujen la dirección del haz de luz láser.

6. Ubiquen una regla en la misma orientación que observan el rayo reflejado. Recuerden apagar el láser apenas logren la ubicación correcta.

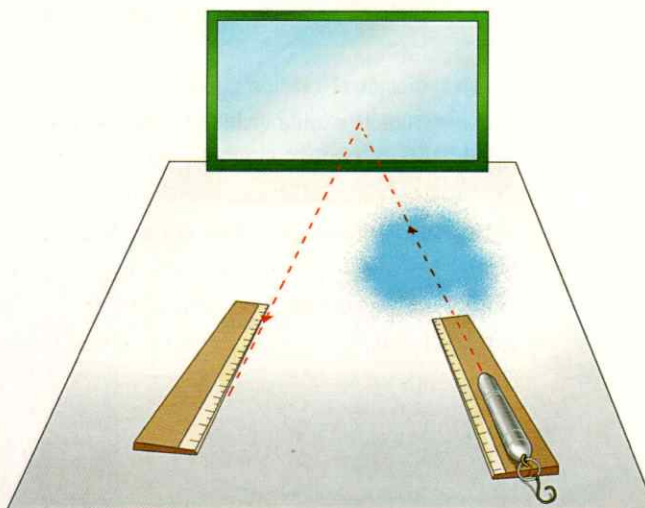
7. Marquen con el lápiz esta dirección y la de incidencia.

8. Dibujen, para cada camino óptico, la normal correspondiente.

9. Midan los ángulos a fin de comprobar la validez de las leyes de la reflexión vistas.

10. Preparen un informe donde anoten las concordancias y desajustes eventuales entre lo esperado y lo hallado. Indiquen cuáles podrían ser las modificaciones que propondrían al diseño experimental para lograr una precisión mayor en esta comprobación.

11. Propongan un camino alternativo al marcado y escriban por qué el que sigue la luz puede ser considerado el mínimo.



■ Cuando un rayo de luz rebota en una superficie que separa dos medios transparentes se dice que el rayo se **refleja**. En cambio, cuando el rayo la atraviesa, se dice que se **refracta**. Estos fenómenos se conocen como reflexión y refracción.

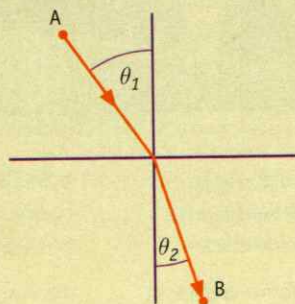


Cuando un lápiz se sumerge en un recipiente con agua, aparenta estar quebrado si se lo mira desde arriba. Este efecto en su imagen se produce por el cambio de dirección de la luz que se refracta al pasar del agua al aire.

La refracción de la luz

Cuando un rayo de luz llega a una superficie que separa dos medios transparentes diferentes, parte de él se refleja y parte logra atravesarlo, es decir, se **refracta**. Excepto en el caso particular en el que incide en forma perpendicular a la superficie de separación entre los medios, el rayo refractado tiene una dirección diferente de la del rayo incidente.

La dirección del rayo incidente y la del refractado determinan con la dirección normal ángulos de incidencia y de refracción.



Puede observarse en el dibujo que la luz no sigue el camino más corto entre dos puntos, como A y B, si ambos están en distintos medios. Sin embargo, es posible demostrar que, debido a las distintas velocidades de la luz en cada uno de ellos, se cumple que el tiempo mínimo en recorrer el camino entre A y B es el indicado en el dibujo.

La luz efectivamente tiene velocidades diferentes según los medios transparentes que atraviesa. Este hecho permite asignarles a los distintos materiales un valor llamado **índice de refracción** definido como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la que tiene en el material:

$$n = \frac{c}{v}$$

En base a este índice, puede plantearse una relación sencilla conocida como **Ley de Snell**. Si se miden el ángulo de incidencia θ_1 y el de refracción θ_2 , en base a la recta normal dibujada en el mismo plano que el camino luminoso, el enunciado de esta ley es:

$$n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$

El índice de refracción puede variar según la longitud de onda de la luz. Por ejemplo, de las longitudes de onda visibles, la roja es la que menos se desvía y la violeta la que más lo hace. Por eso, usando un prisma, se puede separar el espectro de la luz blanca.

Algunos índices de refracción para luz amarilla

Medio	Índice de refracción
Agua	1,33
Alcohol etílico	1,36
Aire (CNPT)	1,0003
Cuarzo fundido	1,46

Medio	Índice de refracción
Vidrio (según la clase)	1,5 y 1,9
Cloruro de sodio	1,53
Polietileno	1,50 a 1,54
Diamante	2,42

Aplicaciones de la Ley de Snell

¿Cuánto se desvía un rayo de luz que incide desde el aire sobre el agua?

Si se supone que el ángulo de incidencia es de 30° , como el índice de refracción del agua es $n_{\text{agua}} = 1,33$, aplicando la ley de Snell, se obtiene:

$$n_{\text{agua}} \cdot \sin \theta_{\text{agua}} = n_{\text{aire}} \cdot \sin \theta_{\text{aire}}$$

Luego:

$$\sin \theta_{\text{agua}} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot \sin \theta_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{1 \cdot \sin 30^\circ}{1,33} = 0,375$$

El valor obtenido corresponde a un ángulo de desviación de aproximadamente 22° .

El juego de los dardos luminosos

El objetivo de esta actividad es la comprobación experimental de las leyes de la refracción y de la reflexión. La intención es lograr la mayor precisión posible en las predicciones que se hagan sobre la orientación del rayo emergente, el cual se hará visible por su incidencia sobre una hoja de papel. Sobre ella estará marcada una posición a priori, considerada centro de puntería. Como en el juego de dardos, el puntaje más alto corresponde al centro y baja a medida que la incidencia del rayo se aleja de él. Se utilizará, como en la experiencia anterior, el haz de un puntero láser como una aproximación a la idea geométrica de rayo de luz.

Materiales

Un puntero láser. Un recipiente rectangular. Un espejo plano. Agua. Tacos de madera. Lápiz y papel.

Procedimiento

a. Construcción del juego

1. Ubiquen en el fondo del recipiente el espejo plano, que es el que reflejará la luz que impactará sobre el blanco.

2. En uno de los laterales peguen el puntero. Por ejemplo, es posible fijarlo sobre una regla y sostenerla sobre una

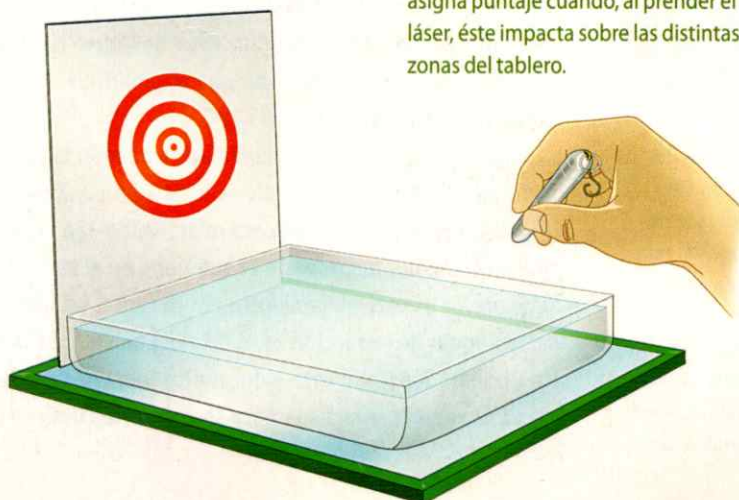
de las paredes laterales con masilla o de alguna otra manera que permita ajustes a la orientación del haz.

3. Ubiquen el tablero sobre el otro lateral. La escala de construcción de este tablero debe tener relación con la del recipiente con el que se va a trabajar. La habilidad de quien dispara se pondrá a prueba ubicando, a distintas alturas cada vez, el centro de puntería. Es importante discutir en el grupo y acordar estas condiciones experimentales así como la manera en que, en cada tiro, la ubicación del tablero podría considerarse fija. Se sugiere establecer con precisión el tiempo máximo con que se cuenta para realizar los ajustes previos al

disparo del láser y el número de tiros que componen una partida, o si ganará el primero que alcance un valor tope de puntos.

b. Desarrollo del juego

Armen grupos de entre 4 y 6 alumnos. En cada tiro se modifica la posición del láser y del blanco. Realicen todas las mediciones y cálculos que consideren necesarios a priori, es decir, sin encender el puntero, para intentar predecir con la mayor precisión posible la incidencia del haz sobre el papel, después de reflejarse y refractarse. Estas mediciones están destinadas a determinar la ubicación que consideren adecuada para el puntero a fin de lograr la máxima puntería, según la ubicación del blanco. Se asigna puntaje cuando, al prender el láser, éste impacta sobre las distintas zonas del tablero.



Imágenes reales y virtuales

Los diferentes instrumentos ópticos distinguen dos tipos de imágenes: las imágenes reales y las imágenes virtuales.

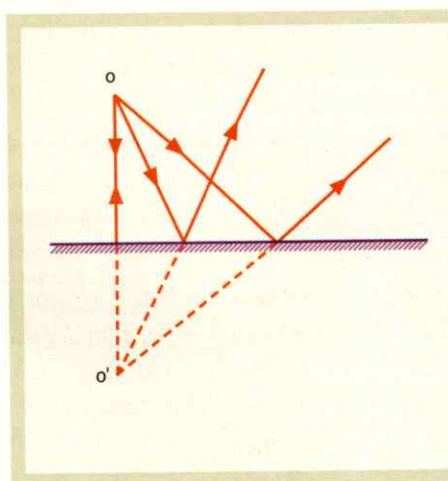
Las **imágenes reales** son aquellas que se forman en el sitio donde verdaderamente convergen los rayos. Es posible captarlas sobre una pantalla, una película fotográfica o verlas directamente dirigiendo la mirada a ese punto.

Las **imágenes virtuales**, en cambio, son las que se forman por la apariencia de convergencia de los rayos luminosos y no por su convergencia real en un punto como en el caso anterior. Por ejemplo, son imágenes virtuales las que se forman en los espejos planos: se ven dentro del espejo o detrás de él. En realidad no están allí, solo lo aparentan.

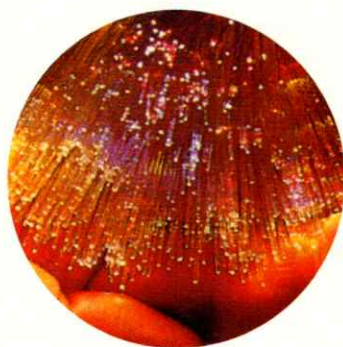
Una explicación para las imágenes virtuales, desde el modelo de la óptica geométrica, es que aquellos rayos provenientes de un objeto, reflejados o refractados por un sistema óptico, tienen direcciones divergentes y no convergentes. Por lo tanto la energía no se concentra en un punto como en las imágenes reales. Son las prolongaciones de los rayos reflejados o refractados las que se juntan para formar las imágenes virtuales.



Noche blanca, Leonardo Erlich (París, 2004). La gente se acuesta sobre un gigantesca reproducción fotográfica de un edificio, extendida sobre el piso. Un enorme espejo a 45° verticaliza la imagen y el público parece colgar de la fachada.



Las prolongaciones de los rayos reflejados convergen en un punto donde se forma la imagen virtual. Es posible comprobar la posición de la imagen a partir de la prolongación de las direcciones de un par de rayos reflejados, para una misma ubicación del láser, repitiendo la actividad experimental de la página 281.



La fibra óptica está compuesta por un filamento de material transparente cubierto por otro material de índice de refracción menor. La luz que entra y que incide en las paredes con ángulos muy rasantes, mayores que el ángulo límite, se refleja en su interior. Va sufriendo de este modo, múltiples reflexiones totales que lo hacen avanzar en un camino quebrado, como rebotando por el interior de la fibra.

Reflexión total

En algunas circunstancias, medios transparentes como el agua o el aire reflejan totalmente la luz como si fueran espejos. Este fenómeno se conoce como **reflexión total**.

Por ejemplo, si se llena un vaso de vidrio transparente con agua y se observa desde cierto ángulo, es posible notar que la superficie interior de agua refleja las imágenes como si fuera un espejo.

La reflexión total solo puede darse cuando la luz llega a un medio con menor índice de refracción que aquel en el que se estaba propagando.

El índice de refracción está relacionado con la velocidad relativa de propagación de la luz en el medio, respecto de la que tiene en el vacío. Cuanto mayor es el ángulo de incidencia, mayor es este alejamiento. Por lo tanto, se puede pensar que, para algún valor límite, este ángulo de refracción es el máximo posible, es decir un alejamiento de 90° respecto de la normal. Superado este valor límite, el rayo se reflejará en lugar de refractarse. En este caso, la superficie transparente se comporta como un espejo.

Espejos

Se llama **espejo** a todo cuerpo que tiene una superficie pulida capaz de reflejar prácticamente toda la luz que le llega.

Los espejos pueden clasificarse en planos o esféricos, según lo sea la superficie pulida que refleja la luz. Estos últimos, a su vez, pueden ser cóncavos o convexos, según qué cara del casquete esférico esté pulida.

Los **espejos planos** son los más comunes. Su frecuente uso se debe a que mantienen una estricta simetría con el cuerpo que reflejan. En otras palabras, no deforman la imagen, que es virtual y no puede ser captada por una pantalla, ya que la luz reflejada en ellos siempre diverge.

Los **espejos esféricos** son también bastante conocidos. Los cóncavos son usados normalmente como espejos de aumento y los convexos son los utilizados, por ejemplo, para ampliar el campo visual en los cruces de esquinas.

En las proximidades de los espejos esféricos existe un punto llamado **foco**. En el caso de que sea cóncavo, es donde convergen los rayos reflejados que incidieron sobre un espejo en dirección paralela a su eje. Si es convexo, éste es el punto respecto del cual convergen las prolongaciones de los rayos que, habiendo incidido en forma paralela, se reflejan en forma divergente. Geométricamente, este punto corresponde a la mitad del radio de curvatura, longitud que se conoce como **distancia focal**.

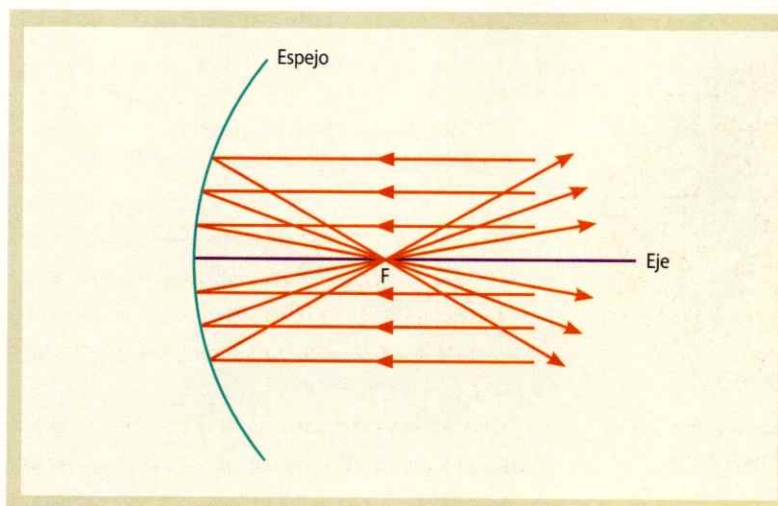
El eje principal de un espejo esférico es la dirección que coincide con el diámetro. Las superficies pulidas aptas para ser un espejo esférico deben poseer una pequeña abertura (de alrededor de 5°) que es el ángulo que forma el eje y uno de sus radios extremos y, además, los rayos incidentes de los objetos cuya imagen se desee obtener deben estar cercanos al eje.

Las leyes de la reflexión aplicadas a espejos esféricos permiten la elaboración de unas relaciones matemáticas sencillas. A partir de ellas es posible calcular el lugar en que se forma la imagen, real o virtual, y su tamaño.

1. Si el rayo incidente o su prolongación pasan por el foco, se refleja en forma paralela al eje.

2. Si el rayo incide paralelo al eje, se refleja pasando, él o su prolongación, por el foco.

3. Si el rayo incide pasando por el centro de curvatura que es el centro de la esfera a la que pertenece el casquete esférico, se refleja sobre sí mismo.



El callejón del Gato

En el siglo XV, Juan Álvarez Gato, poeta madrileño, inauguró un lugar en el cual la gente podía ir a divertirse mirando sus imágenes deformadas por dos espejos, uno cóncavo y otro convexo. Su fama llegó hasta nuestros días a partir de su mención, por parte de algunos escritores que lo vinculan con la técnica que se conoce como *esperpento*, sinónimo de mamarracho, la cual consiste en la deformación sistemática de la realidad como recurso literario.

Una lámina plana de vidrio puede considerarse como una lente de curvatura cero, lo que implica que sus puntos focales están en el infinito.

Si se denomina x a la coordenada del objeto, f a la distancia focal y x' a la ubicación de la imagen, se obtiene la ecuación de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

En esta ecuación, las posiciones del lado del espejo en que incide la luz son positivas, siendo las otras negativas. Por lo tanto f en un espejo convexo es un valor negativo.

