

Instituto Superior de Diseño Industrial

# Física de los Productos

M.Sc. Antonio Berzaín Iturralde  
Profesor Auxiliar  
Departamento de Diseño Industrial

## ÍNDICE

### Introducción 3

### Tema I MECÁNICA Y TERMODINÁMICA 5

#### Mecánica 5

- Fuerzas 5
- Centro de gravedad 6
- Movimiento lineal 8
- Movimiento de rotación 10
- Energía mecánica 13
- Tareas propuestas 15

#### Mecánica de los Fluidos 21

- Hidrostática 21
- Hidrodinámica 23
- Fenómenos de superficie 24
- Tareas propuestas 27

#### Oscilaciones, Ondas y Termodinámica 31

- Oscilaciones mecánicas 31
- Ondas mecánicas 33
- Acústica 35
- Propiedades térmicas 36
- Procesos termodinámicos 40
- Tareas propuestas 43

### Tema II ELECTROMAGNETISMO 47

- Electrostática 47
- Corriente eléctrica 49
- Campo magnético 51
- Inducción electromagnética 53
- Ondas electromagnéticas 54
- Tareas propuestas 55

### Tema III ÓPTICA Y FÍSICA MODERNA 61

#### Óptica 61

- Reflexión 61
- Refracción 63
- Reflexión total 64
- Polarización 64
- Actividad óptica 68
- Tareas propuestas 69

#### Física Moderna 73

- Radiación térmica 73
- Cuantificación de la energía 75
- Dualidad onda corpúsculo de las partículas 77
- Radiactividad natural 78
- Fisión nuclear 80
- Tareas propuestas 81

#### ANEXOS 84

- Pasos para la resolución de problemas 85
- Sistema de conocimientos 86
  - Mecánica 86
  - Mecánica de los Fluidos 86
  - Oscilaciones, Ondas y Termodinámica 87
  - Elctromagnetismo 88
  - Óptica 89
  - Física moderna 89
- Bibliografía general 90

## INTRODUCCIÓN

Dentro del impetuoso desarrollo de la Ciencia y de la Técnica en el mundo contemporáneo se encuentra la indiscutible impronta de la Física, como Ciencia que estudia las estructuras más simples de la materia y sus interacciones. Su huella está detrás de cada logro científico-técnico aún en las más disímiles esferas: el transporte, las comunicaciones, la medicina, la informática, etc.

El desarrollo que ha logrado la Física es sorprendente. Hoy su campo de estudio abarca el rango entre  $10^{-15}\text{m}$  hasta  $10^{26}\text{m}$ . Para que se tenga una idea de los valores de las magnitudes que se manejan, el tamaño del átomo es del orden de  $10^{-8}\text{m}$ .

A fin de llevar a cabo sus investigaciones en el micromundo y el megamundo el hombre ha desarrollado máquinas extraordinarias.

Entre estas tenemos el VLA (Very Large Arrange), en el desierto de Nuevo México, EEUU. Es una configuración de 27 radiotelescopios de 25 m de radio ubicados en forma de Y invertida que cubre unos 36 Km de diámetro. Constituye una poderosa herramienta en las investigaciones astrofísicas.

Otro ejemplo es el LEP (large electron positron) que es un acelerador de partículas de 27 Km de circunferencia, ubicado en la frontera entre Suiza y Francia. Permite colisionar haces de electrones y positrones para efectuar investigaciones fundamentales sobre el micromundo.

También resulta espectacular el avance en el mundo de la Electrónica. En 1948 se construyó el primer transistor, dispositivo clave en la microelectrónica moderna. 30 años después, un microprocesador Intel 8080 contaba con 4,500 transistores en un volumen menor. Un Intel Pentium pro tiene 5,5 millones de transistores. El Alpha 21164A, de Digital Equipment Corporation, totaliza unos 9,3 millones de transistores. Un Intel Pentium 4 poco más de 40 millones.

Por supuesto, estas son las fronteras de la Física. En el curso de Física de los Productos, en tanto orientado a la formación de diseñadores industriales, nos moveremos en un entorno objetual mucho más cercano al hombre.

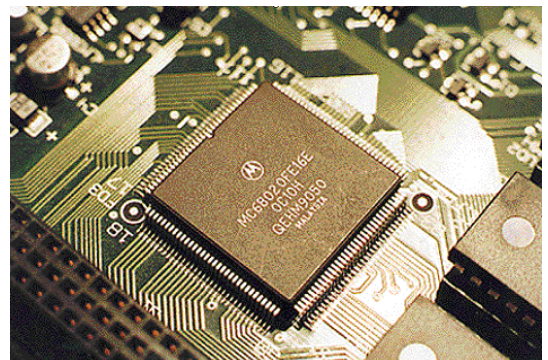
Este material contiene los conceptos, leyes y principios vistos en el curso. Con toda intención se excluyen los ejemplos que pudieran apoyar el texto. Tampoco incluye la información respecto a las aplicaciones, esto es, los distintos productos y fenómenos tratados en las clases y en particular en los seminarios, lo cual haría este cuaderno muy voluminoso. Nos parece más prudente exponer aquí el sistema de conocimientos, que de acuerdo a las características del curso, o sea, número de horas, la carrera a la que va dirigido, etc., debe ser bastante estable y lograr por otras vías que el estudiante se informe acerca de las aplicaciones.



VLA (Very Large Arrange), en el desierto de Nuevo México, EEUU.



LEP (large electron positron) acelerador de partículas de 27 Km de circunferencia, ubicado en la frontera entre Suiza y Francia.



Microprocesador.

La estructura que se ha asumido responde a la de la propia asignatura, en la que se realizan seis seminarios, que constituyen los capítulos, a saber:

**Mecánica del sólido**  
**Mecánica de los fluidos**  
**Oscilaciones y ondas**  
**Electromagnetismo**  
**Óptica**  
**Física Moderna**

Para cada uno de estos seminarios se presenta el contenido, ordenado de acuerdo a las secciones en las que se divide el mismo. Estas secciones responden a un principio o concepto físico que caracteriza la ponencia que debe realizar el estudiante. Son justamente cinco por cada seminario ya que la experiencia ha demostrado que es la cantidad máxima que con calidad pueden presentarse en una clase.

Al final de cada capítulo se propone un sistema de tareas que consolidan los conocimientos expuestos. La mayoría está relacionada con el funcionamiento de productos, aunque también hay preguntas relativas a fenómenos naturales de interés, o asociadas a situaciones físicas muy concretas, pero siempre en el contexto del perfil profesional del diseñador.

Las imágenes que aparecen proceden de la enciclopedia Encarta, de la multimedia “Fundamentals of Physics” de D. Halliday, y de catálogos y revistas del Centro de Información del ISDI. Al respecto, agradezco la ayuda brindada por el estudiante Ernesto Moreno.

Debo señalar que esta versión en formato PDF sale a la luz gracias a la labor del estudiante de Diseño Informacional Adrián Berazaín, quien tuvo a su cargo el diseño general y la reelaboración de las figuras de la primera parte. También cooperaron en la confección de imágenes y composición del material los alumnos Renier López y Yamile Salomón.

Entre los anexos están los sistemas de conocimientos de cada seminario, así como algunas ideas de cómo resolver problemas y la bibliografía general de la asignatura.

Espero que este material pueda ser de utilidad a los estudiantes, lo cual sería el mayor premio al esfuerzo realizado.

**A.B.**

# Tema I

## MECÁNICA Y TERMODINÁMICA

### MECÁNICA

#### Fuerzas

La Mecánica estudia el movimiento más simple: el movimiento mecánico. Este no es más que el desplazamiento de un cuerpo respecto a otro. Para ello la Mecánica se apoya en modelos. Un modelo resume las características esenciales del cuerpo de acuerdo al contexto del problema general que se quiere estudiar, facilitando el proceso de conocimiento. Tenemos, por ejemplo:

**Partícula o punto material.** Este modelo se utiliza cuando las dimensiones del cuerpo de estudio son muy pequeñas en comparación con las distancias que se desplazan.

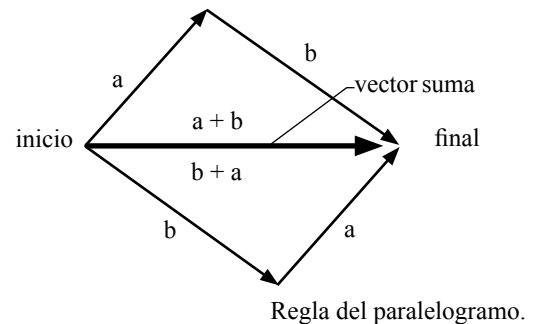
**Cuerpo rígido.** Es el caso en que es posible considerar que las distancias entre las distintas partes que conforman el cuerpo no varían con el tiempo, de modo que éste no altera su forma.

**Cuerpo elástico.** Es aquel que al sufrir una deformación, recupera íntegramente su forma.

Para describir la interacción entre los cuerpos se introduce el concepto de **fuerza como medida cuantitativa de esa interacción**. En el sistema SI la unidad de fuerza es el Newton (N) Los efectos de la fuerza sobre un cuerpo pueden ser dos: deformarlo o variar su movimiento. En este curso encontraremos dos tipos fundamentales de magnitudes físicas: vectoriales y escalares. Las primeras se caracterizan por tener un valor o módulo, dirección, sentido y punto de aplicación. Gráficamente se representan por una saeta, de longitud proporcional a su módulo, de modo que la flecha señala dirección y sentido. La línea en la que descansa la saeta es la línea de acción de la fuerza. Un escalar, por el contrario, sólo posee módulo, como es el caso de la temperatura o la masa.

Como se sabe, la fuerza es una magnitud vectorial. Los vectores cumplen una serie de operaciones que difieren de los números ordinarios. Por ejemplo, la **suma**. En la figura se muestra la llamada **regla del triángulo** y otra equivalente que es la conocida **regla del paralelogramo**.

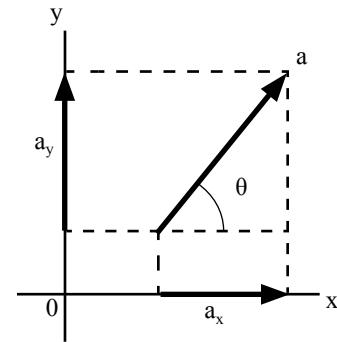
En la práctica es conveniente sustituir una fuerza por la suma equivalente de dos fuerzas. Este proceso se conoce como **descomposición de la fuerza en componentes perpendiculares**, puesto que estas forman un ángulo de 90 grados. Así,  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_x + \mathbf{a}_y$



Es posible relacionar los valores de las componentes perpendiculares  $a_x$  y  $a_y$  con el vector  $a$  mediante relaciones trigonométricas:

$$\begin{aligned} a_x &= a \cos\theta \\ a_y &= a \operatorname{sen}\theta \\ \tan\theta &= a_y/a_x \end{aligned}$$

Cuando a cada punto del espacio podemos asignarle un valor de una magnitud física se dice que existe un campo. En dependencia del tipo de magnitud, el campo puede ser vectorial o escalar.



Descomposición de la fuerza en componentes perpendiculares.

## Centro de gravedad

Para fijar la **posición** de un cuerpo en el espacio se utiliza un **sistema de referencia**, esto es, un sistema de coordenadas fijo a un cuerpo de referencia, con un reloj que permite medir el tiempo. El cuerpo está en reposo cuando su posición es invariable con el tiempo; de lo contrario el cuerpo está en movimiento.

La sucesión de puntos por los que pasa el cuerpo describe su **trayectoria**. De ser una línea recta se dice que el cuerpo describe un movimiento rectilíneo.

La variación de la posición con el tiempo se expresa por la magnitud velocidad. A su vez, la aceleración expresa la variación de la velocidad con el tiempo. El **movimiento rectilíneo uniforme** es aquél en el que el cuerpo se mueve en línea recta y con velocidad constante.

Se entiende por **inercia la propiedad de los cuerpos de oponerse a la variación de su estado de movimiento o reposo**. Esto permite enunciar el **Principio de inercia** (o 1era. Ley de Newton): **si la fuerza resultante sobre un cuerpo es nula, éste se mantiene en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme**. Este principio esclarece que para que haya movimiento no es necesario que sobre un cuerpo actúe una fuerza.

Como **medida cuantitativa de la inercia de un cuerpo se introduce el concepto de masa**. En el sistema SI la unidad de masa es el Kg.

La 2da. Ley de Newton, o Ley de la Dinámica, expresa que **la aceleración obtenida debido a la fuerza aplicada es proporcional a ésta e inversamente proporcional a su masa, y tiene la misma dirección y sentido que la fuerza**. Matemáticamente:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$$

Otra ley fundamental de la Mecánica es la **Ley de acción y reacción** (o 3era Ley de Newton): **la interacción entre dos cuerpos transcurre con fuerzas de igual valor pero de sentidos opuestos**. Dicho en lenguaje matemático:

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

Esto quiere decir que la fuerza del cuerpo 1 sobre el 2 es igual a la del cuerpo 2 sobre el 1 pero de sentido contrario. Obsérvese que estas fuerzas están aplicadas sobre cuerpos distintos.