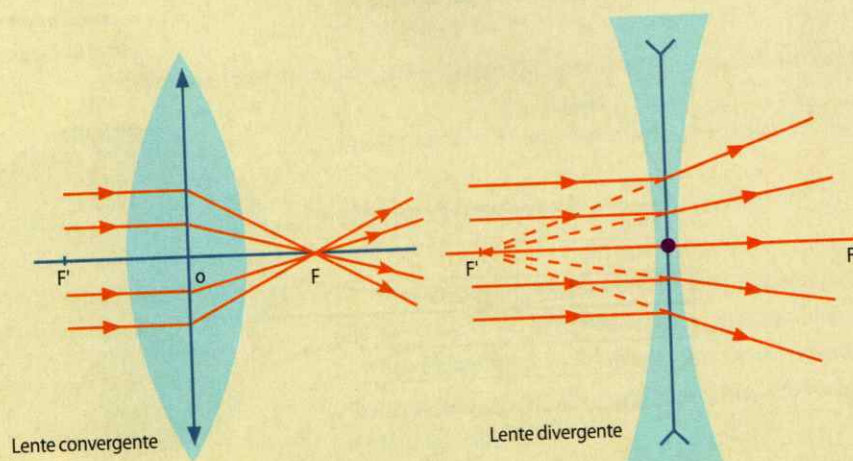
Con los espejos esféricos se pueden obtener imágenes aumentadas o disminuidas del objeto, directas o invertidas. El aumento lateral y la orientación de su imagen se obtiene por la aplicación de la ecuación para el aumento lateral en espejos esféricos, en la cual la altura del objeto es y , siendo y' la simbolización de la altura de la imagen.

$$-\frac{y'}{y} = \frac{x}{x'}$$

Imágenes obtenidas por lentes

Una **lente** es todo medio transparente limitado por dos caras de las cuales al menos una es curva. Esta condición geométrica permite plantear, como en el caso de los espejos, una dirección llamada eje de la lente. En las lentes delgadas, es decir aquellas en las cuales su espesor es despreciable respecto de la distancia a la que se encuentra el objeto, el punto en el cual el eje toca a la lente se conoce como **centro**.

Las lentes se clasifican en convergentes y divergentes, según si la luz que incide paralela al eje converge en un punto llamado foco o diverja de él.



Un ejemplo de **lentes convergentes** es la lupa.

Las **lentes divergentes** son las que se usan para corregir la miopía, defecto visual que dificulta la visión clara de objetos lejanos.

La convención más habitual asigna signo positivo a la coordenada focal de las lentes convergentes y negativo al de las divergentes, motivo por el cual también se las conoce con estos nombres.

Unas reglas sencillas permiten la obtención gráfica de la ubicación y el tamaño de la imagen obtenida por una lente. Se enuncian para tres rayos principales.

1. Si la dirección de incidencia de la luz es paralela al eje, se refracta pasando por el foco.
2. Si la dirección de incidencia de la luz es tal que el rayo o su prolongación pasa por el foco, se refracta en una dirección paralela al eje.
3. Si la dirección de incidencia pasa por el centro de la lente, el rayo no se desvía.

Como en los espejos esféricos, para las lentes es posible obtener, mediante unas relaciones matemáticas sencillas, la ubicación x' , de la imagen partiendo de la ubicación del objeto que la forma, designada como x , y de la distancia focal de la lente f por la ecuación de las lentes.

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Para el tamaño de la imagen y' , comparada con de la del objeto y , la ecuación es la siguiente:

$$-\frac{x}{x'} = \frac{y'}{y}$$

Se denomina potencia de una lente a la medida del grado de desviación que produce en los rayos de luz, la que aumenta según disminuye la distancia focal. Por esto es que se define:

$$P = \frac{1}{f}$$

y se mide en m^{-1} , que se denomina **dioptría**.

Aplicaciones al cálculo de posición y tamaño de imágenes

1. El radio de un espejo esférico cóncavo es de 20 cm. A 30 cm de distancia desde el vértice y un poco sobre su eje principal se coloca una fuente luminosa puntual. ¿Dónde se encuentra su imagen? ¿Es real o virtual?

Se define para el eje del espejo la siguiente convención: las coordenadas x positivas son las que están del lado de su foco. Por lo tanto: $x = 30$ cm; $f = 10$ cm. Si se reemplaza en la ecuación de los espejos esféricos:

$$\frac{1}{30\text{cm}} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{10\text{cm}}$$

$$\frac{1}{x'} = \frac{1}{10\text{cm}} - \frac{1}{30\text{cm}} = \frac{3-1}{30\text{cm}} = \frac{1}{15\text{cm}}$$

Con lo cual $x' = 15$ cm. La imagen está ubicada sobre el eje, a 15 cm y es real.

2. Un objeto de 10 cm de altura se coloca a 40 cm de una lente convergente de distancia focal 20 cm. ¿Cuál es la ubicación de su imagen? ¿Es real o virtual? ¿Está aumentada o disminuida? ¿Está invertida?

Si se considera la ecuación de las lentes, donde, por ser la lente convergente, f es positiva.

$$\frac{1}{40\text{cm}} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{20\text{cm}}$$

Por lo tanto $\frac{1}{x'} = \frac{1}{20\text{cm}} - \frac{1}{40\text{cm}} = \frac{2-1}{40\text{cm}} = \frac{1}{40\text{cm}}$. Luego, $x' = 40$ cm y entonces la imagen está ubicada a 40 cm y es real.

Como en este caso con la expresión:

$$\frac{x}{x'} = -\frac{y}{y'} \text{ se obtiene } y = -y' \text{ para este caso particular.}$$

Por lo tanto la imagen real se forma en la misma ubicación del objeto, es del mismo tamaño y está invertida.

El cristalino del ojo es una lente convergente que puede cambiar su foco, capacidad que se llama acomodación.

La miopía es un defecto que impide la visión correcta de objetos lejanos. Se corrige con lentes divergentes.

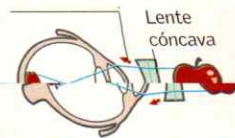
La hipermetropía es el defecto contrario, es decir que se forman imágenes borrosas de los objetos cercanos. Se corrige con lentes convergentes.

La presbicia es el defecto asociado a la pérdida de la capacidad de acomodación del cristalino; necesita para su corrección lentes convergentes para la visión cercana y divergentes para la de objetos lejanos.

Corrección con lentes cóncavas

Expande el ángulo de entrada de los rayos.

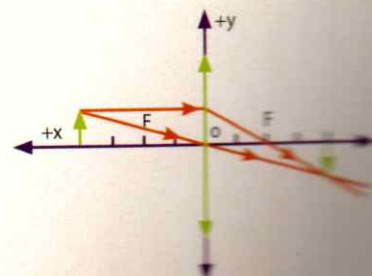
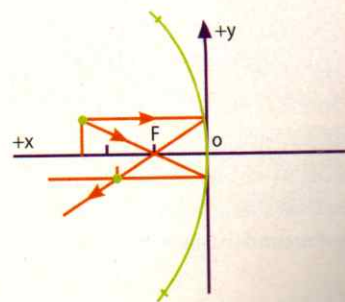
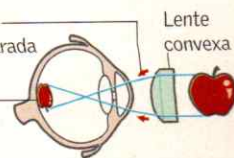
La imagen se forma en la retina.



Corrección con lentes convexas

Comprime el ángulo de entrada de los rayos.

La imagen se forma en la retina.



Óptica física

Los fenómenos ópticos no pueden ser explicados en su totalidad a partir del modelo de rayos. Por ejemplo, las leyes de la refracción antes enunciadas suponen la utilización de un rayo de luz monocromático, ya que el índice de refracción también varía con la longitud de onda de la luz. El hecho de que la luz blanca se dispersa en los distintos colores del espectro cuando atraviesa las caras de un prisma no puede ser explicado por las leyes de refracción de la óptica geométrica. Tampoco puede aplicarse esta teoría cuando los fenómenos luminosos incluyen objetos de un tamaño similar al de la longitud de onda de la zona visible del espectro, que es de 0,4 a 0,7 μm . Es necesario, por lo tanto, abandonar este modelo basado en el rayo luminoso, para considerar el comportamiento ondulatorio de la luz.

Sin embargo hay fenómenos, como el efecto fotoeléctrico, que no pueden ser explicados mediante el modelo ondulatorio. En esos casos se utiliza un modelo basado en el concepto de **fotón**. Los fotones son porciones de energía o corpúsculos de luz que permiten explicar por qué una radiación de cierto color, al incidir sobre un metal, logra liberar algunos electrones.

Desde cualquiera de estos modelos, el de rayos, ondas o fotones, puede afirmarse que la luz transporta información. Por eso, en principio, puede intentarse la decodificación de la luz para obtener información acerca de aquello que la produce o con lo que interactúa.

Interferencia

Cuando en una cámara oscura la abertura es demasiado pequeña, se observa la formación de zonas alternadas de luz y de sombra. No es posible explicar este hecho por el modelo de rayos. Es la oportunidad del modelo ondulatorio.

Thomas Young (1773-1829) demostró por primera vez el fenómeno de la interferencia óptica. Su experimento fue muy importante para dar a la teoría ondulatoria de la luz una base experimental firme. Por entonces, ésta se encontraba en pugna con la teoría corpuscular, que había sido defendida por Newton.

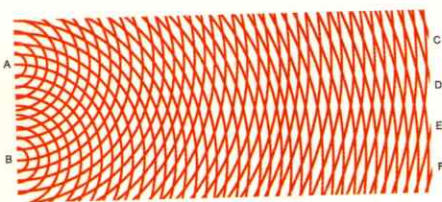
El experimento de Young consiste en hacer pasar luz monocromática, es decir de una sola longitud de onda, por un par de orificios muy pequeños y próximos entre sí. Cuando uno de ellos está tapado, es posible observar una mancha circular sobre una pantalla ubicada a suficiente distancia. Cuando ambos orificios están destapados, sobre la pantalla aparecen bandas claras y oscuras, llamadas **bandas de interferencia**.

La explicación de este fenómeno, dentro del modelo ondulatorio, se basa en el desfase constante que se produce en la luz, inicialmente en fase, al emerger por los dos orificios. Las ondas llegan a la pantalla por caminos diferentes y por lo tanto una de ellas presenta un retraso respecto de la otra. Las manchas de luz suponen una interferencia constructiva y las oscuras, una destructiva.

La condición para que en un punto y de la pantalla, ubicado a la distancia x haya interferencia constructiva es:

$$y = \frac{n \cdot x \cdot \lambda}{a}$$

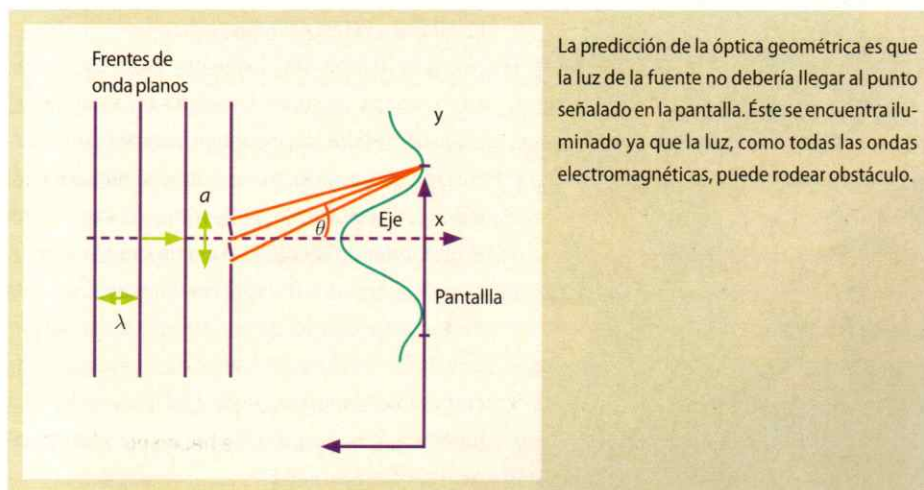
donde λ es la longitud de onda de la luz, a la distancia entre los orificios y n un número entero.



Este es el dibujo original de Thomas Young. Si se coloca el ojo cerca del borde izquierdo, al ras de la hoja, es posible tener la sensación de bandas de luz y de sombra.

Difracción

Cuando la luz encuentra en su camino orificios muy pequeños u obstáculos muy delgados, tanto como el orden de magnitud de su longitud de onda, es posible observar efectos de difracción. Como se explicó en el capítulo 12, la difracción es el hecho por el cual las ondas pueden rodear, en ciertas condiciones, obstáculos que se interpongan en su camino. El efecto observado sobre una pantalla es zonas claras y oscuras. Si a es el diámetro de un orificio, y λ es la longitud de onda de la luz, entonces la relación debe ser un número pequeño. Si es suficientemente grande, este efecto puede pasarse por alto.



La difracción fue descubierta por Francesco Grimaldi (1618-1663) quien al hacer incidir luz de una pequeña fuente sobre un cabello, observó que en lugar de una sombra se formaban varias, separadas por zonas iluminadas.

En vez de utilizar una sola abertura, o dos como en el experimento de Young, para producir difracciones, es posible utilizar un dispositivo conocido como **red de difracción**. Las primeras redes eran surcos muy finos trazados en un vidrio. En la actualidad se cuenta con redes fabricadas con procedimientos y técnicas muy avanzados, como la tecnología láser utilizada en el grabado de discos compactos.

Una aplicación de la difracción es la técnica que se conoce como **espectrografía**. Se basa en que, al iluminar una red de difracción con una luz monocromática, se forma un máximo central y algunos laterales. Si se utiliza luz de otra longitud de onda, el máximo central se mantiene, pero los secundarios están corridos respecto de la ubicación anterior. Por lo tanto, si se ilumina una red con una luz que tiene mezcla de varias longitudes de onda, a partir del máximo central se forma una separación que constituye el espectro de la luz incidente.

Mediante una red, es posible separar el espectro de un determinado tipo de luz. Los distintos elementos de la tabla periódica emiten, dadas algunas condiciones, luz en una determinada longitud de onda. Por lo tanto, el análisis espectral de la luz puede dar información acerca de la composición química de algún objeto. Esta técnica puede ser aplicada para estudiar la composición química de la atmósfera de un lejano planeta.

Los efectos de la difracción son observables en casos más cotidianos como, por ejemplo, en los brillantes colores que devuelve un disco compacto. Los pequeños hoyitos de su superficie actúan como una red de difracción, separando el espectro de la luz blanca.

Se pueden observar efectos de difracción al hacer pasar la luz de una fuente luminosa lejana, como por ejemplo el Sol, a través de una pequeña franja de separación entre los dedos.

La teoría de la descomposición fue utilizada por los pintores impresionistas, aunque fundamentalmente por en el movimiento conocido como puntillismo. En él los artistas producen una mezcla óptica precisa a partir de diminutas pinceladas de colores complementarios. Este hecho puede apreciarse en el cuadro *Un domingo por la tarde en Grande de Jatte*, de George Pierre Seurat.



Los colores

¿Cuánto hay de objetivo y cuánto de subjetivo en el color asignado a las cosas?

Si bien cada color puede relacionarse objetivamente con una longitud de onda particular en la zona visible del espectro electromagnético, la percepción del color corresponde a la sensación que cada una de esas radiaciones produce en el sistema visual. Es posible afirmar que un objeto es rojo para todo aquel que pueda percibir el rojo.

En la sensación del color influye el tipo de longitudes de onda presentes en la radiación que ingresa al ojo y la intensidad relativa de cada una de ellas. Esta radiación trae hasta el ojo la información del color del objeto, tanto sea que éste la emita o la refleje. En este último caso, la luz reflejada ha sido modificada por el objeto, y por lo tanto de alguna manera trae información de su superficie.

Si se ilumina un objeto con luz blanca, que cubre todas las longitudes de onda visibles, la luz reflejada por su superficie traerá información del objeto por cuanto, según de cuál radiación se trate, será absorbida o reflejada en mayor o menor medida. Si un objeto se ve rojo, es porque la luz que refleja es en mayor medida de ese color, mientras que los otros son absorbidos. Por esto, si a este objeto se lo ilumina con luz de color azul, por ejemplo, se lo verá negro, ya que absorberá por completo la radiación sin reflejar nada.

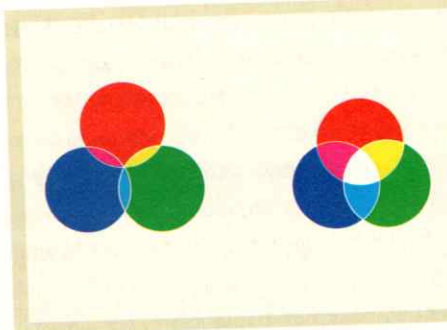
Los objetos negros son aquellos que absorben todas las radiaciones presentes en el espectro de la luz blanca. Los blancos son los que

devuelven la luz blanca casi en forma completa, sin absorber ningún color.

Este mismo principio se aplica a los colores observados en algunos objetos transparentes, como vidrios coloreados. El color observado es, simplemente, el que corresponde a las longitudes de onda que no han sido absorbidas. Por el mismo motivo, un cristal coloreado podría verse negro, si se lo ilumina solo con luz de las longitudes de onda que absorbe, ya que no transmitiría nada.

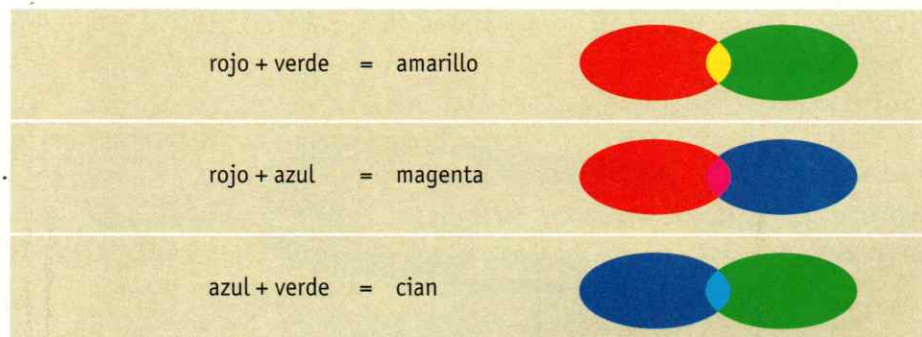
Así como la combinación de todas las longitudes de onda de la luz visible dan el color blanco, también es posible producir este color a partir de la combinación de luces solo roja, verde y azul, de iguales intensidades.

Se denomina **cuatricotomía** a la impresión a tres colores sobre papel con tintas o colorantes. Esta impresión utiliza los colores: magenta (mezcla artificial que está entre el rojo y el violeta), cian, que es un azul algo verdoso, amarillo y el negro, que no es un color sino su ausencia.



La explicación de este fenómeno radica en las características de la visión humana. En la retina del ojo normal hay células sensibles a tres colores: azul, verde y rojo. Cada uno está relacionado con tres sectores del espectro: las longitudes de onda más largas, las medias y las más cortas. Las primeras dan la sensación de rojo, las que le siguen dan el verde y las últimas corresponden al azul. Es posible conseguir cualquier color superponiendo luz de estos tres.

Se llaman complementarios a dos colores que al superponerse se ven blancos. A partir de la figura anterior, puede verse claramente que:



Este hecho se conoce como mezcla de colores por adición. Las pantallas de los televisores utilizan este efecto iluminando con distintas intensidades puntos en la pantalla que combinan estos tres colores, que al ser mezclados por el ojo, dan las distintas sensaciones de color.

También existen mezclas sustractivas de colores. Si se mezclan témperas de color rojo y verde no se obtiene el color amarillo, sino más bien un tono marrón.

A partir de un conocimiento práctico de las mezclas de colores por sustracción es posible anticipar con bastante precisión el color resultante a partir de una mezcla de pinturas.

La explicación de las diferencias que presentan estas mezclas radica en el tipo de materiales que las componen. No es lo mismo mezclar luz que pinturas.

Los pigmentos de una pintura reflejan una gama de colores relativamente amplia, no solo un color. Por ejemplo, una pintura azul refleja principalmente el azul, aunque también parte de verde. Una pintura amarilla refleja el amarillo, aunque también algo de verde. Entonces, si se mezclan una pintura azul con una amarilla, se la verá verde, que es el color que ambas reflejan y no absorben.

Un conocimiento básico sobre pintura comienza por establecer los colores llamados primarios: el rojo, el amarillo y el azul. Con ellos se pueden formar cualquiera de los otros colores. Los sistemas de impresión trabajan con tres colores de tinta por sustracción que son: el magenta, el amarillo y el cian.

Los colores del cielo

¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué los atardeceres son rojos?

La primera pregunta se responde a partir de un fenómeno conocido como dispersión de la luz blanca. La luz blanca del Sol es dispersada por las moléculas que componen la atmósfera. La capa superior absorbe la mayor parte de la luz ultravioleta y solo una pequeña fracción de ella sigue hacia la superficie. De las frecuencias visibles, el violeta y el azul son los colores que más se dispersan. El ojo humano no es tan sensible al violeta como al azul, por eso el cielo se ve de este color. La luz que menos se dispersa es el rojo. Por eso no se observa, salvo cuando el Sol está muy bajo sobre el horizonte. Cuando amanece o anochece, el camino que debe recorrer la luz a través de la atmósfera es más largo, por lo que, la luz azul resulta casi totalmente dispersada y no alcanza las capas inferiores. Esto permite observar unos hermosos amaneceres y atardeceres rojos.



En las pantallas de un televisor las imágenes se construyen iluminando distintos puntos en filas sucesivas. Existe un tamaño mínimo para este elemento del dibujo de las imágenes, que se llama **píxel**. El número de píxeles verticales y horizontales debe ser aproximadamente igual, ya que el ojo es sensible a la información en ambas direcciones. Las imágenes de televisión se forman por aproximadamente 140 000 píxeles. Para crear la sensación de movimiento es necesario reproducir 25 imágenes por segundo, lo cual supone una tasa de transferencia de información de 3,5 millones de píxeles por segundo. En una película cinematográfica esta tasa es del orden de los 1000 millones por segundo.

Analizar impresiones de color



Materiales

Una lupa de 20 o más aumentos (menos de 5 cm de distancia focal).
El cuadro de la página 290 u otro que aplique el puntillismo.

Procedimiento

1. Con buena iluminación observen con la lupa regiones del cuadro en la que haya zonas oscuras, claras, de un solo color, blancas o negras.
2. Tomen nota de lo observado y compárenlas.
3. Propongan una explicación de las diferencias observadas.

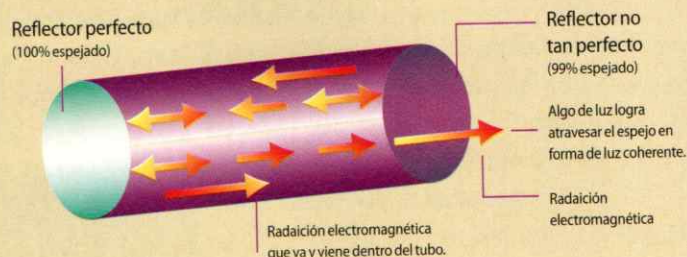
Láser

ALGUNA VEZ SE HA DICHO QUE EL LÁSER FUE UN INVENTO QUE CONSTITUYÓ UNA SOLUCIÓN EN BUSCA DE UN PROBLEMA.

Lo cierto es que hoy en día sus aplicaciones son tan amplias como quizás no se podría haber imaginado a partir de su invención.

Los principios de su funcionamiento se basan en un fenómeno que ocurre a escala microscópica: la emisión de radiación electromagnética por parte de los átomos de un material. Cualquier tipo de elemento químico tiene un espectro de emisión característico. Esta emisión puede ser espontánea o estimulada. Esta última representa una cierta tendencia de los átomos a emitir radiación en una frecuencia idéntica a la de algún otro átomo vecino. En cualquier emisión luminosa por parte de un material, están presentes los dos tipos de emisión, solo que la estimulada es normalmente muy débil. Entregando una buena cantidad de energía a los átomos de un

El lector del código de barras que traen los productos para su identificación se realiza mediante un láser.



La función de los espejos en la emisión de un láser. La radiación encerrada en la cavidad produce la inversión de la población electrónica.

material, se logra colocar sus electrones en un nivel superior al llamado fundamental, que es el más probable. A esto se llama *inversión de población*.

Un **láser** es un dispositivo que produce prioritariamente el efecto de emisión estimulada y lo amplifica. El nombre deriva de la sigla que en inglés significa *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de la radiación por emisión estimulada). En realidad, la amplificación se logra por una oscilación del haz de luz obtenida por emisión estimulada, motivo por el cual el láser en algún momento pudo ser un *loser* (perdedor), nombre que seguramente no respetaría en nada su destino tan lleno de exitosas aplicaciones. El primer dispositivo de emisión estimulada amplificada se construyó en 1954 y lograba

radiar en microondas en lugar de luz visible, por lo que se lo llamó *máser*. El primer láser en funcionamiento fue construido por Theodore Maiman en 1960. Empleó un cristal de rubí, que es de color rojizo. Consiguió amplificar la luz haciéndola oscilar en espejos ubicados en sus extremos. En este modelo, uno de los espejos tiene una reflexión del ciento por ciento, mientras que la del otro es un poco menor. Superado cierto umbral, la radiación logra salir del oscilador y constituye la radiación conocida como láser. La radiación láser ha encontrado aplicación en múltiples ciencias y tecnologías. Su importancia procede de la alta intensidad de la luz emitida, el haz estrecho de poca divergencia, la gran pureza en la longitud de onda y su coherencia.



Luego de la lectura del texto busquen diferentes aplicaciones que tienen los rayos láser en la actualidad.

IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ La **Óptica** es la rama de la física que estudia los fenómenos asociados a la franja visible del espectro electromagnético y sus entornos próximos.

■ Los cuerpos pueden clasificarse en **transparentes**, **translúcidos** y **opacos**, según su comportamiento frente a la incidencia de un determinado tipo de onda luminosa.

■ A cada tipo de onda luminosa se asocia una **longitud de onda**, una **intensidad** y una **dirección** de propagación que sostiene la idea de rayo luminoso.

■ La **velocidad de la luz en el vacío** vale aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s.

■ La **óptica geométrica** se basa en la propagación rectilínea de la luz.

■ La formación de **sombra** y **penumbra**, **fenómenos de reflexión en espejos**, **refracción en lentes** y **reflexión total** resultan sencillos de abordar desde el modelo de rayos luminosos.

■ El **Principio de Fermat** establece el tiempo mínimo para el camino óptico y explica su reversibilidad.

■ Los fenómenos de **interferencia** y **difracción** quedan explicados por el modelo ondulatorio de la luz.

■ Los **colores** de un cuerpo no luminoso se explican a partir de la interacción de la radiación incidente con sus capas superficiales, por lo que la luz reflejada trae información del objeto.

Fórmulas

$$\alpha_{\text{incidencia}} = \alpha_{\text{reflexión}}$$

Reflexión

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Refracción

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de los espejos esféricos

$$-\frac{y}{y'} = \frac{x}{x'}$$

Aumento lateral en espejos esféricos

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

Ecuación de las lentes

$$-\frac{x}{x'} = \frac{y}{y'}$$

Aumento lateral de las lentes

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. Respondan a las siguientes preguntas.

a. ¿Por qué si en un eclipse de Sol, su luz se filtrara por un pequeño orificio podría verse reproducida la imagen del disco solar cubierto parcialmente por la Luna?

b. ¿Cuál de los fenómenos analizados en este capítulo explica la visión del arco iris?

c. ¿Cómo es posible obtener luz amarilla a partir de la roja y la verde?

2. ¿De qué orden de magnitud es la distancia entre la Tierra y la Luna si un pulso láser disparado desde la Tierra tarda en retornar aproximadamente 3 segundos después de ser reflejado por la Luna?

3. ¿En qué sentido pueden considerarse muy antiguas las imágenes de la nebulosa Esquimal que se encuentra ubicada a aproximadamente 5000 años-luz de distancia del sistema solar? ¿Cuántos kilómetros habrá recorrido la luz proveniente de esa nebulosa antes de llegar a la Tierra?

4. ¿Cuál de los eclipses, los de Sol o los de Luna, son observables desde más lugares en la Tierra? ¿Por qué?

5. Delante de un espejo cóncavo se ubica un objeto luminoso de 2 cm de altura. ¿Cuál es el tamaño y la ubicación de su imagen si el objeto está a una distancia igual al doble del foco del espejo?

6. ¿Cómo cambiarían los resultados del problema anterior si el espejo fuera convexo en lugar de cóncavo?

7. Entre el rayo incidente y el reflejado por un espejo plano hay un ángulo de 50° . Dejando uno de los laterales del espejo fijo, se lo rota 30° respecto de su posición original, en un eje perpendicular a los rayos. ¿Cuánto vale el nuevo ángulo entre las direcciones de incidencia y de reflexión?

8. En un periscopio se cambia el espejo plano superior por otro esférico a fin de ampliar la zona observada, ¿se usará uno cóncavo, o uno convexo?

9. Una lámpara se encuentra situada a 9 metros de una pantalla sobre la que se forma su imagen real, invertida y del doble de su tamaño. ¿Qué tipo de lente se encuentra entre la lámpara y la pantalla? ¿Cuál es su distancia focal? ¿A qué distancia de la pantalla se encuentra la lente?

10. ¿Por qué si el agua es transparente las nubes de tormenta, formadas por gotas de agua relativamente grandes, se ven oscuras?

11. ¿A qué profundidad se ve el fondo de una pileta llena de agua si éste se encuentra en realidad a 5 metros del borde?

12. Un rayo luminoso incide desde el agua hacia el aire bajo un ángulo de incidencia de 30° . ¿Cuál será el ángulo de refracción?

13. Un objeto de 8 cm de alto se ubica a 20 cm de una lente convergente cuya distancia focal es de 4 cm.

a. Dibujen un diagrama con los rayos principales que muestre cómo se forma la imagen.

b. ¿A qué distancia se forma?

c. ¿Puede verse la imagen en una pantalla?

d. ¿Cuál es el tamaño de la imagen?

14. Un proyector tiene una lente de tipo convergente para proyectar diapositivas de 2 cm de altura. Si la proyección a 3 metros forma imágenes de 50 cm, ¿cuál es la ubicación de la lente respecto de la diapositiva y cuál es su potencia?

15. ¿Cuánto tiempo tarda un rayo de luz en atravesar perpendicularmente una lámina de vidrio de 1,5 de índice de refracción y de espesor igual a 2 cm?

16. ¿Cuando la luz pasa del agua al aire, cambia la frecuencia de la onda, o su velocidad?

17. En un día de sol, puede quemarse un papel utilizando una lupa. ¿Podría usarse un espejo cóncavo en lugar de la lupa para realizar el mismo experimento?

18. Cuando un rayo de luz incide perpendicularmente respecto de la superficie de separación de dos medios transparentes, no se desvía. ¿Significa eso que su velocidad de propagación no cambia?

19. Un objeto de 2 cm de altura se coloca a 10 cm de una lente divergente de 5 cm de distancia focal.

a. Dibujen un diagrama con los rayos principales que muestre cómo se forma la imagen.

b. ¿A qué distancia se forma?

c. ¿Puede verse la imagen en una pantalla?

d. ¿Cuál es el tamaño de la imagen?

20. A partir de los colores complementarios expliquen por qué son válidas las siguientes mezclas aditivas:

a. azul + amarillo = blanco

b. verde + magenta = blanco

c. rojo + cian = blanco

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

1	Como el Sol es una fuente de luz extensa, proyecta sobre la Tierra sombras y penumbras de todos los objetos que se interponen entre ambos.	☐
2	La luz está formada por rayos luminosos.	☐
3	La luz siempre sigue el camino más corto entre dos puntos.	☐
4	Un espejo plano a veces deforma la imagen.	☐
5	Cuando un rayo se refracta, en algunas condiciones se aleja y en otras se acerca a la normal.	☐
6	Si pasa luz por una rendija rectangular, la mancha de luz que se formaría sobre una pantalla sería siempre rectangular.	☐
7	Si ven a una persona debajo del agua, sin duda ella también podría verlos.	☐
8	Un espejo plano invierte la izquierda y la derecha.	☐
9	El índice de refracción se puede determinar con bastante aproximación si se mide respecto del aire en lugar del vacío.	☐
10	El índice de refracción de una sustancia es siempre un número mayor o igual que 1.	☐
11	El ángulo de incidencia y el de reflexión de la luz no son iguales en los espejos esféricos.	☐
12	Una imagen real es una imagen del mismo tamaño que el objeto.	☐
13	La imagen virtual es una imagen igual al objeto.	☐
14	Los espejos esféricos no deforman la imagen, solo la agrandan o la achican.	☐
15	Los espejos convexos siempre producen imágenes virtuales.	☐
16	Una lupa es una lente convergente.	☐
17	En el ojo se forman imágenes reales, invertidas y menores que el objeto.	☐
18	Los fenómenos de difracción de la luz son difíciles de observar porque no ocurren muy a menudo.	☐
19	Las bandas de interferencia pueden observarse pero no fotografiarse.	☐
20	Un objeto amarillo se ve negro si lo iluminamos con luz amarilla.	☐

*Si quiero por las estrellas
saber, tiempo, dónde estás,
miro que con ellas vas,
pero no vuelves con ellas.
¿Adónde imprimes tus huellas
que con tu curso no doy?*

*Mas, ay, qué engañado estoy,
que vuelas, corres y ruedas;
tú eres, tiempo, el que te quedas,
y yo soy el que me voy.*

Luis de Góngora

CONTENIDOS

- El surgimiento de la Física moderna
- Transformaciones de Galileo y de Lorentz
- Relatividad especial
- Relatividad general
- Física cuántica
- La Física en la Argentina

15

LA FÍSICA DEL SIGLO XX

Hacia finales del siglo XIX, la mayoría de los físicos sostenían que esta disciplina científica había llegado a su desarrollo completo. Se consideraba que la mecánica de Newton sumada a la teoría electromagnética de Maxwell podían explicar la totalidad de los fenómenos de la naturaleza. Sobre estos dos pilares, el edificio de la Física parecía suficientemente sólido. Suelen citarse los comentarios de Lord Kelvin, quien por esos tiempos afirmaba que todo lo que restaba por hacer eran mediciones más precisas, que agregaran otros decimales a las constantes universales ya medidas, y disipar solo dos temas, que traían cierta oscuridad al conjunto armonioso de los conocimientos físicos. Se refería, en primer lugar, al resultado negativo del experimento de Michelson-Morley, diseñado para determinar la velocidad absoluta de la Tierra, es decir, su velocidad respecto de un hipotético éter en reposo. Y en segundo término, a la profunda discrepancia entre las leyes sobre la radiación de energía a medida que se calienta un cuerpo y los datos empíricos correspondientes.

Los desarrollos teóricos surgidos de los intentos por disipar estas dos cuestiones, obligaron a la formulación de teorías más generales que pusieron en tela de juicio los fundamentos mismos de la física clásica. Ellas fueron la teoría especial de la relatividad y la teoría cuántica.