**La fuerza de gravedad es aquella con la que la Tierra atrae a todo cuerpo situado sobre su superficie. Al movimiento que es debido exclusivamente al efecto de la fuerza de gravedad se le llama caída libre.** Todos los cuerpos que caen libremente sobre la tierra lo hacen de modo que, soltados a la misma altura, llegan al suelo al mismo tiempo, independientemente del valor de su masa. La figura muestra cómo en condiciones de vacío para evitar la fricción, una pluma y una manzana caen del mismo modo.

Este hecho, no siempre bien comprendido, es consecuencia de que a cada punto de la superficie de la Tierra podemos asignarle un valor de la magnitud  $g$ , que es la intensidad de campo gravitatorio o más comúnmente llamada **aceleración de la gravedad**, cuyo valor promedio se toma como  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Aunque  $g$  varía de una zona geográfica a otra, tiene un valor constante en un mismo lugar. La fuerza de gravedad sobre un cuerpo de masa  $m$  es:

$$\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}$$

En muchas ocasiones se confunde el concepto de fuerza de gravedad con peso. Se define **peso como la fuerza con la que actúa un cuerpo sobre otro que lo sostiene, a causa de la fuerza de gravedad.**

De acuerdo a la Ley de acción y reacción, esa fuerza es igual a la fuerza con la que el apoyo actúa sobre el cuerpo. En el caso de un cuerpo sobre una superficie plana, sobre el mismo actúa la fuerza de gravedad  $\mathbf{F}_g$ . La reacción de la superficie sobre el cuerpo es el peso.

Si es el caso en que el cuerpo está en reposo, entonces el peso  $\mathbf{P}$  coincide con la fuerza de gravedad, ya que ambas fuerzas deben ser iguales para que la fuerza resultante sea nula.

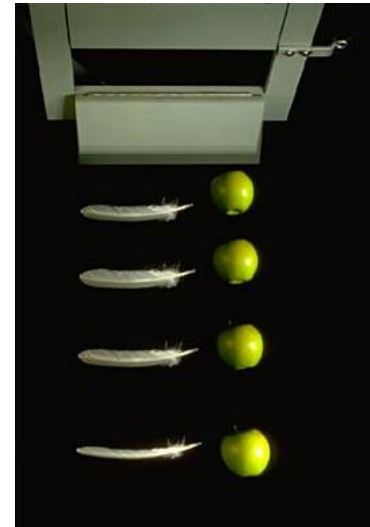
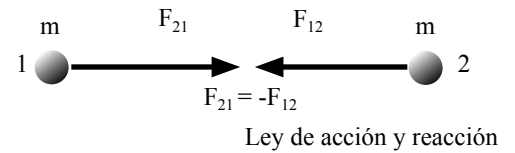
Sin embargo, si el sistema cuerpo-superficie de apoyo se mueve verticalmente con cierta aceleración, esto implica que hay una fuerza resultante y por lo tanto  $\mathbf{F}_g \neq \mathbf{P}$ .

En el caso particular del cuerpo que con su apoyo cae libremente, entonces todo el sistema se mueve con aceleración  $g$  y aplicando la 2da. Ley al cuerpo, se tiene que:

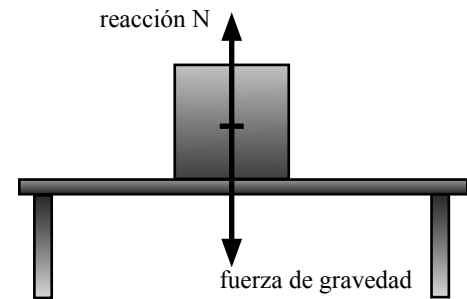
$$\mathbf{P} - \mathbf{F}_g = -m\mathbf{g}$$

Pero como  $\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}$ , entonces,  $\mathbf{P}$  es nulo. Esto se conoce como estado de impesantez, a veces mal llamado ingravidez, término erróneo pues el cuerpo no está libre de la acción de la gravedad; lo que ocurre es que simplemente no pesa.

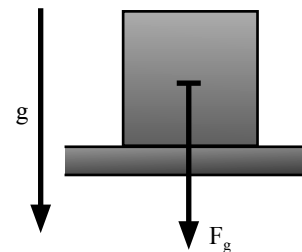
Como se ha mencionado, una característica del vector es el punto de aplicación. En el caso de la fuerza de gravedad, se considera aplicado a un punto, que puede estar o no dentro del cuerpo y que se conoce como **centro de gravedad**.



Una pluma y una manzana caen en el vacío.



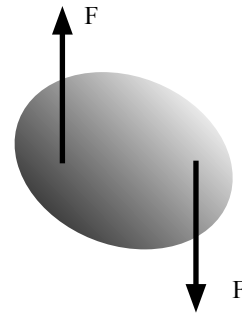
El peso del cuerpo es igual a la reacción N.



Un cuerpo en caída libre no pesa.

Si sobre un cuerpo rígido actúan dos fuerzas iguales en magnitud y dirección pero de sentido contrario de modo que las líneas de acción (línea sobre la que descansa el vector) sean distintas, se dice que el cuerpo está bajo la acción de **un par de fuerzas**.

Un cuerpo sometido a un par de fuerzas no se traslada pues la fuerza resultante es nula. El efecto de un par de fuerzas es provocar un movimiento de rotación en el cuerpo. Se conoce como **momento del par**  $M_p$  al producto  $M_p = Fd$ , donde  $d$  es la menor distancia entre las líneas de acción de las fuerzas del par.



Par de fuerzas sobre un cuerpo.

## Movimiento lineal

La forma de la trayectoria determina dos tipos importantes de movimiento: lineal (línea recta) y circular (circunferencia). Abordaremos ahora lo concerniente al movimiento lineal o rectilíneo.

Para caracterizar la variación de la posición del cuerpo se utiliza el concepto de velocidad. Si durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  la posición varía en  $\Delta x$ , se define la velocidad media como:

$$V_M = \Delta x / \Delta t$$

Si el intervalo de tiempo se hace sumamente pequeño, mediante un proceso de límite:

$$\text{Lim}_{(\Delta t \rightarrow 0)} \Delta x / \Delta t = v$$

Se obtiene la velocidad instantánea, es decir, la velocidad que tiene el cuerpo en la posición  $x$  en el instante  $t$ . En el sistema SI, la velocidad se expresa en m/s.

Asimismo, para caracterizar la variación de velocidad con el tiempo, se introduce la aceleración media como:

$$a_M = \Delta v / \Delta t$$

Y la aceleración instantánea como:

$$a_M = \text{Lim}_{(\Delta t \rightarrow 0)} \Delta v / \Delta t$$

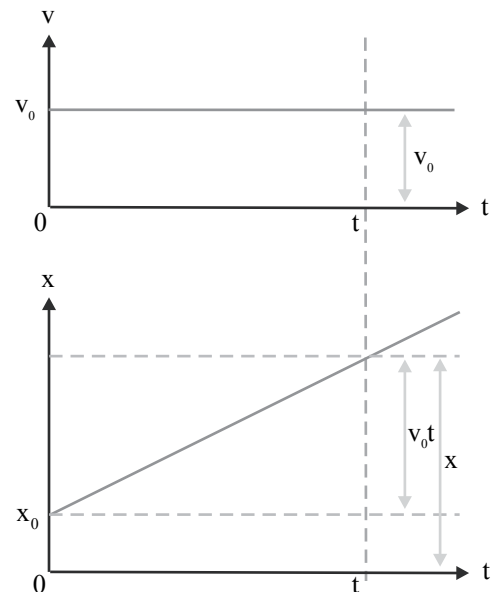
Tanto la velocidad como la aceleración son vectores. La velocidad está en el mismo sentido del movimiento. La aceleración apunta el sentido de incremento de la velocidad. De ahí que en un movimiento retardado el vector aceleración tiene sentido contrario al movimiento.

En el caso del movimiento rectilíneo uniforme (MRU), la velocidad es constante y la aceleración es nula. Las ecuaciones de movimiento son:

$$x = vt + x_0$$

$$v = \text{constante}$$

$$a = 0$$



MRU. Gráficas de la velocidad y la posición respecto al tiempo.



Para el caso del movimiento rectilíneo uniformemente variado (MRUV) se tiene que la aceleración es constante y las ecuaciones quedan como:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \frac{1}{2} \mathbf{a} t^2 + \mathbf{v}_0 t \\ \mathbf{v} &= \mathbf{a} t + \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{a} &= \text{constante} \end{aligned}$$

$x_0$  y  $v_0$  representan la posición y la velocidad en el instante inicial  $t = 0$ . Combinando las dos primeras se obtiene:

$$\mathbf{v}^2 = 2\mathbf{a}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{v}_0^2$$

Para el caso de un sistema (que puede ser un cuerpo sólido o un conjunto de cuerpos o partículas), su movimiento puede ser descrito por su centro de gravedad, de manera que la segunda Ley de Newton queda:

$$\Sigma \mathbf{F} = \mathbf{M} \mathbf{a}_{cg}$$

Donde  $\Sigma \mathbf{F}$  es la resultante de las fuerzas que actúan sobre el sistema.  $a_{cg}$  representa la aceleración del centro de gravedad. Es como si toda la masa del sistema estuviese concentrada en ese punto.

También se introduce un concepto muy útil para describir el movimiento lineal de un cuerpo que es el momento lineal o cantidad de movimiento, dado por:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

Aquí  $m$  es la masa del cuerpo y  $v$  su velocidad, de lo que se evidencia que  $p$  es también un vector.

Ahora bien, una vez que se define un sistema como objeto de estudio, el resto funciona como el entorno o medio exterior del sistema. **Las fuerzas que el medio ejerce sobre el sistema son fuerzas externas. Las fuerzas que existen entre las partes del sistema son fuerzas internas. Un sistema que no interactúa con el medio es un sistema cerrado.**

Para un sistema de cuerpos el momento total es la suma de los momentos de cada uno:

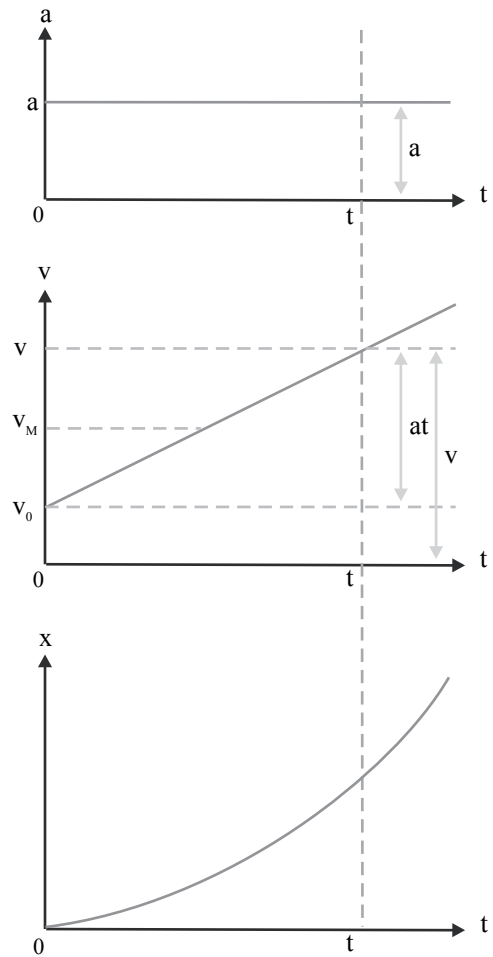
$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots + \mathbf{p}_n$$

Teniendo presente que esta suma es vectorial. Se demuestra que para un sistema se cumple que:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{F}_{ext} \Delta t$$

Es decir, que si sobre el sistema actúa una fuerza externa  $F_{ext}$  durante un tiempo  $\Delta t$ , ocurre una variación de momento lineal  $\Delta p$ . Esta magnitud también se conoce como **impulso lineal** y se designa con la letra  $J$ , de modo que:

$$\mathbf{J} = \mathbf{p}_{final} - \mathbf{p}_{inicial}$$



MRUV. Gráficos de aceleración, velocidad y posición respecto al tiempo.

De lo anterior resulta obvio que si las fuerzas externas sobre el sistema son nulas, es decir, es un sistema cerrado, se cumple que:

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{0}$$

Que es **la ley de conservación del momento lineal**. Esto significa que el momento lineal no varía con el tiempo, o sea que es el mismo al final de un cierto intervalo de tiempo que al inicio. En la práctica, si las fuerzas externas no son nulas, pero las fuerzas internas son superiores, la conservación del momento lineal resulta válida.

Esta ley de conservación resulta muy útil en la solución de múltiples problemas. Hay que subrayar que  $\mathbf{p}$  es un vector, lo cual se refleja en el cumplimiento de esta Ley. Si un sistema está compuesto por dos partes y está inicialmente en reposo, el momento inicial es cero. Si producto de fuerzas internas las partes comienzan a moverse y asumimos al sistema como cerrado, el momento se conserva y continuará siendo nulo. De esta manera:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{\text{final}} &= \mathbf{p}_{\text{inicial}} \\ \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 &= \mathbf{0} \\ \mathbf{p}_1 &= -\mathbf{p}_2 \end{aligned}$$

Lo cual implica que las partes se mueven en sentido contrario.