Las explicaciones de Aristóteles dominaron el pensamiento por más de dieciocho siglos, como se vio en el capítulo 1. Uno de los motivos de esta aceptación tan prolongada se encuentra en el hecho de que resultan coincidentes con las interpretaciones espontáneas que alguien de cualquier época podría elaborar al interactuar con su medio ambiente. Por eso se las incluye en lo que se llama a menudo Física del sentido común. Sin embargo, son necesarios grandes esfuerzos intelectuales para comprender los enunciados de Galileo o Newton a partir de estas lógicas interpretativas.

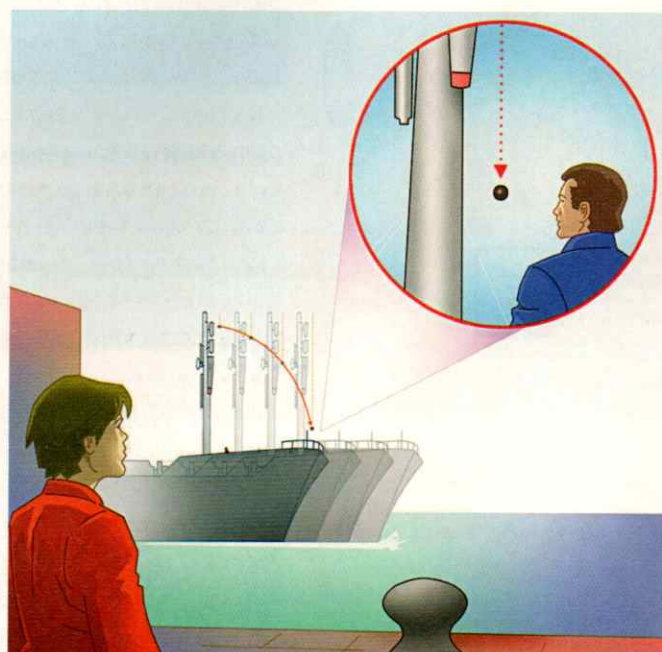


Instituto Balseiro. Bariloche, provincia de Río Negro.

La diferencia principal entre los modelos se basa en que la física de Aristóteles postulaba una Tierra en reposo absoluto y que, con referencia a ella, puede definirse ese estado para cualquier objeto sobre el cual no actúe ninguna fuerza. Por su parte, para Galileo y los físicos posteriores, la Tierra y los planetas están en movimiento, girando alrededor del Sol.

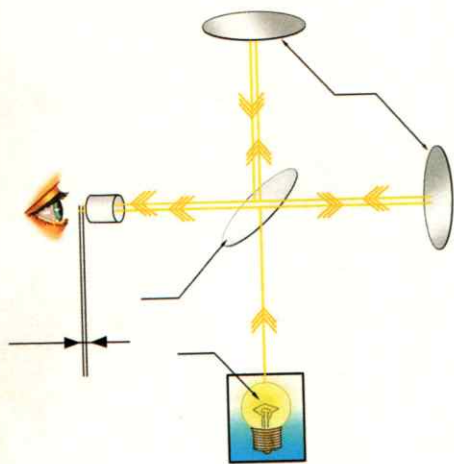
De hecho, Galileo debió recurrir a diversos argumentos para convencer a los defensores de la inmovilidad de la Tierra. Planteó, entre otros, los siguientes problemas: ¿cómo se vería desde la playa la trayectoria seguida por unas gotas de agua que caen constantemente desde un recipiente ubicado en la cubierta de una nave, si ésta pasa navegando con velocidad constante y paralela a la costa? ¿Cómo se vería desde la cubierta de la nave? Es claro que en el primer caso la trayectoria observada sería curva y en el segundo, recta. Pero, ¿cómo se mueve efectivamente? Resulta muy difícil aceptar que no existe una respuesta absoluta sino solo relativa, es decir que depende desde dónde se observe. Lo cierto es que si el movimiento absoluto existe, la respuesta parece no tenerla la mecánica.

En este capítulo se verá cómo fallaron los intentos de probar el movimiento absoluto con la teoría electromagnética y cómo estos resultados obligaron a una reformulación teórica de la Física clásica.



Si el barco se mueve con velocidad constante, ¿cuál es la trayectoria de la piedra para un observador que mire el espectáculo desde el puerto, y para quien la arroja desde el mástil? ¿Cuál es la "verdadera" trayectoria?

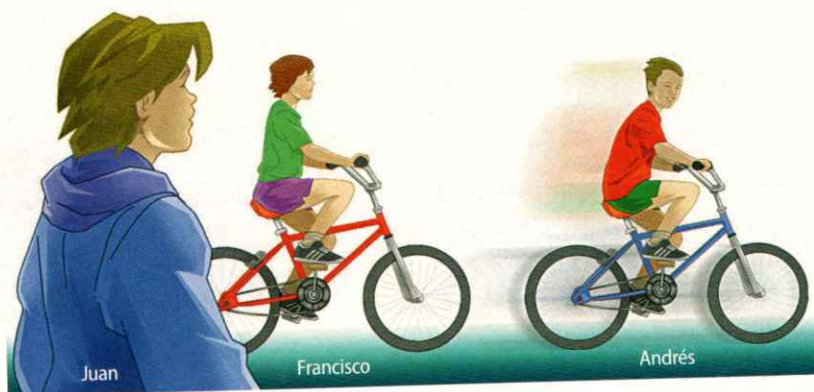
En la base de un edificio cercano al nivel del mar, **Michelson y Morley** construyeron lo que se conoce como el interferómetro de Michelson. Se compone de un espejo semiplatado, que divide la luz monocromática en dos haces que viajan en un determinado ángulo el uno con respecto al otro. Al abandonar la división, cada haz se refleja varias veces entre dos espejos (para que tengan más recorrido o camino óptico). Finalmente se vuelven a unir, creando un patrón de interferencia que depende de la velocidad de la luz en los dos brazos del interferómetro. Cualquier diferencia en esta velocidad (provocada por la diferente dirección de movimiento de la luz con respecto al movimiento del éter) sería detectada.



Interferómetro.

Transformaciones de Galileo y de Lorentz

Juan y Francisco, representados en el dibujo, intentan calcular la velocidad de Andrés, mientras éste circula con su bicicleta. Para ello, ambos deberán determinar los valores de otras dos magnitudes: los cambios en su posición, o sea, el desplazamiento, y el tiempo empleado. Si los dos observadores están en reposo relativo uno respecto del otro, no deberían existir diferencias en las mediciones, siempre que se realicen con el debido cuidado. Pero si Francisco se está moviendo respecto de Juan, también en bicicleta, a 20 km/h con relación al piso, por ejemplo, podría suceder que cada uno de ellos se tome a sí mismo como referencia para realizar las mediciones de la velocidad de Andrés. En este caso, sus resultados no coincidirían.



Para Juan, $\Delta x_A = v_A \cdot \Delta t$; si además se supone que $x_{0A} = t_0 = 0$ se obtiene:

$$x_A = v_A \cdot t$$

donde v_A es la velocidad de Andrés y x_A la distancia recorrida por él en el tiempo t .

También puede anticipar lo que mide Francisco (v'_A) mediante las siguientes correcciones:

$$v'_A = v_A - 20 \text{ km/h}$$

donde v'_A es la velocidad de Andrés medida por Francisco.

Por lo que, asumiendo que el tiempo medido por Juan y Francisco es el mismo para ambos observadores, es decir, $t = t'$,

$$v'_A \cdot t = v_A \cdot t - 20 \text{ km/h} \cdot t \quad \text{o bien:} \quad x'_A = x_A - 20 \text{ km/h} \cdot t$$

donde v_A y x_A son la velocidad y la distancia recorrida medidas por Juan, v'_A y x'_A son las medidas de Francisco y t es el tiempo empleado.

El conjunto de estas ecuaciones se conoce como **Transformaciones de Galileo**, y relaciona la medida de una misma magnitud desde dos sistemas de referencia. En general, pueden escribirse de la siguiente manera.

Las coordenadas de posición x' , medidas desde un referencial con velocidad constante V respecto de otro considerado en reposo, donde se determina x , son:

$$x' = x - V \cdot t$$

La velocidad de un objeto medida desde el referencial considerado en movimiento relativo es:

$$v' = v - V$$

No hay diferencia entre los tiempos medidos por los dos observadores en movimiento relativo.

$$t' = t$$

Francisco también podría conocer los registros de Juan utilizando las inversas de estas ecuaciones, igualmente válidas que las anteriores.

Las ecuaciones Maxwell para el electromagnetismo predicen que la velocidad para cualquier onda electromagnética, como la luz o las ondas de radio, es la misma y está determinada por las características eléctricas y magnéticas del medio por el que viaja. En el vacío dicha velocidad es $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Como se ha dicho, esta velocidad había sido ya medida por distintos métodos basados en razonamientos mecánicos, suponiendo un sistema de referencia absoluto: el espacio, al cual se lo concebía lleno de una hipotética sustancia llamada éter. De esta manera, diferentes observadores que se movieran con relación al éter verían acercarse o alejarse la luz con velocidades distintas de c , siempre que la velocidad de ésta con respecto al éter permaneciera fija. Los cuidadosos experimentos realizados en 1887 por A. Michelson y E. W. Morley para medir tal diferencia fracasaron sistemáticamente: la velocidad de la luz era la misma, aun cuando el observador se moviera con distintas velocidades respecto de ella.

El físico y matemático holandés Hendrik Lorentz (1853-1928) intentó a principios del siglo XX interpretar estos resultados experimentales realizando una modificación a las transformaciones de Galileo antes explicadas.

Es decir que, para determinar posiciones, velocidades y tiempos desde un sistema que se mueve con velocidad constante V con respecto a otro, hay que utilizar las siguientes ecuaciones que son llamadas las **Transformaciones de Lorentz**:

$$x' = \frac{x - V \cdot t}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad v' = \frac{v - V}{1 - v \frac{V}{c^2}} \quad t' = \frac{t - \frac{V \cdot x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, t y t' son los tiempos dados en los dos sistemas, x y x' son las posiciones en ambos sistemas, y V es la velocidad constante con que se mueve un sistema respecto del otro.

En este caso, los tiempos medidos por dos observadores en movimiento relativo con velocidad V no son iguales.

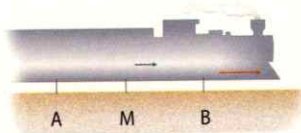
1. Escriban las inversas de las ecuaciones de Lorentz; tengan en cuenta que $V' = -V$.

2. ¿Por qué puede decirse que las ecuaciones de Lorentz son las mismas que las de Galileo para velocidades relativas bajas?





■ Einstein envió en 1905, como tesis doctoral, un artículo a la Universidad de Zurich, además de finalizar los otros tres que revolucionarían la ciencia. Su título era *Una nueva determinación de los tamaños de las moléculas*, problema que por entonces había sido abordado, con otros métodos, por varios investigadores. Este mismo trabajo había sido rechazado como tesis doctoral en 1901 por considerárselo demasiado breve, por lo que Einstein lo reenvió en 1905, después de agregarle solo una línea. Así fue aceptado y ese año obtuvo su doctorado. Las Naciones Unidas declararon a 2005 como "El año mundial de la Física" para celebrar el centenario de aquél en que Einstein produjera desarrollos tan importantes para esta ciencia.



Cuando dos puntos A y B en los extremos de un andén, encuentran que la simultaneidad es un fenómeno relativo, se destruye la idea del tiempo absoluto.

Relatividad especial

En el año 1905 Albert Einstein (1879-1955) era un joven físico que ocupaba un puesto técnico en la Oficina de Patentes de Berna, donde trabajaría hasta 1909. Desde ese modesto cargo, logró publicar tres artículos científicos que conmovieron el supuestamente sólido y completo edificio de la física. El primero trataba sobre el efecto fotoeléctrico, el segundo sobre una aplicación de la teoría cinético molecular al movimiento browniano, y el restante, sobre lo que un poco más tarde se llamaría la **teoría de la relatividad especial**.

En el último de esos artículos planteaba que:

(...) el fracaso de las experiencias destinadas a revelar el movimiento de la Tierra con respecto al medio en que se propaga la luz, hace sospechar que al concepto de reposo absoluto no corresponde ninguna propiedad de los fenómenos no solo en la Mecánica sino tampoco en la Electrodinámica. (...) Queremos llevar esta suposición, cuyo contenido llamaremos en adelante 'Principio de Relatividad' a la categoría de hipótesis; introduciendo además otra solo en apariencia inconciliable con ella, a saber: que la luz se propaga en el vacío siempre con una velocidad independiente de la velocidad de la fuente que la emite.

En los párrafos anteriores están contenidos los dos postulados de la teoría de la relatividad que, aplicados a las categorías fundamentales a partir de las cuales se explican los fenómenos cotidianos, tuvieron consecuencias impredecibles. Por ejemplo, implicaron cambios fundamentales en lo que debemos entender por la medida de la longitud de un cuerpo o la duración de un acontecimiento.

Estos postulados son:

- las leyes de la naturaleza tienen formulación matemática equivalente para todos los observadores que se muevan entre sí con velocidad constante;
- la velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, independientemente de su movimiento.

Simultaneidad

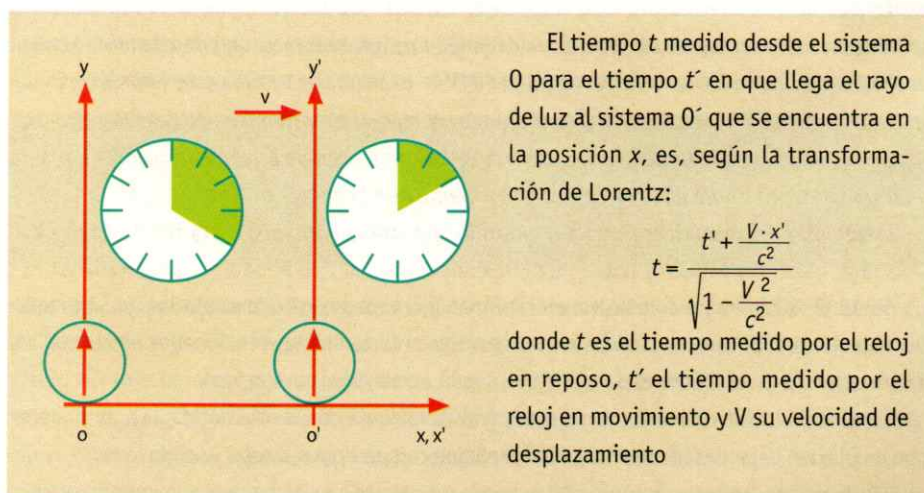
Es posible imaginar, a partir de un ejemplo propuesto por el mismo Einstein, que dos rayos caen simultáneamente en los lugares A y B, pero, ¿qué tipo de observaciones podrían hacerse para determinar, sin lugar a dudas, si en un caso concreto, dos sucesos, como la caída de rayos en dos puntos, son simultáneos o no? Para dar una respuesta experimental a esta pregunta podría pensarse en colocar un observador en M, a mitad de distancia entre A y B, dotado de dos espejos en ángulo con los que lograría juzgar la simultaneidad por los rayos reflejados, si es que llegan hasta él al mismo tiempo. La observación coincidente permite definir la simultaneidad de los sucesos.

Se supone ahora que los puntos A y B son los extremos de un andén (suficientemente largo) y que el suceso simultáneo es referido a un punto M', inicialmente coincidente con M, y que se mueve con velocidad v ya que está sobre un tren. Si el observador en M registra, como en el caso anterior, la llegada de la luz a M', verá que este punto avanza hacia uno de los rayos a medida que se aleja del otro. Por lo tanto, para un observador en M, el punto M' es alcanzado antes por la luz de un extremo que por la del otro. Sucesos simultáneos respecto del andén no lo son respecto del tren en movimiento. La simultaneidad es un suceso relativo. Este hecho es de fundamental importancia si se tiene en cuenta que éste y no otro es el concepto que utilizamos para medir el tiempo y las longitudes. Ni el intervalo temporal ni el espacial son independientes del movimiento del cuerpo de referencia.

Dilatación del tiempo y contracción de las longitudes

Para determinar lo que se dio en llamar **dilatación del tiempo**, es posible realizar el siguiente experimento: se toman dos relojes idénticos y sincronizados, o sea, en donde se ha controlado que las idénticas posiciones de las agujas de ambos sean siempre sucesos simultáneos. Uno de ellos se deja en tierra midiendo el tiempo t y el otro se sube a un móvil que tiene una velocidad V respecto del primero y que medirá tiempos t' . No hay por qué suponer a priori que estos tiempos serán distintos. Se envía una señal luminosa desde la posición del reloj en reposo hacia el reloj móvil que se encontrará a una distancia x en un tiempo t' .

Lo que se mide entonces es el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer la distancia x , como muestra la figura:



Como el reloj está ubicado en el origen de coordenadas, $x' = 0$. Esto significa que los tiempos medidos por relojes idénticos de un mismo suceso no son iguales; desde un referencial en reposo relativo, el intervalo de tiempo medido para un suceso en movimiento relativo respecto de él es más largo que el que sería medido desde ese referencial para el mismo evento. Los relojes en reposo marchan más rápido que los que están en movimiento.

La dilatación temporal se relaciona con otro fenómeno: **la contracción de las longitudes**. Si se desea medir una varilla, la medición de esta longitud se apoya en la idea de simultaneidad, ya que al mismo tiempo se determina la posición de ambos extremos. Esta longitud puede ser llamada **longitud propia** y es, entonces, aquella que se mide cuando el objeto está en reposo.