## Movimiento de rotación

Si la trayectoria es una circunferencia, se dice que el cuerpo realiza un movimiento de rotación. También puede ser un cuerpo sólido en el que cada parte realiza una trayectoria circular, por ejemplo un disco o una rueda que rota. En estos casos se puede establecer una analogía entre las magnitudes lineales y las angulares.

Para caracterizar tal movimiento se utiliza la velocidad angular definida como:

$$\omega = \Delta\theta / \Delta t$$

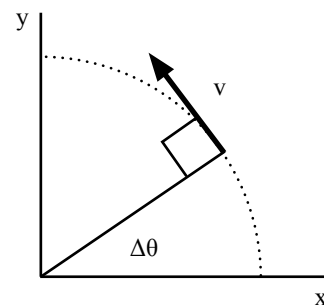
Donde  $\Delta\theta$  es el ángulo barrido en el movimiento de rotación.

Como puede verse, esta sería la velocidad angular media. Por un proceso de límite se encuentra la velocidad angular instantánea. De modo que la velocidad angular mide la variación del ángulo barrido con el tiempo y se expresa en rad/s. Desde el punto de vista vectorial,  $\omega$  es un vector que es perpendicular al plano de rotación y dirigido de acuerdo a la regla de la mano derecha: los dedos envuelven de acuerdo al sentido de rotación y el pulgar señala la dirección de  $\omega$ .

De igual forma, se introduce la **aceleración angular**:

$$\alpha = \Delta\omega / \Delta t$$

Que describe la variación temporal de la velocidad angular.



Partícula que realiza un movimiento circular.

Si la velocidad angular de un cuerpo que realiza un movimiento de rotación alrededor de cierto eje es constante, se trata de un **movimiento circular uniforme (MCU)**, (lo correcto es movimiento circunferencial, pero la costumbre es llamarlo circular) cuyas ecuaciones de movimiento son:

$$\begin{aligned}\theta &= \omega t + \theta_0 \\ \omega &= \text{constante} \\ \alpha &= 0\end{aligned}$$

Si la velocidad angular varía uniformemente, es un **movimiento circular uniformemente variado (MCUV)**, y las ecuaciones son:

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{1}{2}\alpha t^2 + \omega_0 t + \theta_0 \\ \omega &= \alpha t + \omega_0 \\ \alpha &= \text{constante} \\ \omega^2 &= 2\alpha(\theta - \theta_0) + \omega_0^2\end{aligned}$$

$\theta_0$  y  $\omega_0$  representan la posición angular y la velocidad angular en el instante inicial  $t = 0$ .

Tangencialmente a la trayectoria existe un valor de velocidad lineal  $v$ . Esta velocidad posee módulo constante en el caso del MCU y se relaciona con la velocidad angular mediante la expresión:

$$v = \omega r$$

Siendo  $r$  el radio de la circunferencia descrita. Ahora bien, la velocidad como vector no es constante pues varía su dirección. Eso implica la existencia de una aceleración. Esa aceleración aparece en dirección radial hacia el centro de la circunferencia, por lo que se conoce como **aceleración normal  $a_n$** , y su expresión es:

$$a_n = v^2/r = \omega^2 r$$

En el caso del MCUA la expresión anterior sigue siendo válida para cada instante de tiempo, lo que ahora también existe una **aceleración tangencial  $a_t$**  producto de la variación de la velocidad tangencial.

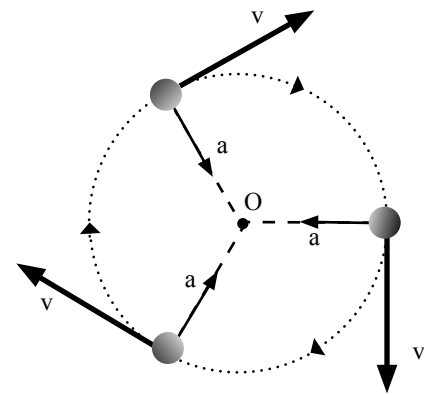
La aceleración está dirigida radialmente hacia el centro de de la circunferencia. Esto implica que existe una fuerza en esa misma dirección y sentido, que es la responsable de que el cuerpo realice tal movimiento. Esa fuerza se conoce como **fuerza centrípeta  $F_c$** , y:

$$F_c = m a_n$$

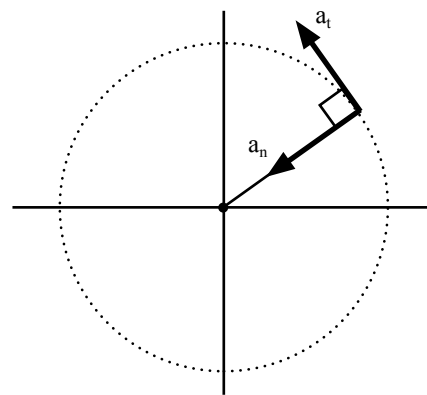
El término de fuerza centrípeta es genérico, en tanto es la fuerza que obliga al cuerpo a rotar alrededor de un punto, pudiendo variar su naturaleza de un caso concreto a otro.

Un concepto importante es el de momento de una fuerza o también conocido por torque:

$$M_0 = Fd$$



Velocidad tangencial y aceleración normal.



Aceleración tangencial y aceleración normal.

Siendo  $d$  la distancia entre el punto 0 respecto al cual se calcula el momento y la línea de acción de la fuerza. El momento expresa la tendencia a rotar de un cuerpo. Es un vector perpendicular al plano de rotación y dirigido de acuerdo a la **regla de la mano derecha**.

Para un cuerpo sólido que rota alrededor de su centro de gravedad la **ley de la Dinámica de la rotación** es:

$$M_0 = I_0 \alpha$$

$I_0$  es el **momento de inercia**, que una medida de la inercia del cuerpo a rotar. Si el cuerpo se divide en  $n$  partes, el momento de inercia es:

$$I_0 = \sum m_n r_n^2$$

Aquí la  $r_n$  representa la distancia de la ene-sima parte al punto 0 (centro de gravedad) por donde pasa el eje de rotación. Nótese que en el valor del momento de inercia no sólo influye la masa sino su distribución. En los textos aparecen tablas donde, de acuerdo a la geometría del cuerpo, se da la expresión de su momento de inercia.

Un concepto importante es el de **momento angular (o momento de la cantidad de movimiento) L**, definido como:

$$L = I_0 \omega$$

**L** es un vector en la misma dirección y sentido de la velocidad angular. Para el caso de una partícula que rota alrededor de un punto,  $I_0 = mr^2$  y la expresión anterior queda como:

$$L = mr^2 \omega = mvr = pr$$

De modo similar al caso lineal, se demuestra que:

$$\Delta L = M_{0ext} \Delta t$$

Es decir, que la aplicación por un intervalo de tiempo del un momento externo sobre el cuerpo, trae consigo la variación del momento angular. En ausencia de momentos externos, se cumple:

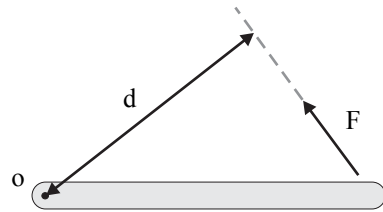
$$\Delta L = 0$$

O lo que es lo mismo: se conserva el momento angular. Esta es la **ley de conservación del momento angular**. Un cuerpo que rota en el aire, sometido a la fuerza de gravedad, no tiene momento externo aplicado ya que la fuerza de gravedad se aplica al centro de gravedad por lo que su momento es nulo. En ese caso se tiene que:

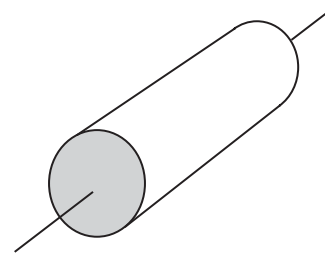
$$L_{final} = L_{inicial}$$

$$I_{of} \omega_f = I_{oi} \omega_i$$

Que permite resolver múltiples problemas, ya que si debido a fuerzas internas el cuerpo modifica su momento de inercia, como se conserva el momento angular, implicará un cambio en el valor de la velocidad angular.



$M_0$  es el momento de la fuerza  $F$  respecto al punto 0, y es igual al producto de  $F$  por  $d$ . Es un vector que en este caso sale perpendicular al plano del papel.



Ejemplo de momento de inercia. Para un cilindro macizo de masa  $m$  y radio  $r$  el momento de inercia respecto a un eje colineal a su eje es  $I_0 = 1/2mr^2$

Otro caso es el del cuerpo que inicialmente no rota, pero que una de sus partes comienza a hacerlo, rotando en un sentido determinado y adquiriendo por tanto, cierto momento angular  $L$ . Para mantener el momento angular total del cuerpo nulo como al principio, el resto del cuerpo rotará en sentido contrario, con un momento angular  $-L$ .

## Energía mecánica

Si bajo la acción de una fuerza  $F$  constante el cuerpo se desplaza una magnitud  $S$  entre los puntos A y B, se define el **trabajo** como:

$$W_{AB} = FS \cos \alpha$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo formado entre la fuerza y la dirección de desplazamiento.

Formalmente el trabajo se expresa en Nm, pero en el SI esas unidades se conocen como Joule (J). Nótese que puede ser positivo o negativo, de acuerdo al valor del ángulo.

El trabajo realizado por unidad de tiempo se conoce como **potencia** y su unidad es el Watt.

Vamos a definir la **energía cinética** de una partícula de masa  $m$  que se mueve con una velocidad  $v$  como:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Y es una medida del movimiento del cuerpo. Si sobre la partícula actúa una fuerza a lo largo de su trayectoria, puede demostrarse que el trabajo realizado por esa fuerza en llevar a la partícula del punto A al B es:

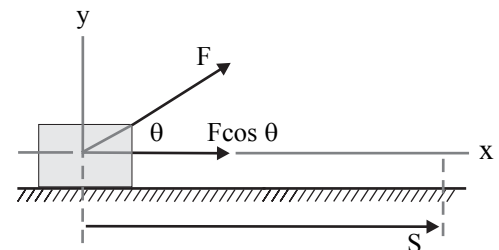
$$W_{AB} = E_{cB} - E_{cA}$$

Esta expresión se conoce como **Principio o Teorema del Trabajo y la Energía**. Siendo estas magnitudes escalares, el Teorema puede servir para resolver problemas de forma más sencilla. Es importante notar que si bien la energía caracteriza un estado, el trabajo caracteriza un proceso.

El concepto de **energía potencial** está asociado a las llamadas **fuerzas conservativas**. Estas fuerzas se caracterizan porque el trabajo a ellas asociado es independiente de la trayectoria, dependiendo sólo de los puntos inicial y final. Si el trabajo depende de la trayectoria, se dice que son fuerzas no conservativas, o como también se les conoce, disipativas. Las fuerzas de fricción son fuerzas disipativas.

La energía potencial está asociada a la posición (a diferencia de la cinética, relacionada con la velocidad) y su variación se corresponde con el trabajo de una fuerza conservativa, o sea:

$$W_{AB} = -\Delta E_p = E_{pA} - E_{pB}$$



Una fuerza  $F$  que forma un ángulo  $\theta$  con la dirección de movimiento y que desplaza al cuerpo una distancia  $S$  realiza sobre el mismo un trabajo  $FS \cos \alpha$ .

Dicho de otra manera: el trabajo de una fuerza conservativa se puede expresar como la variación de energía potencial.

Un ejemplo de fuerza conservativa es la fuerza de gravedad. Para este caso, la energía potencial gravitatoria se define según la expresión:

$$E_{pg} = mgh$$

Siendo h la altura de la partícula. Para la **fuerza elástica (del tipo  $F = -kx$ , donde k es el coeficiente de restitución elástica y x la deformación del elemento elástico)**, se tiene que la energía potencial elástica es:

$$E_{pe} = \frac{1}{2} kx^2.$$

Definiremos la **energía mecánica** como la suma de la energía cinética y potencial de una partícula, o sea:

$$E = E_c + E_p$$

Puede demostrarse que la variación de energía mecánica es igual al trabajo de las fuerzas no conservativas:

$$W_{\text{fuerzas no conserv}} = \Delta E$$

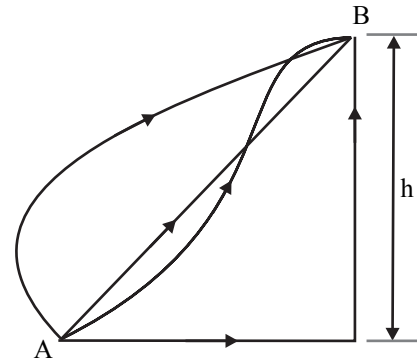
Por tanto, en un proceso en el no haya fuerzas disipativas (no conservativas) o que al menos su trabajo sea nulo se tiene que:

$$\Delta E = 0$$

Es decir, se conserva la energía mecánica. Esto es lo que se conoce como **Ley de conservación de la energía mecánica**, válida sólo para fuerzas conservativas e implica que:

$$E_{\text{inicio}} = E_{\text{final}}$$

Nótese que esto es sólo válido cuando no hay fricción. Pueden variar los valores individuales de la energía cinética y de la energía potencial pero de forma tal que su suma, la energía mecánica es constante.



La fuerza de gravedad es un ejemplo de fuerza conservativa. El trabajo necesario para llevar un cuerpo de masa m desde el punto A al B será siempre el mismo, independiente del camino escogido, e igual a mgh.

## TAREAS PROPUESTAS

### Fuerzas

1) ¿Cómo es posible que un bote a vela pueda navegar en contra del viento?



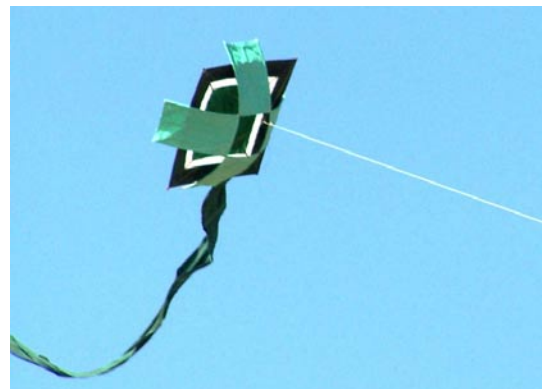
2) ¿Cómo funciona la hélice del molino de viento o de la turbina eólica?



3) Una forma muy antigua de construcción de puentes o basamentos de edificaciones son los arcos de piedra ¿cómo explicar la fortaleza de esta estructura?

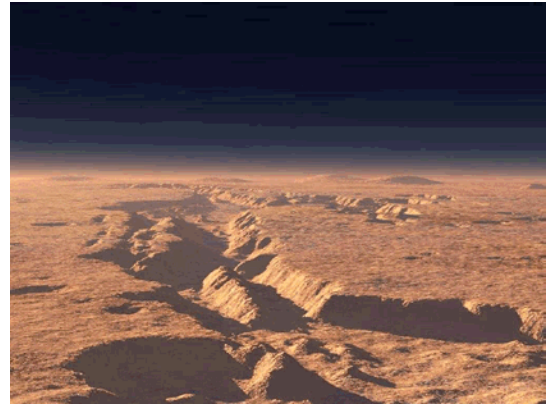


4) El papalote es un juguete prácticamente universal ¿cómo es posible justificar su vuelo?



## Centro de gravedad

5) Debido a lo accidentado del terreno en Marte, en comparación con la Luna, se diseñaron alternativas para los móviles que pudieran desplazarse en dicho planeta. Una de ellas es una esfera que contiene en su interior el instrumental para poder llevar a cabo las investigaciones. Explique su funcionamiento.



6) Todos hemos experimentado que hay jarras en las que es más fácil verter el agua que en otras, en las que hay que hacer un mayor esfuerzo ¿Cómo diseñar una jarra óptima en tal sentido?



7) El dominguín o tentempié es un popular juguete, pero ¿cómo funciona?



8) Explique por qué el record mundial salto alto pudo avanzar casi 20cm en los últimos 35 años.





## Movimiento lineal

9) La experiencia demuestra que al disparar un fusil, la salida de la bala provoca un “culateo” del mismo. Fundamente por qué.



10) Los autos de más avanzadas tecnologías utilizan el airbag cómo sistema de protección. Explique y fundamente su funcionamiento.



11) Uno de los equipos para diagnósticos del corazón es el balistocardiógrafo. Explique su funcionamiento.



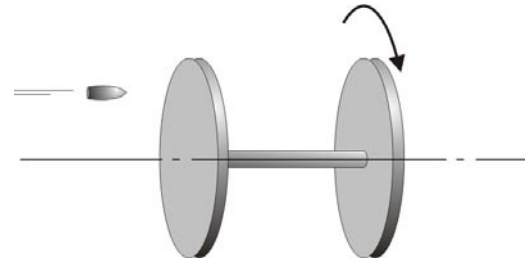
12) A diferencia de los aviones los cohetes no requieren del aire para moverse en el espacio. Explique cómo esto es posible.

13) En 1984 se dio un paso de importancia en las investigaciones espaciales, cuando un cosmonauta logró por primera vez realizar una recorrido sin estar conectado a la nave. Para ello empleó un sillón conocido como Unidad Autónoma de Vuelo. Proponga una explicación de cómo logró moverse en las condiciones de falta de atmósfera.



## Movimiento de rotación

14) Una forma de medir la velocidad de una bala es un sistema formado por dos discos paralelos unidos por un eje. La bala es lanzada paralela al eje común e impacta a ambos discos. Proponga una explicación de cómo sería posible medir la velocidad de la bala.



15) Hoy las lavadoras domésticas no solo lavan la ropa, sino la secan. Proponga una explicación de cómo funciona la secadora.



16) Con vistas a controlar la contaminación de la atmósfera debido a procesos industriales se utiliza el llamado separador centrífugo de polvo. Investigue su funcionamiento.



17) En las carreteras observamos que en las curvas existe un ángulo de inclinación llamado peralte. Explique por qué esto es necesario.



18) Es común que los equilibristas se ayuden con una larga vara para poder caminar sobre una cuerda. Explique.



19) Si vamos en la bicicleta, en línea recta sin tocar el timón, basta una pequeña inclinación del cuerpo hacia un lado para que la rueda gire ¿por qué?



20) Bailarines, clavadistas y patinadores logran variar su velocidad de rotación. Argumente por qué esto es posible.



21) ¿Es posible construir un helicóptero con una sola hélice? Argumente su respuesta.

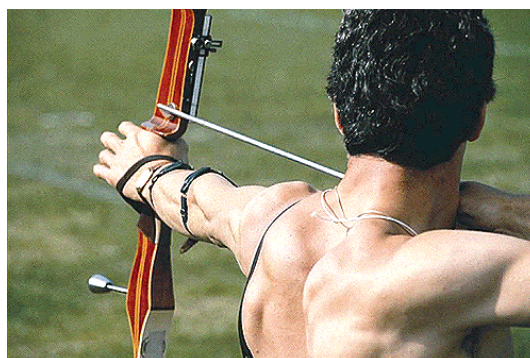


## Energía mecánica

22) Uno de los eventos más complejos del atletismo es el salto con pértiga. Haga un estudio energético del mismo.



23) Explique como se manifiesta la conservación de la energía mecánica para el caso de una flecha lanzada por un arco.



24) El péndulo, formado por un hilo y un cuerpo en su extremo, resulta útil para medir el tiempo. Estudie la conservación de la energía en su movimiento.



25) En los últimos años se ha hecho popular el deporte conocido como bungee cord, que consiste en lanzarse desde una altura considerable atado a una cuerda elástica. Estudie el comportamiento energético.

## MECÁNICA DE LOS FLUIDOS

### Hidrostática

La hidrostática es la parte de la Mecánica de los Fluidos que estudia el caso de fluidos en reposo. Se entiende por **fluido una sustancia que es capaz de fluir**, de adaptarse a la forma del recipiente que lo contiene. Tal es el caso de los líquidos y los gases. No obstante, existe una notable diferencia entre ambos dada por la compresibilidad. En efecto, los gases son fácilmente compresibles, no así los líquidos.

Por las características del fluido, no es posible aplicar una fuerza en un punto, de ahí la necesidad del concepto de presión, para describir la acción de una fuerza. Si esta actúa sobre la superficie A, se tiene que la presión es:

$$P = F/A$$

F es la fuerza perpendicular a la superficie de valor A. De ahí que la **presión sea la fuerza por unidad de área**. En el SI la magnitud que se utiliza es el Pascal (Pa).

En ocasiones se usa la atmósfera, donde 1 atm = 1013hPa. También se acostumbra a dar la presión en unidades de mm de mercurio. En ese caso, 1 atm = 760mm.

En la tabla se muestran algunos valores de presión de interés.

Valores de Presión	(en Pa)
centro de la tierra	$4 \times 10^{11}$
rueda de automóvil	$2 \times 10^5$
atmósfera a nivel del mar	$1,0 \times 10^5$
sonido más débil detectable	$3 \times 10$
mejor vacío de laboratorio	$10^{-12}$

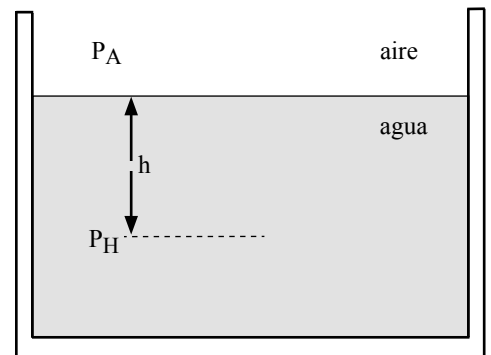
Se dice que el fluido es **incompresible si su densidad de masa, o sea,  $\rho = m/V$  es constante**, de lo contrario resulta **compresible**.

Otro concepto de interés es el de **viscosidad**, entendido como **la existencia de rozamiento entre las capas internas del fluido**. De acuerdo a sus características, el fluido puede ser viscoso o no.

**La presión en un punto interior de un fluido se conoce como presión hidrostática**. Para el caso de un líquido incompresible es igual a:

$$P_H = \rho gh + P_A$$

Donde  $\rho$  es la densidad de masa, g es la aceleración de la gravedad y h es la distancia a la que se encuentra el punto respecto a la superficie del líquido, independiente de la forma del recipiente.



Presión hidrostática

$P_A$  es la presión en la superficie, que de estar al aire libre no es más que la **presión atmosférica**, esto es, la fuerza por unidad de superficie ejercida por la atmósfera.

En la atmósfera, el peso cada vez menor de la columna de aire a medida que aumenta la altitud hace que disminuya la presión atmosférica local. Así, la presión disminuye desde su valor de 1013hPa al nivel del mar hasta unos 2,35 Pa a 10.700 m (una altitud de vuelo típica de un avión a reacción) Esto se describe con la ayuda de la llamada **fórmula barométrica**:

$$P = P_A e^{-\mu gh/RT}$$

Aquí h es la altura a la cual la presión es P;  $\mu$  es la masa molecular del aire; R la constante universal de los gases, en tanto T es la temperatura.

Un principio básico de la Hidrostática es la **Ley de Pascal: la presión aplicada a un fluido contenido en un recipiente se transmite sin disminución a toda porción del mismo y a las paredes del recipiente**. Esta ley tiene múltiples aplicaciones.

El otro principio de la Hidrostática es el Principio de Arquímedes. Se aplica para el caso de un cuerpo que se encuentra inmerso, parcial o totalmente en un fluido y dice así: **el fluido ejerce sobre el cuerpo una fuerza de empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desplazado. Esta fuerza está aplicada en el centro de gravedad de dicho volumen**.

Nótese que hemos hecho énfasis en el punto de aplicación de la fuerza de empuje, cosa que no se aclara lo suficiente en algunos textos. La fuerza de empuje se aplica en el centro de gravedad del volumen desplazado, que no tiene por qué coincidir con el centro de gravedad del cuerpo que ahora ocupa ese volumen.

La relación entre la fuerza de empuje y la fuerza de gravedad sobre el cuerpo determina si un cuerpo de *densidad homogénea* flota o se hunde en el fluido. Esto viene dado por la correlación entre las densidades del fluido y del cuerpo. En efecto, si la fuerza de empuje es igual al peso del volumen desplazado, entonces:

$$F_E = mg = \rho_F V_D g$$

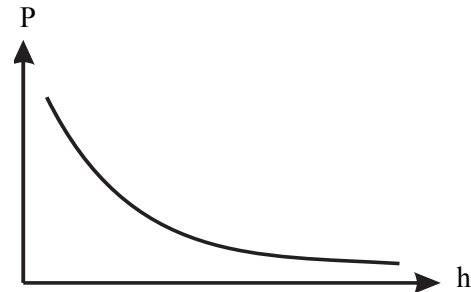
Por otro lado, la fuerza de gravedad sobre el cuerpo es:

$$F_g = mg = \rho_C V_C g$$

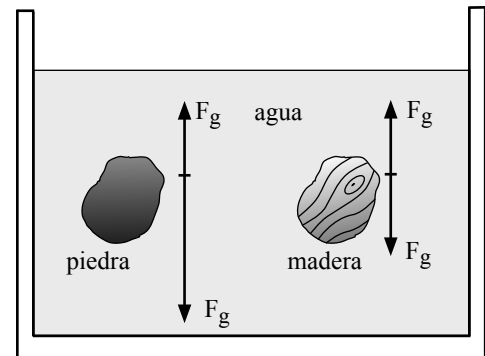
Supongamos el caso especial en que el cuerpo está totalmente sumergido en un fluido en equilibrio, sin tocar fondo.

Esto prueba que ambas fuerzas son iguales. Haciendo  $F_E = F_g$  concluimos que:  $\rho_C = \rho_F$ . De manera que si la densidad del cuerpo supera a la del fluido, se hunde, ya que significa que la fuerza de gravedad supera a la de empuje.

En el caso de la flotación el volumen de fluido desplazado cumple que:



Variación de la presión atmosférica con la altura



Fuerzas sobre cuerpos sumergidos en agua

$$V_D < V_C$$

Igualando las expresiones de las fuerzas, se llega a:

$$\begin{aligned} F_E &= F_g \\ r_F V_D g &= r_C V_C g \\ r_C / r_F &= V_D / V_C \end{aligned}$$

Es decir, la relación entre las densidades es inversa a la proporción entre los volúmenes.

Si el cuerpo que flota no es homogéneo, entonces  $r_C$  se toma como una densidad promedio.