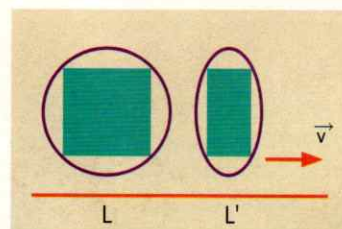
Ahora bien, la situación cambia cuando se considera la varilla en movimiento. La varilla de longitud L medida en la Tierra se sube a un móvil y se alinea con la dirección de la velocidad constante de éste, como se muestra en la figura.

Como se ha visto, dos sucesos simultáneos dejan de serlo cuando se los observa desde dos referenciales en movimiento relativo, por lo tanto, basándonos en la constancia de la velocidad de la luz se tiene: $c = \frac{L}{t}$ y $c = \frac{L'}{t'}$, como $t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$; la longitud medida en el sistema en movimiento es:

$$L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

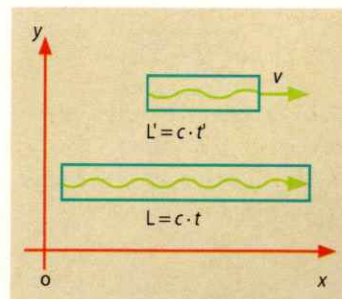
donde L y L' son dos longitudes en los referenciales en movimiento relativo.

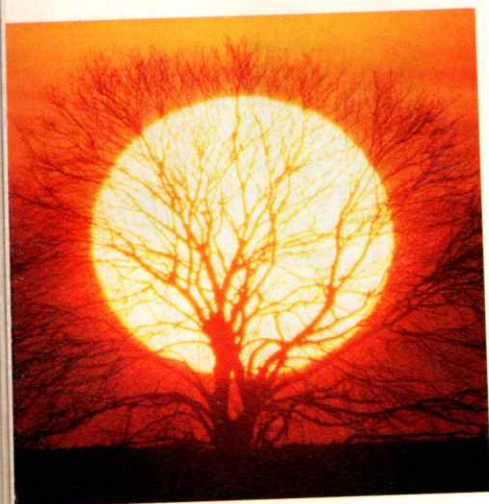
Es decir, la longitud es menor si la mide quien ve moverse a la varilla.



La contracción sucede solo en el sentido del movimiento.

Gracias a la gran precisión que puede alcanzarse con los relojes atómicos (del orden de 10^{-14}) fue posible realizar en 1971 una primera comprobación experimental de la dilatación del tiempo con este instrumental, ubicando relojes de esta tecnología, uno en tierra, en el Observatorio Naval de los EE UU en Washington, y otro en un avión jet. Después de un vuelo prolongado alrededor de la Tierra, se comprobó el retraso en uno de los relojes.





En el Sol, como en cualquier estrella de su tipo, el proceso que explica la enorme radiación de energía es la fusión de hidrógeno para formar helio. En este proceso, aproximadamente un 0,5 % de la masa de las partículas que intervienen en la fusión se transforma en energía. En 1920, de manera casi profética, **Arthur Eddington** (1882-1944), astrofísico inglés, escribía: (...) *la masa de un átomo de helio es menor que la masa de los cuatro átomos de hidrógeno que la forman (...)* Ahora bien, la masa no puede aniquilarse, y el déficit solo puede representar la energía liberada en la transmutación (...). Si, realmente, la energía subatómica es utilizada libremente en las estrellas para mantener sus grandes hogueras, se ve un poco más cercano el cumplimiento de nuestro sueño de controlar este poder latente para el beneficio de la raza humana, o para su suicidio.

Equivalencia masa-energía

En 1897, Joseph John Thompson descubrió el electrón, partícula negativa constituyente de los átomos. A partir de entonces, comenzaron los esfuerzos para medir el valor de su carga y de su masa. Las primeras mediciones realizadas solo podían aspirar a encontrar el valor de la relación entre ellas (e/m) y sorprendentemente, mostraron variaciones en la resistencia de las partículas a la acción de las fuerzas exteriores que las desviaban: a mayor velocidad, la relación e/m disminuía. O sea, mostraban una inercia mayor. Para interpretar este fenómeno se realizaron múltiples intentos, siempre dentro del marco de la teoría clásica. En forma independiente, los trabajos de Einstein obligaban a la reformulación radical de los conceptos descriptivos de la cinemática clásica y a relativizar algunos conceptos considerados absolutos, como el de la conservación de la energía. Sin embargo, esto no es necesario si se realizan algunas modificaciones, como aceptar que la masa de un cuerpo en reposo respecto de quien lo mide (m_0) no es igual a la masa (m) de este mismo cuerpo cuando se encuentra en movimiento respecto de él. La relación que expresa esta variación es:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde v es la velocidad constante y c la velocidad de la luz.

En 1908, Bücherer produjo la primera confirmación experimental de esta ecuación al comprobar que se ajustaba a los resultados experimentales anteriormente mencionados en cuanto a la disminución de la relación e/m de electrones según aumentaba su velocidad.

La relativista de la masa, si bien no es evidente en eventos cotidianos, es un hecho que no pueden dejar de lado los físicos que trabajan con partículas de alta energía.

Einstein propuso, además, que este aumento en la masa consecuente al aumento de su energía cinética permitía entender a la masa de un cuerpo como una medida total de su energía. En sus propias palabras: *La teoría de la relatividad deduce de sus suposiciones fundamentales (...): toda forma de energía se resiste al cambio de movimiento; es decir, la energía se comporta como la materia*. Si E es la energía total de un cuerpo, es posible enunciar:

$$E = m \cdot c^2$$

donde m es la masa del cuerpo y c la velocidad de la luz.

Esta fórmula postula la equivalencia entre la masa y la energía. Esta ecuación, expresada según la masa relativista, adquiere la forma:

$$E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Por lo tanto, existe energía aun para la masa en reposo ($v = 0$) y vale:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

Si se considera que la energía total del cuerpo es la suma entre su energía en reposo más su energía cinética, se obtiene:

$$E = m \cdot c^2 \Rightarrow m \cdot c^2 = E_0 + E_c \Rightarrow E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$$

o bien: $E_c = m_0 \cdot c^2 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right]$ y no la conocida expresión $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$.

Relatividad general

El principio de equivalencia

En el capítulo 3 se presentó el principio de inercia: *los cuerpos conservan constante su velocidad a menos que una fuerza actúe sobre ellos.*

Este principio es uno de los conceptos clave para la organización teórica de la Física, y es posible comprenderlo mejor con un sencillo ejemplo. Si un automóvil marcha con velocidad constante, el principio de inercia explica que dentro de la cabina, todo sucederá como si se estuviera en reposo con respecto al piso. De esta manera no resultaría demasiado difícil realizar una tarea como la de cebar mate, que requiere que un chorro de agua caiga en un lugar preciso de un recipiente. Este tipo de **sistemas** se llaman **inerciales**, y no existen argumentos para decidir en forma absoluta si están en movimiento o en reposo, ya que las leyes físicas se cumplen igualmente en ambos casos. Ahora bien, si suponemos que el auto acelera, se notará un cambio en el comportamiento de la caída del agua, que permite decidir que es el auto el que está acelerado respecto de la Tierra considerada en reposo, ya que el principio de inercia se cumple solo para sistemas inerciales, y un sistema como el auto, acelerado respecto a un sistema inercial, ya no lo es. Pero, en un análisis más detallado, como la Tierra en rotación está acelerada, tampoco podría considerarse inercial en un sentido estricto.

Einstein propuso que la raíz del problema reside en haber postulado que las leyes de la naturaleza solo tienen validez para un tipo especial de sistemas, los inerciales. Postuló que es posible formular las leyes físicas de manera que sean válidas para todos los sistemas, es decir, no solo para los que se mueven en forma uniforme unos respecto de los otros. Es lo que enuncia la llamada **teoría de la relatividad general**; el nombre de relatividad restringida se reserva para la especial, que se aplica solo a sistemas inerciales.

Uno de los principios básicos de esta teoría es el **Principio de equivalencia**:

Los fenómenos físicos que tengan lugar en sistemas acelerados o en campos gravitatorios son equivalentes. No existe ningún experimento que permita distinguir entre un campo gravitatorio uniforme y un sistema de referencia acelerado.

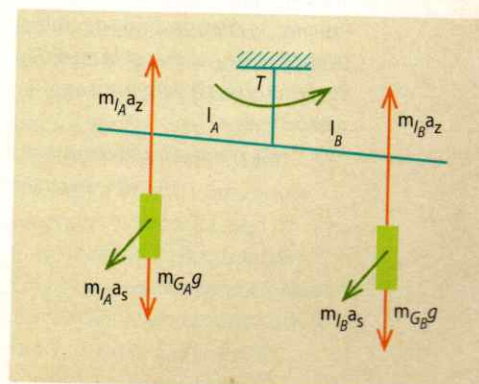
Por ejemplo, en una nave que orbita la Tierra, tanto ella como todos los objetos que están en su interior caen con la misma aceleración, hecho que explica la mecánica clásica. La fuerza gravitatoria, proporcional a la masa gravitatoria, encuentra la resistencia de la masa inercial, por lo que todos los cuerpos, incluida la nave, caen con igual aceleración. Es entonces imposible detectar la existencia de cualquier campo gravitatorio en su interior, donde prevalecen, por este motivo, condiciones llamadas de **ingravidez**. Todos los cuerpos dentro de ella cumplen con la ley de inercia, por lo que puede considerarse un sistema inercial local.

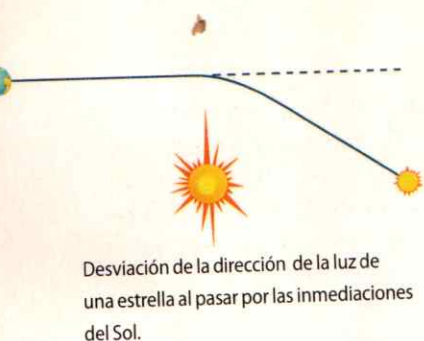
Si se enciende un cohete que aleje a la nave de la Tierra con aceleración constante, el campo gravitatorio terrestre se irá debilitando. Sin embargo, si se suelta un objeto en su interior, éste se dirigirá en sentido opuesto a la aceleración de la nave como si se desplazase debido a un campo gravitatorio propio de la nave.

El efecto es similar al que ocurriría en un micro en el que se ha colocado una pelota en el piso. Si la pelota comienza a rodar hacia la parte trasera del vehículo y no se mira hacia afuera sino que solo se presta atención a lo que le ocurre a la pelota, no se puede determinar si comenzó a moverse porque el micro aceleró, o porque comenzó a subir una barranca, provocando que la pelota fuese impulsada por el campo gravitatorio.



El barón **Von Eötvös** (1848-1919), físico húngaro, realizó un experimento con una balanza de torsión para verificar si había alguna diferencia entre la masa gravitatoria y la masa inercial. Su experimento constaba de una barra horizontal con dos bolas en sus extremos, de distintos materiales, suspendida de un hilo muy fino. Las bolas estaban sujetas a dos fuerzas: la gravitatoria, dirigida hacia el centro de la Tierra, y la centrífuga, consecuencia de la rotación terrestre, dirigida hacia afuera. La balanza que las soportaba estaba en equilibrio con respecto al observador y cualquier pequeña diferencia en la proporcionalidad entre las fuerzas gravitatoria e inercial se traduciría en una rotación de la balanza y un consiguiente retorcimiento del hilo que sostenía la barra horizontal. La bola de masa mayor experimentaba una fuerza gravitatoria también mayor, pero por su mayor inercia se debía acelerar menos. Solo si estos efectos se compensaban, el hilo no se retorcería; en caso contrario, la torsión podría ser un indicador de la diferencia entre la masa inercial y la gravitatoria. Eötvös había calculado que podía ser detectada una diferencia de 0,0000005 %, por lo que la equivalencia entre las masas quedó probada hasta ese límite, al no verificarse ninguna torsión.





Desviación de la dirección de la luz de una estrella al pasar por las inmediaciones del Sol.

En este texto Einstein hace referencia a la confirmación de su predicción de la deflexión de la luz:

Hemos de agradecer a la Astronomical Royal Society la constatación de este importante resultado. Sin dejarse turbar por la guerra ni por las circunstancias de índole psicológica, envió a varios de sus astrónomos más destacados (Eddington, Crommelin, Davidson) y organizó dos expediciones con el fin de hacer las fotografías pertinentes durante el eclipse de Sol del 29 de mayo de 1919 en Sobral (Brasil) y en la isla Príncipe (África occidental). Las desviaciones relativas que eran de esperar entre las fotografías del eclipse y las de referencia ascendían tan solo a unas pocas centésimas de milímetro. Así pues, las demandas que se impusieron a la precisión de las fotografías y a su medición no eran pequeñas. El resultado de la medición confirmó la teoría de manera muy satisfactoria.

Albert Einstein, *Teoría de la relatividad especial y general*.

Confirmación experimental de la Teoría de la relatividad general

En las ciencias fácticas, la experiencia es el mejor juez para determinar la aceptación de una teoría. De cada nueva teoría, además, se espera que avale lo que otras explicaron con anterioridad, y aún más.

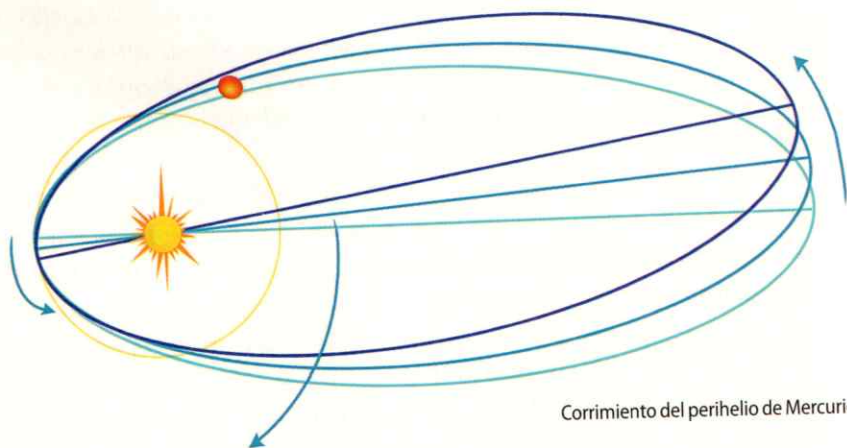
La Teoría de la relatividad muestra una profunda concordancia entre las predicciones de sus postulados y las de la Física clásica, a pesar de la gran diversidad en los supuestos básicos de una y otra. La prueba experimental que avala la mecánica clásica también es, de esta manera, garantía de la relatividad general. Sin embargo, esta última explicó algunos fenómenos que no podían ser comprendidos desde el modelo clásico, y predijo la observación de otros.

Por ejemplo, la mecánica newtoniana, cuya validez había quedado probada de forma sorprendente en su aplicación al movimiento planetario, no podía explicar el corrimiento del perihelio (posición de máxima aproximación al Sol) del planeta Mercurio.

La teoría gravitacional de Newton sostiene que un planeta alrededor del Sol se mueve describiendo una elipse. La distancia del planeta al Sol oscila entre una mínima, llamada perihelio, y otra máxima, que se conoce como afelio. Si la acción del Sol se perturba -por la presencia de otros planetas, por ejemplo-, la trayectoria no se ajusta exactamente a una elipse, y el perihelio se corre un poco, vuelta tras vuelta. Tal efecto es más fácil de observar en el planeta Mercurio, ya que su movimiento es rápido, su órbita es excéntrica y es más notable el perihelio.

Entre los cálculos de los astrónomos de la segunda mitad del siglo XIX que midieron este corrimiento usando la mecánica newtoniana, y las observaciones efectuadas al planeta Mercurio, se encontró una diferencia de 43 segundos de arco por siglo. Se argumentó entonces que un planeta aún desconocido era el responsable de tal diferencia.

La explicación según la teoría de la relatividad de Einstein es la curvatura de la trayectoria del planeta en las proximidades del Sol debido a la curvatura del espacio por la acción gravitatoria de la estrella, que daría la diferencia señalada.



Corrimiento del perihelio de Mercurio.

Otra prueba, que resultó fundamental para la aceptación de esta teoría, fue su predicción de la desviación de un rayo luminoso al atravesar un campo gravitatorio, es decir que hasta la luz sufre la atracción gravitatoria. Einstein sugirió que era posible observar la desviación de la luz de una estrella lejana que pasara cerca del Sol. Durante un eclipse, se podrían fotografiar las estrellas situadas en sus inmediaciones; las imágenes de las estrellas así obtenidas debían estar desplazadas respecto de sus posiciones determinadas en otro momento, cuando el Sol no se encuentra en el camino de la luz que emiten. Este efecto fue comprobado durante el eclipse de Sol de 1919, cuando se midió un desplazamiento compatible con las predicciones de la Teoría de la relatividad.

Física cuántica

Ya se ha visto cómo, durante los primeros años del siglo XX, se produjo una crisis y reorganización en la Física, que se centró en la articulación entre los modelos de la mecánica y el electromagnetismo clásicos. Esta última teoría también resultó reformulada a partir de los intentos por solucionar algunos puntos oscuros, como la explicación del efecto fotoeléctrico, y de los espectros de emisión de los gases y el análisis espectral de la radiación emitida por los cuerpos a medida que aumentan su temperatura. Las explicaciones a estos fenómenos obligaron, como en el caso de la mecánica, a la reformulación de los conceptos fundamentales de la teoría electromagnética, y dieron origen a una teoría más general conocida como **Teoría cuántica**.