## Hidrodinámica

Tal y como su nombre sugiere, la Hidrodinámica estudia el movimiento de los fluidos. De acuerdo a sus características, este puede ser:

- Incompresible o compresible
- No viscoso o viscoso
- Estacionario o turbulento**

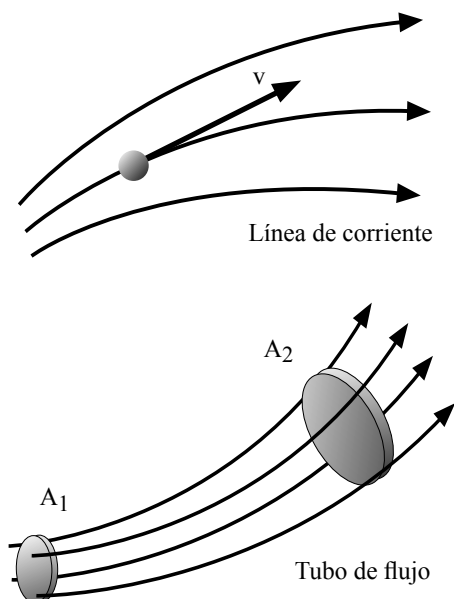
En aras de la simplicidad, trataremos con el llamado **fluido perfecto**, que es aquél que es incompresible, no viscoso y estacionario. Esta última cualidad se refiere a que la velocidad, así como los otros parámetros que caracterizan al fluido como la presión, la densidad y la temperatura en cada punto no varían con el tiempo. Un caso particular es el fluido **uniforme**, en el que la velocidad además es la misma en cada uno de sus puntos. Un fluido en régimen turbulento presenta un esquema de velocidades totalmente caótico.

Si se sigue el movimiento de una partícula del fluido, esta describe una trayectoria que se conoce como **línea de corriente**. La velocidad es tangente a cada punto de la línea de corriente. Una propiedad de estas líneas es que no pueden cortarse.

Sea un fluido perfecto, y tomemos un **tubo de flujo**, o sea, un volumen definido por infinitud de líneas de corrientes que conforman una superficie que encierra al volumen. Sean además dos áreas perpendiculares al movimiento del flujo,  $A_1$  y  $A_2$ . La velocidad del fluido en esas superficies es  $v_1$  y  $v_2$  respectivamente. **La ecuación de continuidad establece que:**

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

La magnitud  $Av$  se conoce como gasto y representa el volumen de fluido que atraviesa una sección transversal al tubo de flujo por unidad de tiempo. De manera que la ecuación de continuidad establece que esta cantidad no varía a lo largo de un tubo de flujo.



Esto es sólo válido para líquidos perfectos o que en la práctica puedan modelarse como tales y es una consecuencia de la conservación de la masa, o sea, de que no existan fuentes ni sumideros de fluido.

De esta ecuación se concluye que si las áreas son distintas, así lo serán las velocidades, lo cual explica el aumento de velocidad de un fluido al pasar por un estrechamiento.

Manteniendo las condiciones del fluido y utilizando los conceptos de trabajo y energía puede obtenerse el llamado **Principio de Bernoulli**. Para enunciarlo tomemos dos secciones del tubo de flujo, 1 y 2. Para cada una de ellas están definidos los parámetros de área, velocidad, presión y altura respecto a un nivel dado.

Entonces se cumple que:

$$P_1 + \rho g y_1 + 1/2 \rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + 1/2 \rho v_2^2$$

O sea que:

$$P + \rho g y + 1/2 \rho v^2 = \text{constante}$$

Que es el Principio de Bernoulli. La suma de los dos primeros términos se conoce como **presión estática**. El último término es llamado **presión dinámica**. Este principio permite explicar innumerables fenómenos así como el funcionamiento de diversos productos. Nótese que si la altura en el tubo de flujo no varía, la expresión queda como:

$$P_1 + 1/2 \rho v_1^2 = P_2 + 1/2 \rho v_2^2$$

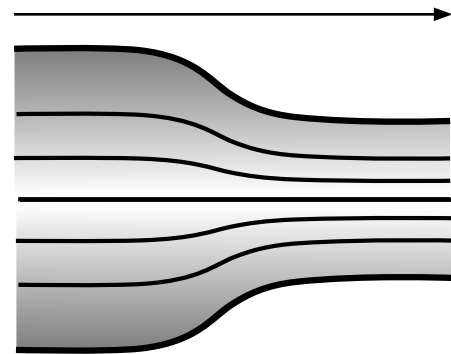
De lo cual se deduce que si en una zona la presión aumenta, provoca una disminución de la velocidad.

Para el caso de fluidos viscosos, se introduce el **coeficiente de viscosidad**  $\eta$ . Este coeficiente disminuye con el aumento de la temperatura, lo cual se evidencia en la vida diaria. La existencia de viscosidad hace que en una tubería, los puntos que se mueven más cerca de las paredes tengan menor velocidad respecto al centro.

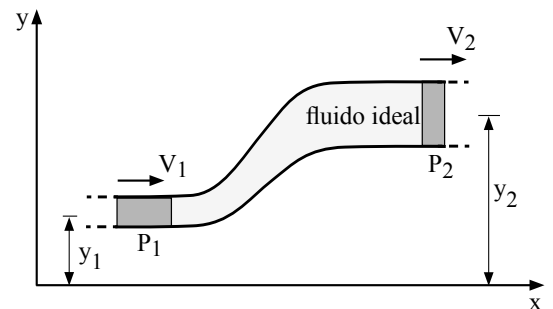
Hay que destacar que si hay viscosidad, en la expresión del principio de Bernoulli aparece un término adicional relacionado con una caída de presión con la longitud. Quiere decir que en un tubo horizontal y de igual sección transversal, ocurre una disminución de la presión a lo largo del mismo.

## Fenómenos de superficie

Abordaremos algunos aspectos de interés relacionados con la superficie de los líquidos. Aquí las moléculas se comportan de manera diferente a las que se encuentran dentro del volumen. En efecto, las moléculas que están en el entorno de la superficie presentan una atracción no compensada hacia el interior del líquido por parte de las fuerzas moleculares que hace que la superficie se manifieste como una membrana elástica en estado de tensión.



En un estrechamiento la velocidad del fluido aumenta



Esquema para comprender el principio de Bernoulli



Supongamos que en un marco tenemos una película jabonosa que contiene un hilo con un lazo como se muestra en la figura. Si la película jabonosa del interior del lazo se pincha y se elimina, este adquiere forma circular, demostrando que en la capa jabonosa hay fuerzas en dirección radial que en un inicio estaban compensadas, pero que posteriormente no.

Este comportamiento de la superficie se conoce como **tensión superficial**. Del ejemplo anterior se concluye que las fuerzas que provocan el estado de tensión actúan tangencialmente a la superficie. Una medida del fenómeno es el **coeficiente de tensión superficial**  $\sigma$ , que depende de las características del líquido. El coeficiente de tensión superficial también depende de la temperatura, disminuyendo con el aumento de la misma.

Un concepto afín es el de **energía superficial**. Se considera que la superficie, al igual que una membrana, posee una energía potencial que depende proporcionalmente del área. Esto explica la formación de una gota, en la que por su pequeño volumen, los fenómenos de superficie son de relativa importancia. Al tender a un estado de energía mínima, escoge una forma esférica por ser la de menor superficie para igual volumen. Esta energía de superficie depende también, por supuesto, del coeficiente de tensión superficial  $\sigma$ .

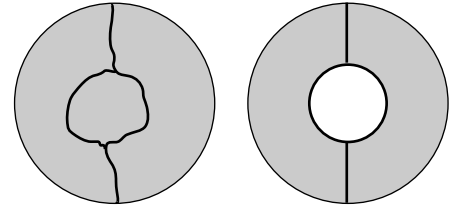
Hasta el momento hemos considerado que la superficie del líquido está en contacto con el aire. Ahora bien, al estudiar el comportamiento de la superficie limítrofe del líquido en contacto con otros gases o con sólidos, se llega a la conclusión que puede ser diferente. Esto implica que el coeficiente de tensión superficial  $\sigma$  de un líquido no es el mismo si está en contacto con un sólido u otro.

Si se coloca una gota de agua sobre una superficie de vidrio y otra gota sobre cartón parafinado pueden observarse comportamientos diferentes. En el primero la gota se esparce como si una fuerza tangencial a la superficie del vidrio la halara. En el otro caso, esta fuerza no es capaz de romper la forma de la gota. **El ángulo que se señala es el ángulo de contacto  $\theta$ .**

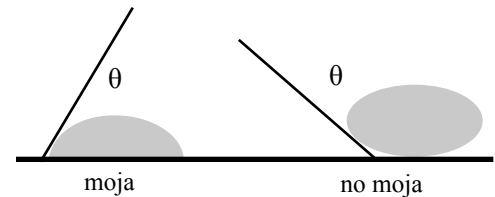
En el primer caso se dice que el líquido **moja**; en el segundo que **no moja**. Un mismo líquido puede mojar sobre una superficie o no mojar sobre otra. Queda claro que si el ángulo de contacto es menor de  $90^\circ$  hay mojadura; si el ángulo es mayor que  $90^\circ$ , no moja.

Esto también se manifiesta cuando un líquido está contenido en un recipiente. Obsérvese que aunque en el ejemplo anterior no hicimos referencia, existe contacto no sólo con el sólido del recipiente sino con el aire, por lo que se tienen fronteras o capas de separación: sólido – aire; sólido – líquido y líquido – aire.

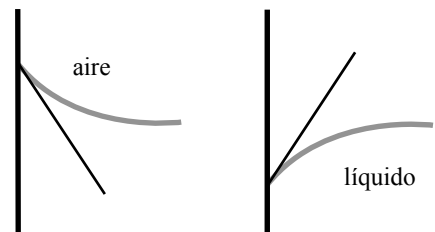
En el primer caso de la figura la superficie del líquido se eleva al contacto con el recipiente, formando un **menisco**. **El ángulo de contacto** es ahora el ángulo entre la tangente a la curvatura y la pared del recipiente.



Al eliminar la película jabonosa el lazo adquiere forma circular debido a fuerzas en dirección radial.



Diferencia entre el líquido que moja y el que no moja la superficie horizontal



Diferencia entre el líquido que moja y el que no moja la superficie, en este caso la formación de meniscos por el líquido contenido en un recipiente.

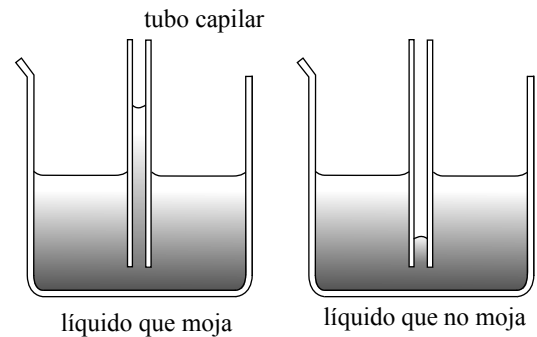
En este caso es menor de  $90^\circ$  por lo que el líquido **moja**. Si el ángulo es mayor que  $90^\circ$  el líquido **no moja**, siendo el menisco a la inversa, o sea, hacia abajo.

Por último, entre estos fenómenos de superficie tenemos la **capilaridad**, de amplia importancia práctica. La capilaridad no es más que el hecho de que dado un tubo muy fino (capilar), el líquido puede ascender o descender por encima o por debajo del nivel del líquido, en dependencia si es un líquido que moje o no.

La altura  $h$  que el líquido asciende (o baja) en el capilar viene dada por la expresión:

$$h = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho g R}$$

Donde  $R$  es el radio del tubo capilar. El signo del coseno determina si  $h$  es positiva (sube) o negativa (baja)



El fenómeno de capilaridad se presenta diferente entre los líquidos que mojan y los que no mojan la superficie de contacto.

## TAREAS PROPUESTAS

### Hidrostática

- 1) Explique el funcionamiento de la prensa hidráulica y haga una comparación entre los equipos hidráulicos y neumáticos.



- 2) El esfigmomanómetro se utiliza para medir la presión arterial. Explique su funcionamiento.



- 3) Investigue el funcionamiento del spray o aerosol.

- 4) Investigue cuál es la altura máxima que puede tener una tubería de un pozo abierto para que una bomba sobre la superficie pueda subir el agua.

- 5) Hoy en día los aeróstatos se siguen utilizando con fines recreativos y científicos. Explique su funcionamiento.



6) En un recipiente que está lleno de agua hasta el borde flota un pedazo de hielo. ¿Se derramará el agua cuando se derrita el hielo? No considere los efectos de la tensión superficial.



7) Los icebergs son grandes volúmenes de hielo que flotan en las aguas heladas de los polos. Encuentre la fracción del iceberg que emerge.



8) Al igual que Arquímedes, proponga cómo demostrar que la corona del rey Hierón era de oro puro.

9) Un densímetro o areómetro es un tubo cerrado de vidrio que en su extremo contiene un contrapeso de plomo de modo que al flotar en un líquido, la superficie marca una escala. Explique por qué sirve para medir la densidad de un líquido.



10) Desde un bote sobre una piscina se lanza una piedra. Explique qué ocurre con el nivel de agua de la piscina si la piedra se lanza: a) a la orilla b) a la piscina. Explique también qué ocurre si el cuerpo lanzado no es una piedra sino uno que flota.

11) Proponga una explicación de cómo puede sumergir y emerger un submarino.

## Hidrodinámica

12) A pesar que son mas densos que el aire los aviones son capaces de volar. Explique cómo es posible.



13) Proponga una explicación al funcionamiento del aparato de pintura con compresor de aire.



14) El carburador es un agregado imprescindible del motor de combustión interna. Investigue cómo funciona.



15) Todos hemos visto el Kometa, embarcación que posee un sistema llamado hidroala, que le permite alcanzar altas velocidades. Explique su funcionamiento.



16) Proponga una explicación al fenómeno de la “curva” de la pelota de béisbol.

## Fenómenos de superficie

- 17) Explique cómo se fabrican los perdigones.
- 18) ¿Cómo es posible que una aguja de acero, que es más densa que el agua, pueda flotar en su superficie?
- 19) Mencione y explique varias aplicaciones del fenómeno de la capilaridad.
- 20) La formación de la espuma puede observarse en los extintores de fuego y en algunas bebidas. Proponga una explicación.



## OSCILACIONES MECÁNICAS Y TERMODINÁMICA

### Oscilaciones mecánicas

El **movimiento oscilatorio** es un tipo de movimiento periódico, esto es, que tiene características que se repiten en el tiempo. Otro tipo de movimiento periódico es, por ejemplo, el movimiento circular uniforme. Sin embargo el movimiento oscilatorio es un movimiento unidireccional, de vaivén. De modo general requiere de dos factores: una **fuerza recuperadora** (también llamada elástica) y un **elemento inercial**.

Supongamos que inicialmente el cuerpo o sistema que realiza la oscilación se encuentra en equilibrio. Su posición respecto a un sistema de referencia dado es entonces su **posición de equilibrio**. Si se aleja de esta posición, la distancia desde el punto en el que se halla y la posición de equilibrio se conoce como **elongación**. La elongación máxima que puede alcanzar se llama **amplitud** de la oscilación. La fuerza recuperadora es aquella que hace que el cuerpo retorne a la posición de equilibrio una vez que alcance la amplitud de su movimiento. El elemento inercial hace que el cuerpo, una vez que arriba a la posición de equilibrio, continua su movimiento hasta llegar a la amplitud (en sentido opuesto) y repetir el ciclo.

Un caso especial y de gran importancia es el **movimiento armónico simple** (MAS) que podemos caracterizar por tres aspectos:

La fuerza recuperadora es proporcional a la elongación y puede expresarse como:

$$F = - kx$$

Donde  $k$  es el **coeficiente de restitución elástica**. Una fuerza de este tipo puede proporcionarla un cuerpo elástico, tal como una banda de goma o un resorte.  $x$  representa la elongación, por lo que se evidencia que en el punto de equilibrio ( $x = 0$ ) la fuerza recuperadora es nula. El signo menos indica que el sentido de la fuerza es siempre contrario al sentido de aumento de la elongación.

No existen fuerzas disipativas (fricción), por lo que la energía mecánica se conserva.

No existe agente externo actuando sobre el sistema, salvo en el momento de excitación inicial.

En el caso particular de MAS mecánico el elemento inercial es la masa.

Se define el **período T** como el tiempo que el cuerpo emplea en realizar una oscilación completa, o sea: salir del punto de equilibrio, alcanzar la amplitud, regresar por el punto de equilibrio, alcanzar la amplitud en sentido opuesto a la primera y llegar de nuevo a la posición de equilibrio. La **frecuencia f** es el inverso del período, es decir, el número de oscilaciones que se realizan por unidad de tiempo. Por razones prácticas se introduce la **frecuencia angular**  $\omega = 2\pi f$ .

Se define además la **fase** del movimiento como el valor de la elongación en el momento inicial en el que el tiempo  $t = 0$ .

La ecuación del MAS es:

$$x = A \text{ sen } (\omega t + \varphi_0)$$

Donde A es la amplitud del movimiento y  $\varphi_0$  la fase.

El esquema muestra el movimiento armónico simple de un cuerpo de masa m. Obsérvese como varía la velocidad del cuerpo de acuerdo a su posición, y como al transcurrir un tiempo equivalente a un período, la situación vuelve a repetirse.

La ecuación de la velocidad para el MAS es:

$$v = \omega A \text{ cos } (\omega t + \varphi_0)$$

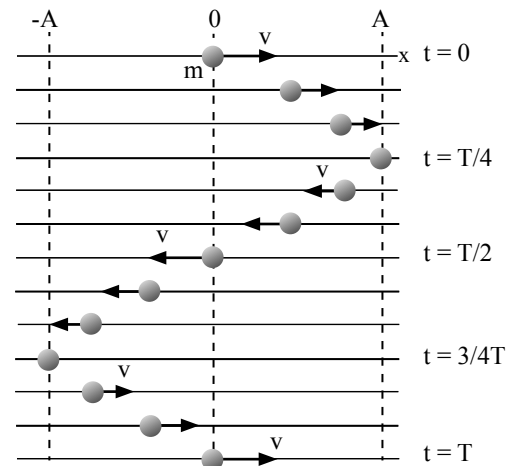
En la figura se muestran los gráficos de elongación y velocidad en función del tiempo donde se aprecia la dependencia periódica.

Cada sistema que realiza un MAS posee una frecuencia de oscilación propia  $\omega_0$ , que depende de las condiciones geométricas y de los factores que propician este movimiento. Por ejemplo, en un péndulo depende de la longitud del mismo y de la gravedad; en un sistema cuerpo resorte, de la masa y la constante de restitución del mismo.

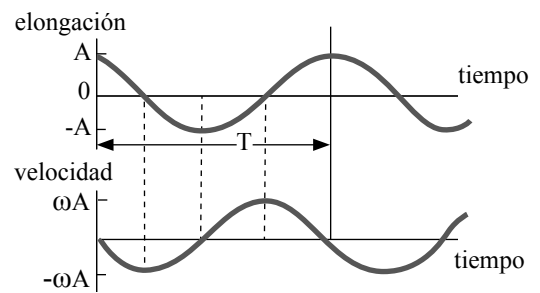
Como se ha dicho, en el MAS no hay agentes disipativos, por lo que la energía mecánica se conserva. Un análisis desde el punto de vista energético muestra que en los puntos de máxima elongación, el sistema no posee energía cinética (instantáneamente está en reposo) y por tanto toda su energía es potencial. Por el contrario, al pasar por la posición de equilibrio, la energía potencial es mínima y máxima la cinética. En cada punto del movimiento, la suma de ambas energías (cinética y potencial) da un valor constante, que es la energía mecánica total.

Si existe un elemento disipador, entonces la energía mecánica no se conserva y la amplitud decrece con el tiempo. Es el caso del **movimiento armónico amortiguado**. El elemento disipador se cuantifica a través de un factor de amortiguamiento b, que depende de las condiciones concretas del sistema (fricción, etc)

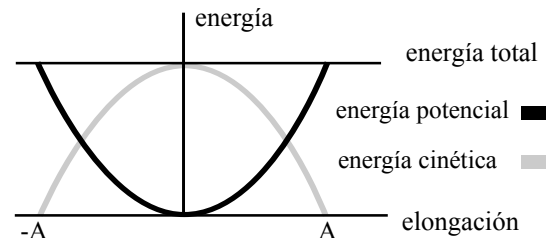
Si el sistema oscilante está bajo la influencia de un agente exterior de carácter periódico, o sea, una fuerza que actúa con cierta frecuencia, el sistema puede realizar lo que se denomina **movimiento armónico forzado**. Este agente compensa la acción del agente disipativo.



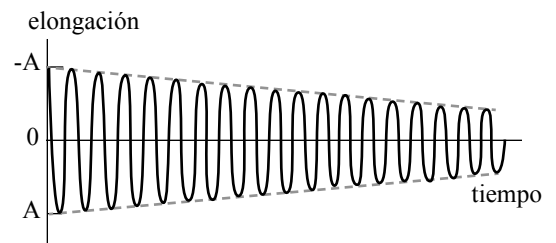
Variación de la velocidad de un cuerpo que se mueve con MAS.



Gráficas de la elongación y la velocidad en función del tiempo para un MAS.



Gráfica de variación de la energía con la elongación para un MAS.



Variación de la amplitud con el tiempo para un movimiento armónico amortiguado.

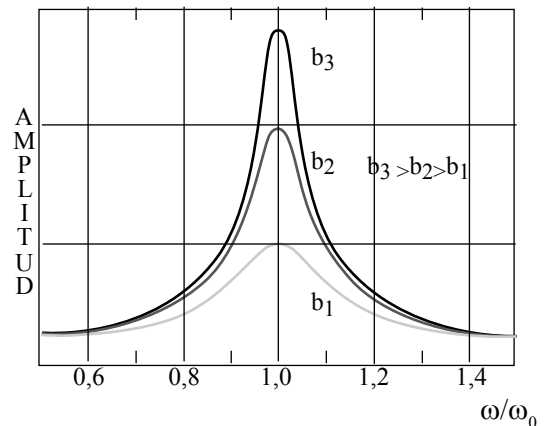


La acción del agente compensador sobre el sistema oscilante conlleva dos fases. Una fase inicial que es transitoria, en la que el sistema deja de oscilar con su frecuencia propia para ir poco a poco asumiendo al frecuencia de la fuerza externa. La segunda fase es cuando ya la frecuencia del sistema no es la propia sino la del agente compensador. De ahí el nombre de oscilación forzada.

Un fenómeno de gran importancia práctica es la **resonancia**. Se observa que cuando la frecuencia del agente exterior  $\omega$  se aproxima al valor de la frecuencia propia del sistema  $\omega_0$ , las amplitudes de las oscilaciones son mayores.

Las elongaciones pueden entonces alcanzar valores que superen el límite de resistencia mecánica del sistema y provocar, incluso, su destrucción.

En la figura se muestra la dependencia de la amplitud con distintos valores del factor de amortiguamiento  $b$ . En la medida que este factor disminuye y que  $\omega$  se hace igual a  $\omega_0$ , las amplitudes son mayores.



Curva de resonancia. Dependencia de la amplitud con el factor de amortiguamiento  $b$ .

## Ondas mecánicas

Para que exista una onda mecánica es necesaria la existencia de un **medio mecánico**. Este medio se caracteriza porque es **capaz de oscilar**, por tanto, tiene las propiedades de **elasticidad e inercia**. Una forma de visualizar este medio mecánico es considerándolo **un conjunto de osciladores acoplados**. De manera que **una onda mecánica es una perturbación que se transmite a través de un medio**.

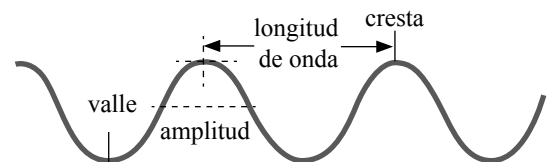
Hay que puntualizar que el medio no se mueve en conjunto, son sus partes las que oscilan limitadamente. En aras de la simplicidad, asumiremos que esas oscilaciones corresponden a un movimiento armónico simple. De modo que la energía se transmite al pasar de una porción del medio a la otra.

Un **pulso** es una onda única, una perturbación localizada, a diferencia de un **tren de ondas**, en que se genera una perturbación periódica en el tiempo. El **frente de onda** es el lugar geométrico de los puntos del medio que se mueven con igual fase, o sea, que describen el mismo movimiento.

De acuerdo a la forma del frente de onda, la onda se clasifica en plana o esférica, para el caso tridimensional. El **rayo** es la línea que indica la dirección de propagación, perpendicular al frente de onda. Una onda viajera es aquella que se propaga libremente.

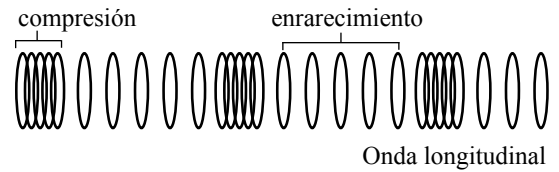
Según la forma de oscilar las partículas del medio, las ondas se clasifican en:

**Transversal.** Las partículas del medio oscilan en una dirección perpendicular al movimiento de propagación. Tal es el caso de las ondas en una cuerda



Onda transversal

**Longitudinal.** Las partículas del medio oscilan en la misma dirección de propagación. Un resorte al que se le comprime una sección es un buen ejemplo.



Hay casos que no son ni lo uno ni lo otro, como son las ondas formadas en la superficie de un líquido, en que las partículas describen un movimiento más bien circular.

De acuerdo al número de dimensiones en la que se propaga la energía, las ondas pueden ser: unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales.

Para las ondas se establecen una serie de parámetros, como son:

**Amplitud.** Es el valor más alto de las elongaciones de la oscilación.

**Periodo.** El tiempo en que cada oscilar realiza una oscilación completa.

**Frecuencia.** Es el inverso del periodo.

**Longitud de onda.** ( $\lambda$ ) Es la distancia entre dos puntos contiguos que están en fase (dos valles o dos crestas)

**Velocidad.** Es la velocidad con que se propaga la perturbación.

Entre ellas se establecen relaciones de interés:

$$T = 1/f$$

$$v = \lambda f$$

La velocidad depende en general de características del medio. Por ejemplo, en una onda en una cuerda depende de la raíz del cociente entre la tensión de la cuerda y su densidad.