Los enunciados de la teoría cuántica se han constituido en pilares fundamentales para la Física actual. En ella se conjugan las nuevas y revolucionarias ideas desarrolladas durante la primera mitad del siglo XX. Su aplicación resulta indispensable en la investigación de los fenómenos que suceden a nivel atómico. También es aplicable a numerosas tecnologías que se han desarrollado a partir de su modelo teórico.

Su nombre alude a una discontinuidad fundamental en la naturaleza: tanto la materia, compuesta por partículas fundamentales, como la energía irradiada, son discontinuas. Las distintas variables físicas, en apariencia continuas, revelan su discontinuidad en observaciones más minuciosas.

Estas porciones indivisibles, **quantum** o **cuantos**, se hicieron indispensables para la elaboración del modelo teórico general capaz de explicar las evidencias experimentales. Por ejemplo, la "cuantización" del supuesto fluido eléctrico debió aceptarse al descubrir el electrón, portador de la menor cantidad de carga eléctrica presente en la naturaleza.

Hacia fines del siglo XIX, dos leyes intentaban explicar la forma en que la materia absorbe o emite energía: la Ley de Wien y la Ley de Rayleigh-Jeans. Ambas eran incompletas para describir el proceso para uno de los extremos del espectro electromagnético: la primera fallaba para las frecuencias bajas y la segunda, para las altas, ya que pronosticaba que toda la energía de un cuerpo que se calienta se manifestaría bajo la forma de rayos ultravioletas, luego X, y más tarde gamma.

El físico alemán Max Planck, en el año 1900, postuló la hipótesis de los cuantos, lo que impuso una corrección a las leyes anteriores para ajustarlas a las observaciones en todo el espectro de frecuencias. Planteaba que la materia solo puede emitir energía en cantidades discretas cuyo valor está dado por la expresión:

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

donde h es una constante de proporcionalidad propuesta por Planck (que lleva su nombre) cuyo valor es $6,64 \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{s}$, y ν es la frecuencia de la radiación.

De esta manera se acepta que la energía se irradia en cantidades discretas o cuantos de energía, que toman valores distintos según la frecuencia de radiación.

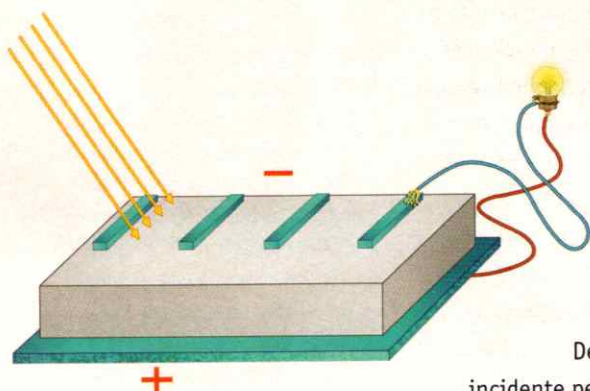
Esta suposición de discontinuidad en la energía parecía difícil de aceptar por el sentido común y aun el propio Planck luchó por modificar su propia teoría antes de aceptar su validez.

El físico austriaco **Paul Ehrenfest**, a través de una lectura de sentido común a la Ley de Rayleigh, captó su imposibilidad y la ridiculez de sus predicciones para las altas frecuencias. Esto puede comprobarse fácilmente sentándose frente a una estufa en un día frío; si esta teoría fuese cierta, esta acción se convertiría en una verdadera catástrofe. Por eso Ehrenfest llamó a estos pronósticos "la catástrofe ultravioleta". Este nombre resultaba tan descriptivo del hipotético fenómeno como de lo grave del error en que la teoría electromagnética había sido hallada.



Al propio **Planck** le costó asumir la realidad de sus hipótesis tan radicales acerca de la forma en que la materia interactúa con la radiación. Sus palabras dicen lo difícil que fue incluso para él aceptar la cuantización de la energía: *Mis vanos intentos de ajustar el quantum elemental de acción (h) en alguna forma a la teoría clásica siguieron durante varios años y me costaron un gran esfuerzo.*

Efecto fotoeléctrico



Fotoceldas.

Un dispositivo capaz de aprovechar el efecto fotoeléctrico para producir electricidad a partir de luz se denomina **célula o celda fotovoltaica**. Hoy se utiliza comúnmente para distintos fines prácticos: alarmas, aperturas electrónicas de puertas, fotómetros y, dentro y fuera de la atmósfera, para convertir en energía eléctrica la energía proveniente del Sol. Las celdas solares fotovoltaicas se fabrican principalmente con materiales semiconductores, como el silicio. Hoy en día, la búsqueda de estrategias de solución a la crisis energética mundial ha potenciado la investigación de estas celdas solares, y se trata de mejorar los diseños para volverlos más sustentables en términos económicos.

Existen numerosos procedimientos para extraer algunos electrones de los átomos. Uno de ellos, llamado **efecto fotoeléctrico**, consiste en hacer llegar luz monocromática hasta una placa metálica que en algunos casos pone inmediatamente en libertad electrones, los cuales pueden ser detectados en forma de una corriente eléctrica cuando son sometidos a una diferencia de potencial adecuada.

La aplicación del principio de conservación de la energía permite enunciar que la energía de la luz incidente es transformada en energía cinética de los electrones extraídos del metal.

De acuerdo con la teoría electromagnética, si se varía la intensidad de la luz incidente pero no su frecuencia, se debería registrar un aumento en la energía cinética de los electrones. La experiencia contradice esta deducción surgida de la aplicación de la teoría ondulatoria. Los resultados experimentales podrían resumirse en los siguientes puntos.

- El efecto fotoeléctrico solo se manifiesta cuando se supera un cierto umbral de frecuencia ν_0 , que depende del metal iluminado. Es decir, si se ilumina el metal con luz de menor frecuencia, no emite electrones.

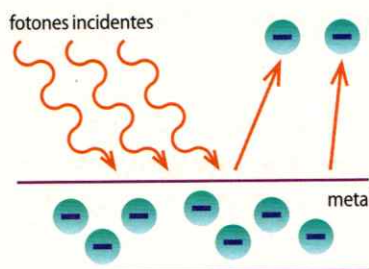
- Para una misma frecuencia, el número de electrones emitidos crece con el aumento de la intensidad luminosa, pero su energía cinética permanece constante.

- A partir de la frecuencia umbral, la energía cinética de los electrones aumenta en forma proporcional a la frecuencia de la luz incidente.

Si bien la fotoelectricidad fue descubierta por Heinrich Hertz en 1887, la explicación del efecto fotoeléctrico recién fue efectuada por Albert Einstein en 1905. Einstein explicó el efecto fotoeléctrico suponiendo que la cuantificación de energía, propuesta por Planck para la emisión de radiación, también era válida para describir su propagación a través del espacio. Podía suponerse que la luz estaba formada por haces de cuantos de energía llamados **fotones**. Cada fotón tiene una cantidad de energía dada por la expresión: $E = h \cdot \nu$. Al incidir sobre el metal, esta energía es comunicada a un solo electrón, el cual invierte una cierta cantidad de energía (E_u) en desprenderse del metal, quedando el resto en forma de energía cinética del electrón (E_c).

Por lo tanto:

$$h \cdot \nu = E_u + E_c$$



La energía E_u explica por qué existe una frecuencia umbral ν_u que comunica solo la energía suficiente para liberar al electrón del material, pero sin que disponga de energía cinética extra. Esta cantidad E_u se llama **función de trabajo** y depende de cada material.

Espectros de emisión y absorción. Modelo de Bohr

El físico escocés Thomas Melvill observó en 1752 que el espectro de luz emitido por gases incandescentes era distinto de los espectros continuos emitidos por sólidos y líquidos. Al hacer pasar la luz que emitían por un orificio y luego por un prisma, no obtuvo una sucesión continua de colores sino manchas, cada una de un color, separadas por espacios oscuros. Si se hace pasar esta luz por delgadas rendijas, se obtienen los llamados **espectros de líneas de emisión**, distintos para cada tipo de gas.

En el siglo XIX, el físico alemán Gustav Kirchhoff observó que, haciendo pasar la luz blanca emitida por un sólido a alta temperatura, por una masa de gas a menor temperatura, podían observarse líneas negras en el espectro. Parecía que los distintos gases podían absorber luz de determinadas longitudes de onda, por lo que a estos espectros se los llamó **espectros de absorción**.

La técnica desarrollada para identificar distintos gases mediante su espectro se denominó **espectroscopia**, la cual, a pesar de experimentar un desarrollo muy importante, permanecía como un fenómeno sin explicación. Algunos científicos comenzaron a buscar relaciones numéricas entre las longitudes de onda de las líneas espectrales, como el científico suizo Johann Balmer (1825-1898), quien planteó la fórmula sencilla para expresar los valores correspondientes a las líneas espectrales del hidrógeno en la zona visible:

$$\lambda = b \cdot \left[\frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right]$$

donde $b = 364,46 \text{ nm}$, es una constante determinada empíricamente por Balmer, y n es un número entero mayor que 2 y distinto para cada línea.

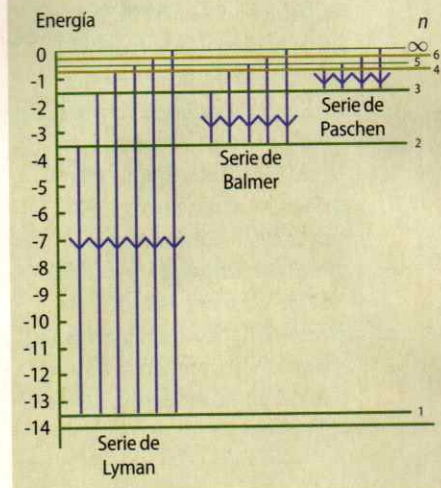
Así, por ejemplo, para $n = 3$ el hidrógeno emite una línea en $\lambda = 656,2 \text{ nm}$. Esta fórmula empírica predecía bien la ubicación de las líneas, pero no las explicaba.

Desde el descubrimiento del electrón como partícula fundamental y del núcleo por parte de Ernest Rutherford en 1911, el modelo atómico había llegado a una contradicción con la teoría clásica del electromagnetismo: un electrón que girara alrededor del núcleo debía emitir energía en forma de ondas electromagnéticas, lo cual lo haría caer rápidamente sobre el núcleo, es decir, el modelo atómico era inestable.

En 1913, Niels Bohr realizó una interpretación teórica de las líneas del espectro del hidrógeno, fundada en las ideas cuánticas, además de corregir el modelo atómico anterior volviéndolo estable. Supuso que en el átomo de hidrógeno existen ciertos estados estacionarios. Mientras el electrón se mantiene en uno de ellos, no irradia energía. La emisión de energía se produce cuando el electrón pasa de un estado de energía E_i hasta otro estado de energía menor E_f . Es decir, la emisión correspondiente es:

$$h \cdot \nu = E_i - E_f$$

La cantidad $h \cdot \nu$ es el cuanto de energía que lleva el fotón emitido durante la transición entre los dos estados. Estas frecuencias posibles dependen de los estados estacionarios en los que puede existir el átomo de hidrógeno.



Cuando un electrón pasa de un nivel superior a uno inferior, se emite un fotón cuya energía es igual a la diferencia entre las energías de esos dos niveles. Como la frecuencia es proporcional a esa diferencia de energías, a cada posible salto le corresponde una frecuencia. Esta gama de frecuencias da el espectro característico del hidrógeno.



**Louis Victor Pierre
Raymond** duque de

Broglie, nació el 15 de agosto de 1892 en Dieppe, Francia. En su tesis doctoral de 1924, propuso su teoría sobre la dualidad onda-partícula, por la que obtuvo el premio Nobel en 1929. Escribió muchos trabajos ampliamente reconocidos, incluyendo aquellos que demuestran su interés en las implicaciones filosóficas de la Física moderna: *La nueva Physics* (1939); *La revolución en Physics* (1953); *Physics y la Microphysics* (1960); y *Nuevas perspectivas en Physics* (1962). De Broglie murió en París, el 19 de mayo de 1987. Se había definido a sí mismo como una persona de mente más proclive a la teoría pura que a la experimentación o a la ingeniería, con una mayor tendencia a asumir visiones especialmente generales y filosóficas.

En forma esquemática, los postulados de Bohr para el átomo de hidrógeno son los siguientes.

- El electrón orbita al núcleo.
- El electrón solo se mueve en órbitas permitidas sin irradiar energía electromagnética. De esta forma su energía total permanece constante.
- La emisión o absorción de energía radiante se realiza cuando el electrón pasa de una órbita a otra.

Este modelo, que aplicó por primera vez la idea de cuantificación de la energía, pudo explicar los espectros de emisión del hidrógeno y justificar la estabilidad del átomo. Fue un paso muy importante en la construcción de los modelos atómicos desarrollados posteriormente.

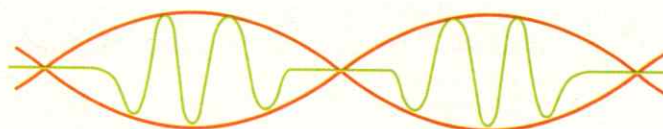
Las ondas de materia

Como Albert Einstein y Leopold Infeld reconocen en su libro *La evolución de la Física*:

(...) ha sucedido a menudo que el desarrollo de una analogía entre fenómenos aparentemente sin relación, ha dado origen a un verdadero progreso de la misma. (...) Es fácil, sin embargo, encontrar analogías superficiales, que en realidad no expresan nada; pero descubrir ciertas propiedades comunes escondidas bajo superficies exteriores de aspectos diferentes y formular, sobre esta base, una teoría nueva, constituye un trabajo de creación de un gran valor. El desarrollo de lo que se llama mecánica ondulatoria, que fue iniciado por De Broglie y Schrödinger (...) es un ejemplo típico del alcance de una analogía feliz y profunda que da origen a una importantísima teoría física.

Louis Victor de Broglie (1892-1987) presentó en 1924 su tesis *Investigación de la teoría de los cuantos*, donde sugería que así como los fotones pueden ser considerados corpúsculos, la recíproca podía ser válida. O sea, la materia también debía poseer propiedades ondulatorias y comportarse como ondas. De esta manera proponía asociar a todo cuerpo una onda de longitud $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$, donde h es la constante de Planck y $m \cdot v$ la llamada cantidad de movimiento, que es el producto de la masa por la velocidad de un cuerpo.

Sin embargo, es necesario hacer la siguiente aclaración: un cuerpo puede ser descrito como una onda, siempre que ésta no sea una onda monocromática única sino un conjunto de ondas. Una onda única se extiende de manera ilimitada en el espacio, por lo tanto no resulta aplicable a la descripción de un objeto que tiene una determinada ubicación en cada instante. Es necesario entonces asignarle un paquete de ondas superpuestas que se desplazan a velocidades ligeramente diferentes. Las compensaciones entre sus crestas y valles determinan el paquete que, en el modelo presente, se desplaza a la velocidad del corpúsculo y puede asociarse a él.



Paquete de ondas de Borglie.

Las ideas de De Broglie fueron presentadas por Einstein en el célebre congreso de Solvay, en 1924.

Certidumbre e incertidumbre

En el congreso de Solvay de 1924, Erwin Schrödinger había escuchado atentamente a Einstein mientras presentaba las ideas del francés De Broglie. El organizador del congreso le pidió, en el viaje de regreso, que preparara un seminario sobre las ondas de materia. Al profundizar en el tema, aplicó las nuevas ideas al estudio del átomo y enunció, en 1926, la ecuación de onda que permite describir el comportamiento del electrón y reconstruir su espectro de emisión según frecuencias muy precisas.

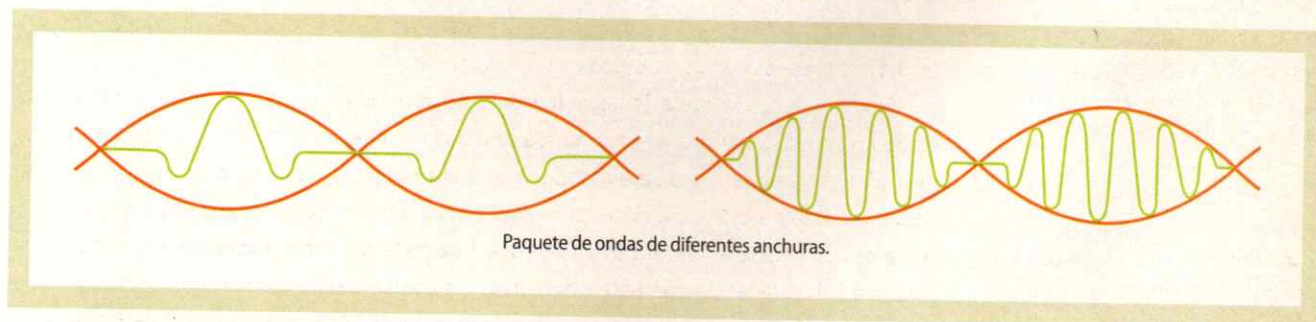
Los electrones pueden ser considerados como vibraciones eléctricas distribuidas alrededor del núcleo. La combinación de esas vibraciones, y la función de onda planteada para el electrón, pudo explicar lo que Bohr buscó con sus desarrollos teóricos. Poseer una ecuación que permitiera predecir la observación con tanto ajuste parecía tranquilizador para los físicos y un logro indudable de la teoría ondulatoria.

Una ecuación de esta clase respeta el pensamiento determinista clásico: si se conoce el estado inicial de un sistema y las leyes de las fuerzas aplicadas, es posible predecir con exactitud el resultado de cualquier medición sobre dicho sistema.