**El principio de superposición** plantea que **el movimiento de una partícula es la suma de los movimientos debido a ondas individuales (las ondas actúan independiente una de otras)** Esto es lo que permite, al oír una orquesta, escuchar cada instrumento de forma independiente.

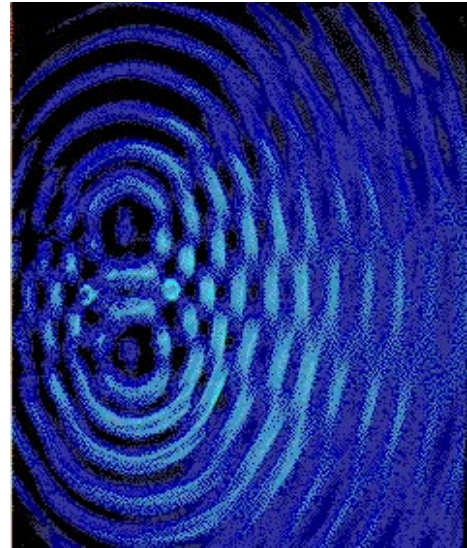
La intensidad de la onda se define como el flujo de energía, esto es, la energía por unidad de área y unidad de tiempo. De forma general, la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud y a la velocidad de la onda.

Cuando una onda llega a la superficie de separación de dos medios, parte se refleja y parte continúa. Qué parte se refleja y qué parte se transmite depende de las características de los medios. La velocidad de propagación al pasar al nuevo medio cambia, no así la frecuencia. La longitud de onda, de acuerdo a la relación  $v = \lambda f$  también cambiará.

En la **reflexión** se cumple que el ángulo que forma el rayo incidente con la perpendicular a la superficie (ángulo de incidencia) es igual al ángulo que forma el rayo reflejado (ángulo reflejado).

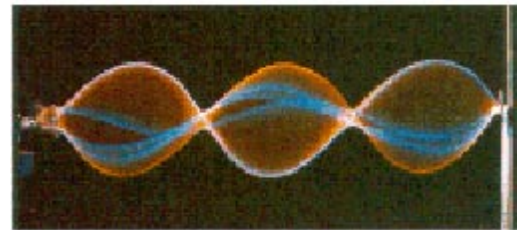
La **refracción** se refiere a la desviación de la dirección del rayo al atravesar la superficie de separación de dos medios en los que la velocidad de propagación no es la misma. Si la onda viaja de un medio de mayor velocidad a otro de menor velocidad, tiende a desviarse hacia la perpendicular a la superficie; si va a un medio de velocidad mayor se desvía hacia la superficie de separación. Si la incidencia es perpendicular a la superficie de separación, la onda refractada mantiene esa misma dirección.

Un fenómeno importante es la **interferencia**, definida como la **superposición de 2 o más frentes de ondas**. Cuando las ondas que interfieren tienen igual velocidad, frecuencia y amplitud, pero diferentes fases, ocurren efectos constructivos y destructivos en distintas zonas del medio. Esto significa que habrá zonas donde la amplitud se refuerza y en otras donde la amplitud resultante será mínima. La imagen muestra la interferencia de ondas sobre la superficie de un líquido.



Interferencia de ondas en la superficie de un líquido.

Si las ondas viajan en sentido contrario, con igual velocidad, frecuencia y amplitud, así como diferencia de fase de  $\pi$ , se da el fenómeno de **ondas estacionarias**. Aparecen puntos de mínima amplitud y otros de máxima, que no varían en el tiempo, llamados **nodos** y **antinodos**. En la figura se muestra una cuerda que vibra entre dos extremos fijos.



Ondas estacionarias en una cuerda fija por sus extremos.

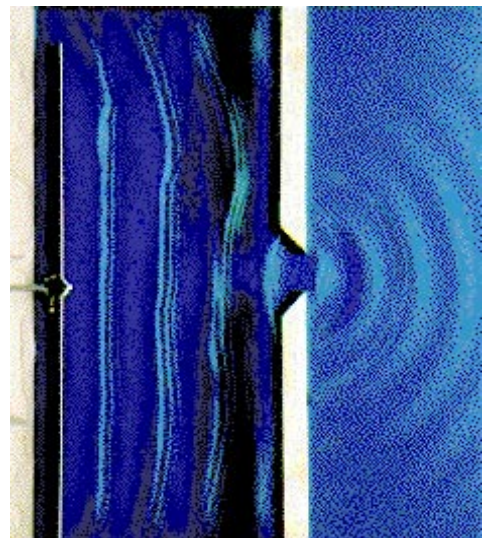
La **difracción** ocurre cuando la longitud de onda es comparable con las dimensiones del objeto u obstáculo que la onda encuentra en su camino. Entonces, la onda se desvía de su dirección inicial, como contorneando el obstáculo. La figura muestra un ejemplo de difracción de ondas sobre la superficie de un líquido.

## Acústica

Una **onda sonora** es una **onda mecánica**, que ocurre cuando la **perturbación es una diferencia de presión que se transmite a través del medio**. Se considera que la frecuencia audible está entre los 20 y 20000Hz, lo cual define los rangos del **infrasonido** y el **ultrasonido**.

Velocidad del sonido (m/s)	
aire(293)	343
agua(293)	1482
aluminio(273)	6420
acero(273)	5941

La velocidad del sonido depende de la compresibilidad del medio y la temperatura. En la tabla se muestran valores para distintas sustancias. En un gas es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura.

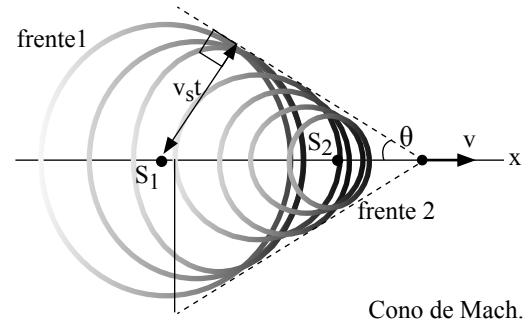


Difracción por una ranura en ondas sobre la superficie de un líquido.

El eco no es más que la reflexión del sonido en una superficie y que llega a nuestros oídos en un tiempo suficientemente separado del sonido original para poder diferenciarlo. Para un oído medio, ese tiempo es de 0,1s aproximadamente.

Si la velocidad del emisor de sonido es superior a la velocidad del sonido en el medio, (como ocurre en un barco, que crea la perturbación de la superficie del agua, y se mueve más rápido que las ondas que se producen) aparecen las llamadas ondas de choque.

El frente de onda tiene ahora forma de cono, llamado **cono de Mach**, y está conformado por la recta envolvente de los frentes correspondientes a las ondas generadas en cada punto de la trayectoria del emisor.



Cono de Mach.

Un fenómeno de gran importancia es el **efecto Doppler**. Este efecto se refiere a la **diferencia del valor de la frecuencia que recibe un receptor respecto a la frecuencia del sonido emitido por el emisor**. Esta variación de frecuencia depende de si el receptor está estático y el emisor se mueve; o si el emisor está estático y el receptor se mueve; o si ambos se mueven.

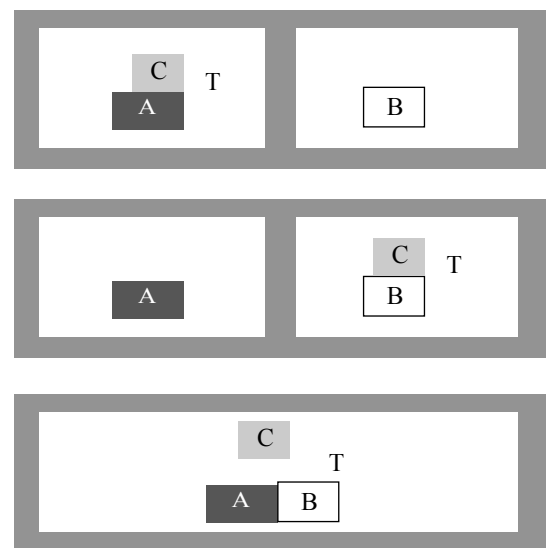
En general, de forma cualitativa, se observa que la frecuencia percibida disminuye cuando hay un alejamiento relativo, y que aumenta cuando hay un acercamiento relativo (ya sea porque se mueve uno u otro o ambos) La diferencia en frecuencia depende de la velocidad del sonido y de la velocidad del emisor o del receptor, según el caso.

## Propiedades térmicas

La Termodinámica estudia los sistemas de muchas partículas con un enfoque macroscópico, sin profundizar en la posible estructura de la sustancia, lo cual le da un alto grado de generalidad. Se interesa por los problemas relacionados con la propagación del calor, las transformaciones de fase, las máquinas térmicas y otros temas afines.

Un **sistema termodinámico** es una porción delimitada de materia con las características ya mencionadas, de estar compuesta por muchas partículas y sobre el cual se definen los **parámetros termodinámicos**. Estos parámetros caracterizan al sistema en conjunto y en última instancia son un promedio de lo que microscópicamente ocurre. Tal es el caso de la **temperatura T**, el **volumen V**, la **presión P** y la **energía interna U**.

Un caso importante es el de **equilibrio termodinámico**, en el que los parámetros termodinámicos permanecen constantes en el tiempo. Relacionado con el equilibrio termodinámico se tiene la llamada **Ley cero o Principio cero de la Termodinámica** el cual permite definir el concepto de temperatura: **si los sistemas A y B están en contacto y en equilibrio, esto implica que tienen igual temperatura**.



Ley Cero de la Termodinámica.

Así, la temperatura es un parámetro que caracteriza el estado de equilibrio entre dos sistemas. Otra forma de enunciar este principio es: **si los sistemas A y B están en equilibrio con un tercer sistema C, entonces A y B están en equilibrio entre sí.** La figura ilustra esta situación.

Para medir la temperatura se utiliza **el termómetro**. El termómetro es un sensor, y como todo sensor, requiere de una sustancia que sea sensible a la magnitud que se requiere sensor, en este caso, la temperatura. Hay distintas clases de termómetros, que no trataremos aquí.

Existen varias escalas de temperaturas, pero las más utilizadas son la Kelvin (K) o escala absoluta, que es la que se usa con fines científicos; y la escala Celsius (°C) que tiene un uso más cotidiano. Ambas toman como puntos notables los puntos de fusión y ebullición del agua a presión atmosférica (0°C y 100°C; 273,15K y 375,15K) De manera que el 0K sería una temperatura de -273, 15°C.

Un ejemplo de propiedad que suele utilizarse en los termómetros y que tiene gran importancia práctica además, es la dilatación térmica. En general los cuerpos se dilatan al calentarse (un caso excepcional es el del agua que se contrae entre 4°C y 0°C) Si  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura a la que se somete el cuerpo y  $\Delta l$  es la variación de su longitud, de modo que  $\Delta l = l - l_0$  siendo  $l_0$  es la longitud inicial, entonces puede establecerse la siguiente relación:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$$

Siendo  $\alpha$  el **coeficiente de dilatación lineal** característico de la sustancia. Por ejemplo:

Sustancia	$\alpha$ (en $10^{-6}/^{\circ}\text{c}$ )
aluminio	23
cobre	17
acero	11
vidrio	9

Hemos analizado el caso de la dilatación en una dimensión, lo cual puede extenderse al plano o al volumen.

La energía interna del sistema se define como la energía debida al movimiento de sus moléculas. La energía interna depende de la temperatura. La experiencia muestra que hay dos métodos de variar la energía interna de un sistema:

Con variación del volumen. Esta forma es lo que se conoce como **trabajo W**.

Sin variación del volumen. Es lo que se conoce como **calor Q**.

De manera que tanto el trabajo como el calor son procesos que traen como resultado el cambio de energía interna del sistema. Por tal razón, carece de sentido hablar de que un sistema posee tal calor, o tal trabajo. Lo que tiene sentido es hablar de la energía interna del sistema.