Pero muy pronto arribarían a escena los trabajos de Werner Heisenberg y Max Born, quienes interpretarían la función de onda de Schrödinger en términos probabilísticos. Es decir, que la ecuación refleja solamente la probabilidad de la presencia de una partícula en una región del espacio.

Por ejemplo, si un cuerpo en movimiento puede considerarse como un grupo de ondas del tipo de De Broglie, entonces existe un límite fundamental para la medición: si el grupo de ondas es muy apretado, la posición de las partículas se mide con mucha precisión, pero no su longitud de onda. En cambio, si el paquete de ondas es ancho, entonces es posible alcanzar precisión en la determinación de la longitud de onda, pero no en la localización de la partícula.

Se llama **escuela de Copenhague** al grupo de físicos dirigido por Niels Bohr que se formó a fines de la década de 1920 en Copenhague, Dinamarca. Bohr creó el Instituto para la Física Teórica que junto con las universidades alemanas de Munich y Göttingen, fue líder en la investigación atómica. Bohr fue galardonado, en 1922, con el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la estructura atómica y la radiación. En 1943 huyó a los EE.UU. escapando del nazismo; allí trabajó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton (Nueva Jersey) donde se desempeñó como asesor científico para el proyecto Manhattan, en el laboratorio de Los Álamos, en Nuevo México. En 1945 volvió a Dinamarca para reasumir la dirección del Instituto de Física Teórica. En 1958 publicó otra obra famosa: *Física atómica y el conocimiento humano*. Murió en Copenhague, el 18 de noviembre de 1962.



Paquete de ondas de diferentes anchuras.

El **principio de incertidumbre** expresa que el límite de precisión en estas determinaciones viene dado por la expresión:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{2\pi}$$

donde Δx es la **indeterminación** o imprecisión que corresponde a la posición, y Δp la que corresponde a la cantidad de movimiento $p = m \cdot v$, o sea el producto de su masa por su velocidad.

Cabe aclarar que este principio no establece la imposibilidad de calcular con mucha precisión la posición del electrón, pero no puede determinar con la misma precisión su estado de movimiento en el mismo experimento.



¿Clásica o cuántica?

En el siguiente ejemplo se indica cómo se puede determinar si el modelo clásico resulta apropiado para analizar los fenómenos que abarca un determinado problema, o es necesario utilizar el enfoque cuántico. Es suficiente hacer los análisis solo en orden de magnitud.

A) Sistema formado por un electrón orbitando un núcleo, en el nivel fundamental. Masa: 10^{-31} kg; velocidad: 10^6 m/s; la longitud característica corresponde al radio: 10^{-10} m.

B) Sistema formado por Júpiter orbitando al Sol. Masa: 10^{26} kg; velocidad: 10^4 m/s; distancia orbital media: 10^{11} m. La acción, producto de la masa por la velocidad y por la longitud característica para el átomo, 10^{-35} J · s, del mismo orden que la constante de Planck: 10^{-34} J · s, necesita tratamiento cuántico.

La acción para el planeta Júpiter es 10^{41} J · s, que guarda una diferencia de 75 órdenes con la constante de Planck y justifica que las manifestaciones cuánticas no se hagan evidentes y admita un tratamiento clásico.

Como puede observarse, el valor tan pequeño de la constante de Planck justifica que los aspectos cuánticos de la realidad hayan sido difíciles de evidenciar y esquivos a la experimentación hasta el siglo XX.

Correspondencia y complementariedad

A lo largo del presente capítulo, se mostró cómo algunas teorías físicas importantes evidenciaron sus limitaciones y fueron cambiando. Así, como la Física relativista puede reducirse, en ciertas condiciones, a la Física clásica, es posible esperar que la Física cuántica pueda vincularse en igual sentido con la clásica.

El hecho de que la Física cuántica permita arribar a los mismos resultados que la Física clásica al tratar con números cuánticos elevados fue llamado por Bohr **Principio de correspondencia**. Este principio ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de la teoría cuántica de la materia.

Podría preguntarse por qué falla la teoría clásica en la explicación de los fenómenos del microcosmos, ya que se trataría solo de una reducción de escalas. Sin embargo, analizando el proceso en detalle, se entiende que esta reducción tiene un límite. Por ejemplo, el comportamiento de una única molécula de oxígeno no está descrito por las leyes de los fluidos.

Una primera idea sería que la Física clásica no resulta aplicable cuando se ha reducido demasiado la escala de la realidad para la que fue planteada. Pero, ¿cuánto es demasiado?

Existe una magnitud que permite evaluar si es necesario un enfoque cuántico o el enfoque clásico resulta satisfactorio. Esta magnitud recibe el nombre de **acción de un sistema** y se define como el producto entre la cantidad de movimiento ($p = m \cdot v$) por la longitud característica, es decir, aquella que mejor permita representar el tamaño del objeto, por ejemplo, la altura en el caso de un edificio.

Si el valor de la acción del sistema es del orden de la constante de Planck, es posible utilizar la teoría cuántica para su tratamiento. Si por el contrario, es mucho mayor, es posible estudiar el fenómeno por medio de la Física clásica.

Otro aporte de Bohr es el enunciado del **Principio de complementariedad** que se refiere a la necesidad de asumir el comportamiento ondulatorio y corpuscular como dos descripciones igualmente válidas de los objetos. Que un objeto se comporte o no como onda depende solamente de la elección del aparato usado para observarlo. Para el enfoque cuántico, toda observación supone una interacción con lo que se desea observar y, por lo tanto, se altera en mayor o menor medida la realidad observada. En la teoría cuántica no tiene validez la idea clásica de que un objeto existe independientemente de que se lo observe. En palabras de Bohr:

La descripción de un sistema atómico antes de una medida está indefinida, teniendo solo la potencialidad de tomar ciertos valores con cierta probabilidad.

Es equivocado pensar que la tarea de la física es averiguar cómo es la naturaleza. La física se refiere a lo que nosotros podemos decir de ella.

Esta limitación que impone la mecánica cuántica al conocimiento de la naturaleza nunca fue aceptada por algunos físicos; en particular por Einstein, quien escribió sobre el tema, en una carta dirigida a M. Born, en 1944:

La mecánica cuántica es, ciertamente, impresionante. Pero una voz interior me dice que no es aún la última palabra. Ud. cree en un Dios que juega a los dados y yo en un mundo de existencia objetiva y leyes ordenadas y completas a las que, de un modo salvajemente especulativo, trato de capturar (...) Ni siquiera el enorme éxito de la teoría cuántica me hace creer en el fundamental juego de dados, aunque nuestros colegas más jóvenes interpreten esto como un signo de senilidad. No tengo dudas de que llegará el momento en el que veremos cuál de nuestras actitudes instintivas es la correcta.

Física en la Argentina

LA REPÚBLICA ARGENTINA TIENE UNA LARGA HISTORIA EN FÍSICA QUE COMENZÓ EN EL AÑO 1909 EN LA UNIVERSIDAD DE LA PLATA. POSTERIORMENTE, LAS UNIVERSIDADES DE BUENOS AIRES Y DE CÓRDOBA FUNDARON DEPARTAMENTOS DE FÍSICA, Y SE CREARON LOS CENTROS DE INVESTIGACIÓN DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA EN BARILOCHE Y BUENOS AIRES.



La Universidad Nacional de La Plata tiene el orgullo de poseer el Departamento de Física más antiguo de nuestro país. Está integrado por grupos que trabajan en temas específicos, como la teoría de partículas y la resonancia magnética nuclear. En la Universidad de Buenos Aires, la Licenciatura en Ciencias Físicas se cursa en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, en la Ciudad Universitaria, donde a su vez existen diferentes grupos de investigación como, por ejemplo, en óptica. En este mismo predio se encuentra el Instituto Argentino de Física del Espacio (IAFE), dependiente del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

El Centro Atómico Constituyentes se encuentra en Buenos Aires y pertenece a la Comisión Nacional de Energía Atómica. El trabajo allí se concentra en Física nuclear y Física de materia condensada. Entre sus principales actividades están el uso de rayos de partículas para el tratamiento del cáncer y el desarrollo de celdas solares con aplicaciones específicas.

El Centro Atómico Bariloche, de amplio reconocimiento internacional, se ubica frente al lago Nahuel Huapi, en Río Negro. Allí se encuentra el Instituto Balseiro al que se incorporan, tras un exigente examen, estudiantes de todo el país que terminaron su segundo año de Física o carreras del área, para completar sus estudios de grado y luego realizar el doctorado.

Entre los temas que se desarrollan en la Universidad Nacional de Córdoba se pueden mencionar la física atmosférica, la teoría de la relatividad, la teoría de materia condensada y aplicaciones en resonancia magnética.

Actualmente existen departamentos de Física en muchas otras universidades del país.

Si bien los físicos argentinos mantienen un destacado prestigio internacional, los inconvenientes económicos a los que se ve continuamente sometido nuestro país generan graves consecuencias, como por ejemplo:

- partida de científicos de primer nivel a países que les brindan mayores oportunidades profesionales;
- cantidad mucho mayor de físicos teóricos que experimentales, debido a la falta de fondos para nuevos equipos;
- insuficiente asociación de la Física con la industria.

La Física es una ciencia muy importante para el desarrollo social y sostenido de cualquier nación, por lo cual es fundamental promover la actividad científica en esta área pero generando al mismo tiempo el espacio donde los profesionales egresados de nuestras instituciones puedan desarrollarse dentro de la Argentina.

Luego de la lectura del texto investiguen sobre los científicos de la Argentina.

- a. ¿Qué proporción de egresados de Física continúa sus trabajos en el exterior?
- b. ¿Cómo salen preparados estos egresados en comparación con el resto del mundo?



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

■ El valor de la **velocidad de la luz** en el vacío permanece constante aun cuando la fuente o el observador estén en movimiento relativo.

■ Dos sucesos pueden ser simultáneos para un observador y no simultáneos para otro.

■ El tiempo transcurre más lentamente en un sistema en movimiento, comparado con un sistema en reposo relativo.

■ La longitud de un cuerpo medida en la dirección del movimiento por un observador externo se reduce en esa misma dirección.

■ La energía en reposo de un sistema y su masa son magnitudes equivalentes. La energía está cuantizada.

■ **Principio de equivalencia:** un observador no puede distinguir si se encuentra en un campo gravitatorio o en un sistema de referencia acelerado.

■ La **materia** es discontinua y presenta propiedades ondulatorias.

■ La **luz** presenta un comportamiento dual, ya sea como una onda o como un haz de partículas.

■ **Principio de incertidumbre:** no es posible determinar simultáneamente y con precisión absoluta la posición y la velocidad de una partícula.

■ **Principio de correspondencia:** una teoría nueva debe conducir a los mismos resultados que la anterior, en los aspectos en los que esta última está respaldada por los datos experimentales.

Fórmulas

$$E = h \cdot \nu$$

Energía radiante

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{2\pi}$$

Principio de incertidumbre

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dilatación del tiempo

$$L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Contracción de la longitud

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Masa relativista

$$E_0 = m \cdot c^2$$

Energía en reposo

$$E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2$$

Energía cinética

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

Longitud de onda asociada a una partícula

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. ¿El espacio es absoluto? ¿Y el tiempo?
2. Según la Teoría de la relatividad: ¿todo es relativo?
3. Cuando observamos las estrellas del cielo, ¿las vemos tal cual se encuentran en ese mismo instante? Justifiquen.
4. ¿La rapidez de la luz depende del movimiento de la fuente? ¿Y del observador?
5. ¿Qué es la dilatación del tiempo?
6. ¿Qué es la contracción de la longitud?
7. ¿En qué dirección se observa la contracción de la longitud?
8. Si un astronauta pudiera viajar a una rapidez próxima a la de la luz, ¿vería contraerse su propia mano? ¿Por qué?
9. ¿Qué significa la expresión $E_0 = m \cdot c^2$?
10. ¿Qué dice el principio de equivalencia?
11. ¿Qué afirma del principio de correspondencia? ¿Cómo se aplica a la mecánica de Newton?
12. ¿Qué sostiene el principio de incertidumbre?
13. ¿Qué significa que la luz presenta un comportamiento dual?
14. ¿Una pelota de tenis también presenta comportamiento dual?
15. ¿Qué quiere decir que la energía está cuantizada?
16. Una varilla de 1 metro de longitud se desplaza paralelamente a su longitud con una rapidez de $0,8c$ con respecto a un observador. Calculen la longitud medida por el observador.
17. Calculen la rapidez de una varilla para que su longitud sea la cuarta parte que su longitud en reposo.
18. Una nave espacial del futuro tiene 200 m de longitud y se desplaza con una rapidez de $0,7c$ respecto de la Tierra. ¿Cuál es la longitud medida desde nuestro planeta?
19. Un astronauta pretende viajar a Vega, una estrella ubicada a 26 años luz de la Tierra.
 - a. ¿Cuál debe ser la rapidez de su nave con respecto a nuestro planeta para que el tiempo medido desde su nave sea de 10 años?
 - b. ¿Qué tiempo indicará un reloj situado en la Tierra?
20. Un astronauta de 30 años de edad inicia un viaje espacial a una rapidez de $1,6 \cdot 10^8$ m/s. Si un reloj en la Tierra indica que han pasado 40 años, ¿cuál es la edad del viajero?
21. La rapidez de traslación de la Tierra es de 30 km/s. Si su masa es de unos $6 \cdot 10^{24}$ kg, ¿cuál es la masa que mide un observador fijo con respecto al Sistema Solar?
22. ¿Cuál es la cantidad de energía equivalente que posee un gramo de agua?
23. ¿Cuál es el valor de la energía de un fotón de luz roja de $6 \cdot 10^{-7}$ m de longitud de onda?
24. ¿Cuál es la energía de los fotones de una onda de radio de 7 MHz de frecuencia?
25. ¿Cuál es la frecuencia de onda de un fotón cuya energía es $9 \cdot 10^{-17}$ J?
26. La frecuencia mínima para emisión fotoeléctrica en el sodio es de $4,39 \cdot 10^{14}$ Hz. ¿Cuál es la mínima energía con la que se podrán arrancar electrones al sodio?
27. ¿Cuál es el valor de la incertidumbre en la rapidez de un electrón sabiendo que la incertidumbre en su posición es de $0,3 \cdot 10^{-10}$ m? ($m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg).
28. ¿Cuál es el valor de la velocidad de un electrón cuya longitud de onda asociada es de $0,129 \cdot 10^{-10}$ m?
29. ¿Cuál es la longitud de onda asociada a un electrón que se desplaza a una rapidez de $7,29 \cdot 10^6$ m/s?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- 1 La rapidez de la luz en el vacío es constante.
- 2 La rapidez de la luz depende de la rapidez de la fuente que la emite.
- 3 La rapidez de la luz depende de la rapidez a la que se desplaza el observador.
- 4 Para una misma persona, el tiempo transcurre más lentamente si se encuentra en movimiento muy veloz que si se encuentra en reposo.
- 5 Según la teoría de la relatividad, todo es relativo.
- 6 La simultaneidad es un fenómeno relativo.
- 7 La incertidumbre es una consecuencia de la imperfección de los sistemas de medición.
- 8 A mayor incerteza en la medición de la posición, menor es la incerteza en la medición de la velocidad de una partícula.
- 9 La luz presenta un comportamiento dual.
- 10 Los electrones no presentan un comportamiento dual.
- 11 Según la teoría electromagnética, un electrón que gira alrededor del núcleo debería emitir energía radiante.
- 12 Una partícula tiene una onda asociada que depende de su rapidez.
- 13 El principio de inercia vale solo en sistemas de referencia inerciales.
- 14 La longitud de un objeto puede contraerse o expandirse según el signo de la velocidad de un objeto.
- 15 La física cuántica no es aplicable a fenómenos macroscópicos.
- 16 El tiempo es relativo; la duración de un evento, no.
- 17 Una luz de mayor frecuencia extrae más electrones que otra de menor frecuencia.
- 18 Las ecuaciones de Newton se aplican cuando la teoría de la relatividad no resulta válida.
- 19 El valor de la masa se puede expresar en unidades de energía.
- 20 Un astronauta vería que su nave se acorta si viaja a velocidades muy altas.

RESPUESTAS DE AUTOEVALUACIÓN

2

1. V 8. F 15. V
2. F 9. V 16. F
3. V 10. F 17. F
4. F 11. F 18. V
5. F 12. F 19. V
6. V 13. V 20. F
7. F 14. V

3

1. F 8. F 15. F
2. F 9. F 16. F
3. F 10. F 17. F
4. F 11. F 18. V
5. F 12. F 19. F
6. V 13. V 20. V
7. F 14. F

4

1. F 8. F 15. V
2. F 9. F 16. F
3. F 10. F 17. V
4. F 11. F 18. F
5. V 12. F 19. F
6. F 13. V 20. V
7. F 14. F

5

1. F 8. F 15. V
2. F 9. V 16. V
3. F 10. V 17. F
4. V 11. F 18. F
5. F 12. F 19. F
6. F 13. V 20. F
7. F 14. V

6

1. F 8. F 15. F
2. F 9. V 16. V
3. F 10. F 17. F
4. F 11. V 18. F
5. V 12. F 19. V
6. F 13. F 20. F
7. V 14. F

7

1. F 8. F 15. F
2. V 9. V 16. V
3. F 10. F 17. V
4. V 11. V 18. F
5. F 12. F 19. F
6. V 13. F 20. V
7. V 14. F

8

1. F 8. V 15. F
2. V 9. F 16. F
3. V 10. F 17. V
4. F 11. V 18. F
5. F 12. F 19. V
6. V 13. F 20. F
7. F 14. V

9

1. F 8. F 15. F
2. F 9. F 16. F
3. F 10. V 17. F
4. V 11. V 18. V
5. F 12. F 19. V
6. F 13. V 20. V
7. F 14. V

10

1. F 8. V 15. F
2. F 9. V 16. F
3. V 10. V 17. F
4. V 11. F 18. F
5. F 12. V 19. F
6. V 13. V 20. F
7. F 14. F

11

1. F 8. V 15. F
2. V 9. V 16. F
3. V 10. V 17. V
4. V 11. V 18. F
5. V 12. F 19. F
6. F 13. V 20. V
7. V 14. F

12

1. F 8. V 15. F
2. F 9. F 16. V
3. V 10. F 17. F
4. F 11. F 18. V
5. V 12. F 19. V
6. V 13. F 20. V
7. F 14. V

13

1. F 8. F 15. V
2. V 9. V 16. V
3. V 10. V 17. F
4. F 11. F 18. F
5. F 12. V 19. V
6. V 13. F 20. V
7. F 14. F

14

1. F 8. V 15. V
2. F 9. V 16. V
3. F 10. V 17. V
4. F 11. F 18. F
5. V 12. F 19. F
6. F 13. F 20. F
7. V 14. F

15

1. V 8. V 15. F
2. F 9. V 16. F
3. F 10. F 17. F
4. F 11. V 18. F
5. F 12. V 19. V
6. V 13. V 20. F
7. F 14. F

UNIDADES DE MEDIDA

El sistema internacional de medidas (SI)

En la 11ª conferencia General de Pesas y Medidas que sesionó en París en octubre de 1960 se estableció definitivamente el Sistema internacional de medidas (SI) basado en 6 unidades fundamentales y completado en las posteriores conferencias en 7. En el año 1972 la ley N° 19511 instituyó en la República Argentina el Sistema Internacional de Unidades con sus múltiplos y submúltiplos con el nombre de SIMELA (Sistema Métrico Legal Argentino).

Este sistema distingue tres clases de unidades:

- las **unidades fundamentales** que se definen en forma independiente mediante patrones o experimentos específicos y se consideran dimensionalmente independientes,
- las **unidades derivadas**, que resultan de operaciones de las unidades fundamentales;
- las **unidades suplementarias**, unidades derivadas sin dimensión.

Unidades fundamentales

Magnitud	Unidad	Símbolo de la unidad	Definición
Longitud	metro	m	El metro es la longitud del camino recorrido por la luz en el vacío durante un lapso de $\frac{1}{299\,792\,458}$ s.
Masa	kilogramo	kg	El kilogramo es la masa del prototipo internacional que se encuentra en Sèvres, Francia, a cargo del Comité Internacional de Pesas y Medidas.
Tiempo	segundo	s	El segundo es la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo cesio 133.
Corriente eléctrica	ampere	A	El ampere es la corriente eléctrica constante que, mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y ubicados a una distancia de 1 metro entre sí, en el vacío, produciría entre ellos, por unidad de longitud de conductor, una fuerza de 2×10^{-7} newton.
Temperatura	kelvin	K	El kelvin es la fracción $\frac{1}{273}$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.
Cantidad de materia	mol	mol	El mol es la cantidad de materia de una sistema que tiene tantos entes elementales como átomos hay en 0,012 kg de carbono 12. Cuando se emplea el mol, se deben especificar los entes elementales, que pueden ser: átomos, moléculas, iones, electrones u otras partículas o grupos de tales partículas.
Intensidad luminosa	candela	cd	La candela es la intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} hertz y cuya intensidad energética en esa dirección es $\frac{1}{683}$ watt por este radián.

Unidades derivadas

Magnitud	Unidad	Símbolo	Equivalencia
Frecuencia	herz	Hz	1/s
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³	kg/m ³
Fuerza	newton	N	m · kg / s ²
Velocidad	metro por segundo	m/s	m/s
Aceleración	metro por segundo al cuadrado	m/s ²	m/s ²
Presión	pascal	Pa	N/m ²
Energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J	N · m = kg · m ² /s ²
Potencia	watt	W	J/s
Carga eléctrica	coulomb	C	A · s
Potencial eléctrico	volt	V	W/A
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
Flujo magnético	weber	Wb	V · s
Inducción magnética	tesla	T	Wb/m ²
Entropía	joule por kelvin	J/K	J/K

ÍNDICE TEMÁTICO ALFABÉTICO

Absorción 261
 Aceleración 28, 37
 Aceleración centrípeta 35
 Aceleración gravitatoria terrestre 31
 Aceleración instantánea 28
 Aceleración media 28
 Acústica 253
 Aerogeneradores 127
 Afelio 65
 Agujero negro 113
 Aislantes 153, 161, 187
 Alnico 211
 Ampere 192
 Amplitud 238
 Anticiclones 90
 Armónicas 259
 Átomos 186
 Atracción gravitatoria 48
 Auroras boreales 227
 Balanza de torsión 192
 Bandas de interferencia 288
 Bobina 127, 216
 Bobina de alimentación 223
 Bobina de salida 223
 Brillo 274
 Caída libre 31
 Calamita 210
 Calor 147, 161
 Calor específico 149, 161
 Calor latente de vaporización 158
 Caloría 149
 Calórico 147
 Calorimetría 149
 Cámara oscura 274
 Campo eléctrico 194
 Campo gravitatorio 73
 Campo gravitatorio terrestre 73
 Campo magnético 212
 Campo vectorial 73
 Caos 7
 Capilaridad 95
 Carga eléctrica 185
 Carga por contacto 188
 Carga por inducción 188
 Caudal de corriente 90
 Celda fotovoltaica 306
 Centro de empuje 88
 Centro de masa 25
 Ciclo 172
 Ciclo de Carnot 176
 Ciclo de histéresis 217

Ciclo hidrológico 157
 Ciclones 90
 Ciencia fáctica 14
 Cinemática 21
 Circuitos eléctricos 199
 Cóclea 265
 Coeficiente de rozamiento 53
 Combustibles fósiles 128
 Compresión 256
 Condición de equilibrio en una prensa hidráulica 87
 Conducción 153, 161
 Conductividad 198
 Conductores 153, 161, 185, 187
 Conexión en paralelo 199
 Conexión en serie 199
 Constante de gravitación universal 68
 Constante elástica 50
 Constante universal de los gases ideales 168
 Contenedor hermético 129
 Contracción de las longitudes 301
 Convección 155
 Corriente eléctrica 197
 Corrientes convectivas 155, 161
 Cosmologías 8
 Cosmos 7
 Coulomb 192
 Crestas 238
 Crisis energética 134
 Cuantos 233, 305
 Cuatricotomía 290
 Cuerpo puntual 25
 Cuerpos opacos 273, 293
 Cuerpos transparentes 273, 293
 Cuerpos traslúcidos 273, 293
 Cupla 44
 Curva de histéresis 217
 Decibel 257
 Declinación magnética 226
 Degradación 126
 Densidad 83, 97
 Desplazamiento 26
 Diagrama de cuerpo libre 50
 Difracción 241
 Dilatación 145
 Dilatación del tiempo 301
 Dinámica de fluidos 81
 Dinamo 222
 Dinamómetro 43

Dioptría 287
 Distancia 26
 Distancia focal 285, 293
 Dureza magnética 211
 Ebullición 157
 Eco 241, 260, 268
 Ecografía 255
 Ecógrafos 252
 Ecuación de continuidad 91
 Ecuación de onda 239
 Ecuación general de estado 167
 Ecuación general de los gases ideales 168
 Ecuación horaria 29
 Ecuación horaria para el MCU 34
 Efecto dínamo 226
 Efecto Doppler 263, 268
 Efecto fotoeléctrico 233, 306
 Efecto Meissner 225
 Elasticidad 50
 Electrones 186
 Elemento de un fluido 90
 Elongación 50, 107, 238
 Empuje 88
 Energía 101, 117, 121, 147
 Energía cinética 104, 117
 Energía interna 147, 168
 Energía mecánica 108, 117
 Energía potencial 106
 Energía potencial elástica 107
 Energía potencial gravitatoria 106, 117
 Energía solar 131
 Enrarecimiento 256
 Entropía 174, 180
 Enunciados observacionales 14
 Epiciclo 63
 Equilibrio hidrostático 89
 Equilibrio térmico 148, 150
 Escala bien temperada 267
 Espectrografía 289
 Espectros de absorción 307
 Espectros de líneas de emisión 307
 Espectroscopia 307
 Espejo 285
 Espejos esféricos 285
 Espejos planos 285
 Estado estacionario 90
 Estática de fluidos 81
 Éter 233, 8
 Evaporación 157

Evolución isobárica 171
 Evolución isocórica 171
 Evolución isotérmica 171
 Excentricidad 65
 Rapidez aureolar 66
 Experimento 15
 Física cuántica 13
 Flogisto 164
 Fluido 81, 85
 Fluido resinoso 185
 Fluido vítreo 185
 Flujo laminar 94
 Flujo magnético 221
 Foco 285
 Fotón 288, 306
 Fotosíntesis 273
 Fototropismo 273
 Frecuencia 35, 238
 Frecuencia armónica 243
 Frecuencia fundamental 243, 259
 Frente de onda 242
 Freón 178
 Fuente luminosa 276
 Fuente no renovable 128
 Fuente puntual 276
 Fuente renovable 128
 Fuerza 41, 57
 Fuerza de flotación 88
 Fuerza de rozamiento 53, 108
 Fuerza de rozamiento dinámica 53
 Fuerza de rozamiento estática 53
 Fuerza eléctrica 186, 215
 Fuerza electromotriz 221
 Fuerza electromotriz inducida 220
 Fuerza gravitatoria 31, 68
 Fuerza magnética 215
 Fuerza normal 51
 Fuerza resultante 44
 Fuerzas a distancia 42
 Fuerzas conservativas 108
 Fuerzas de acción y reacción 57
 Fuerzas no conservativas 108
 Fuerzas por contacto 42
 Galaxia 71
 Gas ideal 167
 Gases 81
 Hectopascales 82
 Hertz 238
 Imágenes reales 284

Imágenes virtuales 284
 Imanes cerámicos 211
 Índice de refracción 282
 Inducción lógica 16
 Inercia 45
 Intensidad 197, 257, 258, 268
 Intensidad del campo gravitatorio 74
 Intensidad del vector campo eléctrico 194
 Intensidad del vector inducción magnética 213
 Intensidad relativa 257
 Intensidad sonora 257
 Interacción gravitatoria 77
 Interferencia 242
 Interferencia constructiva 242
 Interferencia destructiva 242
 Iones 186
 Irreversible 177
 Jaula de Faraday 190
 Juntas de dilatación 145
 Kilogramo fuerza 42
 Kilopascales 82
 Láser 292
 Lente 286
 Lentes convergentes 286
 Lentes divergentes 286
 Ley de conservación de la energía 125
 Ley de Gravitación Universal 68
 Ley de Inducción de Faraday 221, 229
 Ley de Lenz 221
 Ley de Newton 45
 Ley de Ohm 198
 Ley de Snell 282
 Ley empírica 16
 Línea de flujo 90
 Líquido ideal 85
 Líquido real 85
 Líquidos 81
 Longitud propia 301
 Magnetismo 208
 Magnetita 210
 Magnitud 22, 37
 Magnitud escalar 22
 Magnitud vectorial 22
 Magnitudes derivadas 23
 Magnitudes fundamentales 23
 Manchas solares 227
 Máquina de vapor de Watt 127
 Máquina térmica 17
 Máquinas refrigeradoras 178

- Marco teórico 14
Masa 25
Masa inercial 46
Materia 141
Materiales
 antiferromagnéticos 224
 Materiales diamagnéticos 225
 Materiales ferrimagnéticos 224
 Materiales ferromagnéticos 211, 224, 229
 Materiales paramagnéticos 225
 Materiales superparamagnéticos 225
Mecánica 12, 21
Mecánica de fluidos 81
Mecanicismo 12, 19
Membrana vacilar 265
Metabolismo 125
Método astronómico 275
Método científico 14
Método hipotético deductivo 16
Modelo corpuscular 232
Modelo de ondas 232, 248
Modelo geocéntrico 63
Modelo heliocéntrico 64
Módulo de un vector 102
Molinos de viento 127
Motor 102
Motores eléctricos 127
Movimiento 20
Movimiento circular uniforme 33
Movimiento oscilatorio armónico 236
Movimientos rectilíneos 29, 37
Museo 9
Neoplatonismo 12, 19
Nodos 243
Núcleo 129
Número de Reynolds 95
Octava 259
Oído 265
Oído externo 265
Oído interno 265
Oído medio 265
Onda armónica 237
Onda mecánica 235, 248
Ondas 232
Ondas coherentes 242
Ondas electromagnéticas 235, 248
Ondas en fase 242
Ondas estacionarias 243
Ondas longitudinales 235, 248
Ondas sonoras 256, 268
Ondas transversales 235, 248
Oposición de fase 242
Óptica 272
Óptica geométrica 276, 293
Orden de magnitud 22
Organicismo 11, 19
Órgano de Corti 265
Palanca 96
Partículas 141
Pascal 82
Péndulo 236
Penumbra 276, 293
Período 35, 236, 238
Perihelio 66
Permeabilidad magnética del material relativa al vacío 217
Perturbación 234
Perturbación gravitatoria 73
Peso 54, 57
Peso específico 84, 97
Piedra imán 210
Pila de Volta 196
Pyrex 145
Plasma de viento solar 227
Polarización 188
Potencia 115, 117
Potencial eléctrico 195
Presión atmosférica 86
Presión dinámica 92
Presión hidrodinámica 92
Presión hidrostática 84, 85, 97
Primer Principio de la Electrostática 186
Primer Principio de la Termodinámica 170, 180
Primera Ley de Kepler 65
Principio de Arquímedes 89, 96
Principio de Complementariedad 310
Principio de Conservación de la Energía Mecánica 109
Principio de Correspondencia 310, 312
Principio de Equivalencia 303
Principio de Huygens 242
Principio de Incertidumbre 309, 312
Procesos endotérmicos 169
Procesos exotérmicos 169
Protones 186
Puntos fijos 142
Radiación 147
Radiación 155, 161
Radián 33
Rango de audición 254
Rapidez 27, 37
Rapidez aureolar 77
Rapidez de escape 75, 77, 112
Rapidez media 27, 280
Rayo luminoso 274
Rayo reflejado 280
Rayos 242
Reacción nuclear en cadena 129
Red de difracción 289
Reflexión 241, 280
Reflexión total 284, 293
Refracción 241, 261
Régimen laminar 90
Régimen turbulento 90, 95
Región celestial 8
Región sublunar 8
Rendimiento de una máquina 176
Resistividad 198
Resonancia 262, 268
Retrogradación 63
Reversibilidad 177, 276
Ruedas hidráulicas 126
Satélites antimisiles 245
Satélites de navegación 245
Satélites de observación 245
Satélites meteorológicos 245
Satélites militares 245
Segundo Principio de la Electrostática 186
Segundo Principio de la Termodinámica 174, 180
Semiconductores 187
Sensación térmica 142
Sensores de posición 236
Sistema 101
Sistema aislado 109, 122
Sistema de control y seguridad 129
Sistema de extracción de energía 129
Isótopos 129
Sistema degradado 175
Sistema internacional 23
Sistemas abiertos 122
Sistemas cerrados 122,
Sistemas de fuerzas 44
Sistemas de fuerzas colineales 44
Sistemas de fuerzas concurrentes 44
Sistemas de fuerzas paralelas 44
Sistemas inerciales 303
Sobretonos 259
Solenoides 216
Sólidos 81
Sombra 276, 293
Sonar 252
Sonido 268
Sonoridad 257
Spin electrónico 224
Superconductores 187
Superposición de ondas 242
Tecnociencia 17
Temperatura 141, 161
Temperatura de ebullición 157
Tensión 51
Teorema de Fourier 237
Teorema de trabajo 105
Teorema Fundamental de la Hidrostática 86
Teoría cinético-molecular 167
Teoría cuántica 305
Teoría de la relatividad especial 300
Teoría de la relatividad general 303
Teorías 16
Termodinámica 164
Termoelectricidad 197
Termómetro 142, 161
Tiempo de reverberación 261
Timbre 259, 268
Tímpano 265
Tiro oblicuo 32
Tiro vertical 31
Tono 258, 268
Toroide 216
Trabajo 147
Trabajo mecánico 102, 117
Trabajo nulo 102
Trabajo resistente 102
Trabajo resultante 103
Trampas magnéticas 212
Transferencia de energía 123
Transformación adiabática 172
Transformación cíclica 172, 180
Transformación isométrica 172
Transformaciones de Galileo 299
Transformaciones de Lorentz 299
Trayectoria 26
Triboelectricidad 187
Ultrasonidos 254
Ultrasonografía 255
Umbral de la audición 257
Umbral del dolor 257
Unidad astronómica 65
Unidades de fuerza 42
Valles 238
Vaporización 157
Variación de la entropía 175
Variación secular 226
Vector 22
Vector inducción magnética 212
Vector posición 24
Velocidad 20, 27, 32, 34, 35, 37
Velocidad angular 34
Velocidad de la luz en el vacío 293
Velocidad instantánea 27
Velocidad tangencial 34
Ventana oval 265
Ventre 243
Viscosidad 85, 94
Volt 195
Vórtices 95
Weber 221