El esquema muestra como ocurre el flujo de calor entre el sistema y el entorno; y como depende de las temperaturas respectivas. El convenio de signos respecto que se asume es el siguiente:

- Si  $Q > 0$  el calor se trasmite al sistema
- Si  $Q < 0$  el calor es cedido por el sistema
- Si  $W > 0$  el trabajo es realizado por el sistema
- Si  $W < 0$  el trabajo se realiza sobre el sistema

En cuanto al concepto de trabajo, formalmente se define a través de la expresión  $W = \int P dV$

El caso más sencillo de solución de la integral es cuando la presión  $P$  es constante, entonces queda:

$$W = P\Delta V$$

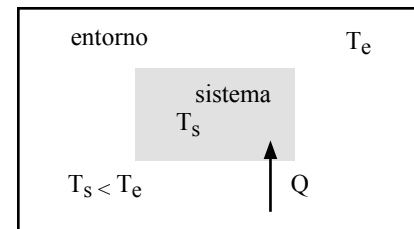
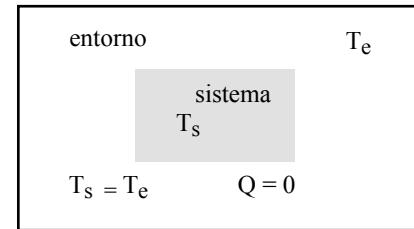
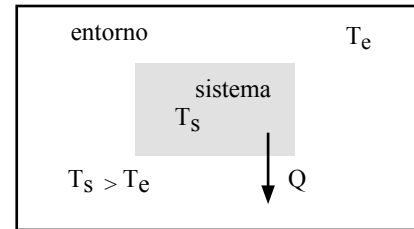
Con estos conceptos se establece, como generalización de la experiencia, **el Primer Principio de la Termodinámica:**

$$\Delta U = Q - W$$

Este principio de la Termodinámica encierra una de las leyes más importantes y generales de la naturaleza: la Ley de conservación y transformación de la energía. Esta ley proscribe la existencia de los llamados móviles perpetuos, toda vez que siempre existen pérdidas por fricción, que se disipan en forma de calor y hacen que la energía mecánica inicial de un sistema vaya disminuyendo. Obsérvese que en esos casos no se conserva la energía mecánica pero sí la energía total, pues aparece en otra forma no mecánica (calor)

Profundizando en lo referente al calor, un concepto asociado es el de **capacidad calorífica** que se define como  $C = Q/\Delta T$  De manera que la capacidad calorífica caracteriza a la cantidad de calor  $Q$  necesaria para variar la temperatura de un cuerpo en  $\Delta T$ . Dado un cuerpo que posee una gran capacidad calorífica, esto significa que es necesario una gran cantidad de calor para producir en él una variación apreciable de temperatura. Esos cuerpos son llamados en ocasiones termostatos, de modo que un cuerpo cualquiera en contacto con un termostato mantendrá su temperatura, toda vez que ésta es muy difícil de cambiar en el termostato debido a su alta capacidad calorífica.

Como se aprecia, el concepto de capacidad calorífica está asociado a un cuerpo. Para caracterizar el comportamiento de una sustancia se introduce el **calor específico** como:



Intercambio de calor entre el sistema y el entorno.

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

Donde m es la masa de la sustancia.

Esta magnitud permite precisar cuanto calor hay que ceder (o dar) a una sustancia por unidad de masa para variar su temperatura en una unidad. Por ejemplo:

Sustancia	c (en $10^{-2}$ J/kg K)
aluminio	8,8
agua	42
mercurio	1,3
vidrio	6,3

Todo lo anterior permite describir el Primer Principio así:

$$\Delta U = C\Delta T - P\Delta V$$

Veamos cómo se propaga el calor. Hay tres formas:

- Conducción
- Convección
- Radiación

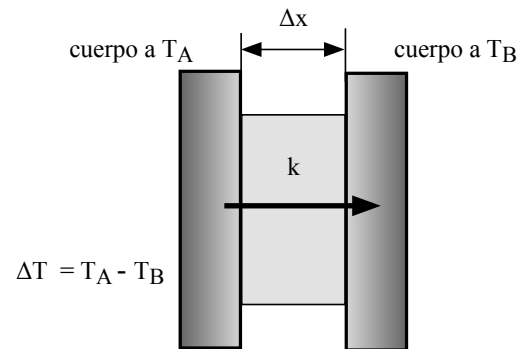
**La conducción** se refiere a cuando la transmisión ocurre a lo largo de la sustancia, de modo que internamente una parte va transmitiendo el calor a la otra y éste se propaga a través de las distintas zonas del cuerpo. Este proceso se caracteriza con el **coeficiente de conductividad térmica**. Si se tiene una sección del cuerpo de área A y ancho  $\Delta x$ , de modo que entre sus caras hay una diferencia de temperatura de  $\Delta T$ , entonces el calor por unidad de tiempo que atraviesa esa sección es:

$$Q/t = -kA\Delta T/\Delta x$$

**k** es el coeficiente de conductividad térmica, que tiene un valor elevado en los metales, ya que como es sabido, son buenos conductores. Por ejemplo, para el cobre se tiene que  $k = 220$  W/mK (Watt/metros-Kelvin) mientras que para la madera es 0,21 W/mK.

**La convección** de calor implica el movimiento de masa de una sustancia entre puntos a distintas temperaturas, que de esa forma transportan el calor de una zona del espacio a otra.

**La radiación** se refiere a la propagación de ondas electromagnéticas en el espectro del infrarrojo, de un punto a otro del espacio. A diferencia de las anteriores, esta forma no requiere de un medio para que ocurra.



Conducción del calor a través de un medio con coeficiente de conductividad térmica k.

## Procesos termodinámicos

Un **proceso termodinámico** es el paso del sistema por distintos estados termodinámicos, o sea, por distintos valores de los **parámetros termodinámicos**. Es posible establecer procesos termodinámicos notables:

**Adiabático:** El sistema no intercambia calor con el medio (un proceso suficientemente rápido puede cumplir esta condición) de modo que  $Q = 0$ . Del Primer Principio se tiene que  $\Delta U = -W$ . Como quiera que el trabajo requiere de variación de volumen, concluimos que una compresión o expansión, implica una variación de la energía interna.

**Isobárico:** Este proceso se caracteriza por ocurre a presión constante.

**Isocórico:** Este proceso es a volumen constante, por lo que el trabajo es nulo.

**Isotérmico:** Ocurre a igual temperatura.

Pasemos a estudiar las **transformaciones de fase, o sea, los cambios que ocurren de una fase a otra, en particular entre los estados líquido y gaseoso**.

Comenzaremos definiendo qué se entiende por **gas ideal**. El gas ideal es un modelo de gas, muy sencillo, pero que ayuda a resolver muchos problemas. **Este modelo considera que las moléculas que componen al gas son esferas duras, sin dimensiones y que sólo interaccionan en el momento de los choques**. Hay modelos más complicados que contemplan las dimensiones moleculares y las interacciones entre las moléculas aún a cierta distancia, pero aquí no los trataremos.

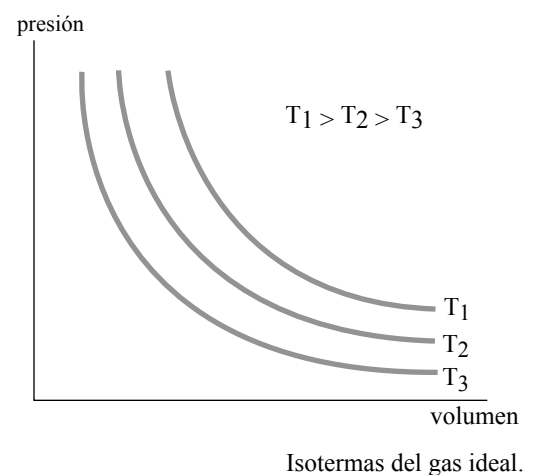
Para un gas que satisfaga tal modelo, existe una ecuación de estado, que vincula los parámetros termodinámicos, dada por:

$$PV = nRT$$

Donde **n** es el **número de moles del gas**. Recordemos que un mol es la cantidad de sustancia contenida en un valor de masa equivalente al peso molecular expresado en gramos. **R** es la llamada **constante universal de los gases** igual a  $8,3 \text{ J/mol K}$ .

De acuerdo a esta ecuación, en un plano  $P$  Vs  $V$  podemos graficar las curvas de igual temperaturas, es decir las isotermas, tal y como se muestra en la figura. De manera que a medida que la temperatura aumenta, la isoterma se aleja de los ejes.

Sin embargo, para un gas real la situación es diferente, ya que puede ocurrir que a determinadas temperaturas pueda pasarse por compresión de un estado gaseoso al estado líquido.





A temperaturas bajas, si se disminuye el volumen (compresión) del gas (que, como veremos más adelante, se llama vapor) la presión aumenta de forma continua hasta un valor.

A partir de ahí, ocurre una compresión isobárica, representada por una línea recta, en la que la presión permanece constante.

El vapor comienza a licuar, y la presión no va aumentar hasta que todo el vapor haya licuado, coexistiendo ambos estados. La presión así definida es la presión de vapor para esa temperatura. Si continúa la compresión, culmina la licuación, y la presión crece bruscamente, dado lo poco compresibles que son los líquidos.

Se observa, además, que hay una temperatura a partir de la cual no aparecen tramos rectos y se parecen a las isothermas del gas ideal. Esa temperatura es la llamada temperatura crítica, que marca la temperatura a partir de la cual no se puede licuar la fase gaseosa por compresión, y la isoterma correspondiente es la isoterma crítica.

Esta fase gaseosa es la que propiamente se llama gas, quedando claro el porqué de la denominación de vapor, pues el gas no puede licuarse por compresión, mientras que el vapor sí. De esta manera, se tienen las distintas fases en las isothermas: vapor, líquido-vapor y líquido.

Si ploteamos los distintos valores de presión de vapor contra temperatura, obtenemos una curva que representa los distintos valores de temperaturas de ebullición para distintas presiones.

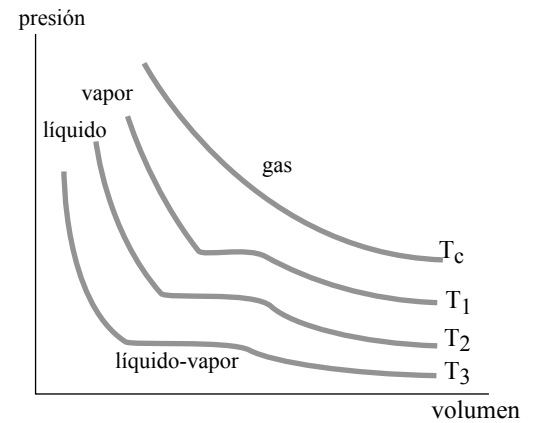
En efecto, un par de valores presión – temperatura indica la temperatura de ebullición para tal presión. Esta dependencia tiene gran aplicación práctica. La curva termina en el llamado punto crítico, a partir del cual ya no hay transiciones de vapor a líquido.

En realidad, esta curva es parte de otro gráfico más general que muestra las distintas transformaciones de fase líquido-sólido y sólido-vapor. Al punto donde coexisten las tres fases se conoce como punto triple.

Durante una transformación de fase ocurre intercambio de calor entre el sistema y el medio. Si se trata de una evaporación, el sistema toma calor del medio. Ese calor se emplea en cambiar la fase, en pasar de líquido a vapor y provoca una disminución de la temperatura en el entorno. Si es una condensación, el sistema cede calor al pasar de vapor a líquido y aumenta la temperatura del medio. Pero siempre *la temperatura del sistema permanece constante durante un proceso de transformación de fase*.

Al estudiar los procesos termodinámicos se introducen dos tipos fundamentales:

**Procesos reversibles:** Constituyen una sucesión de estados en equilibrio. Un proceso reversible que ocurre entre un estado caracterizado por determinados parámetros, permite que se pueda regresar por los mismos estados intermedios al estado inicial.



Isothermas del gas real.

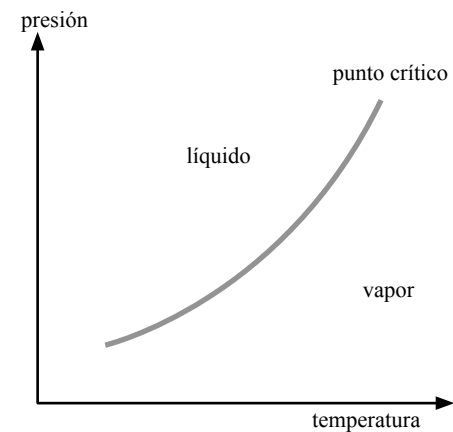


Diagrama de fases presión-temperatura.

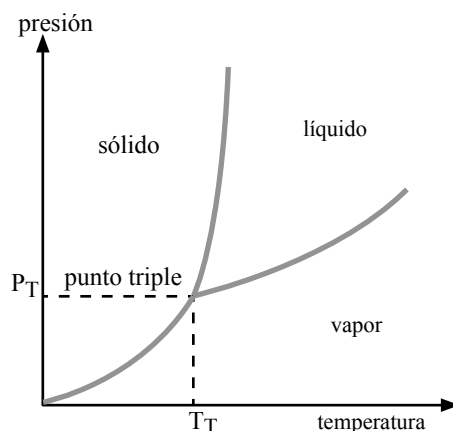


Diagrama de fases presión-temperatura. Obsérvese el punto triple.

**Procesos irreversibles:** Son procesos que ocurren en una sola dirección; tal es el caso de los procesos espontáneos naturales. Por ejemplo, el calor siempre fluye del cuerpo más caliente al más frío. Sin embargo de acuerdo a los principios de la Termodinámica (Ley Cero, alcanzar el equilibrio y Primer Principio, que la variación de energía interna sea igual al calor intercambiado) podría ser al revés, es decir, pasar del cuerpo más frío al más caliente. Esta prohibición nos hace pensar en la existencia de otra ley o principio que regula estos tipos de procesos.

Para llegar a tal ley utilizaremos los conceptos de máquina térmica y frigorífica. Estas máquinas trabajan con procesos cíclicos, o sea, un proceso en el que se parte de un estado y después de pasar por otros, se vuelve al estado inicial y así sucesivamente.

En principio una máquina térmica ideal podría ser aquella que es capaz de extraer calor  $Q$  de un cuerpo a temperatura  $T$  y convertirlo íntegramente en trabajo  $W$ , todo lo cual no viola el primer principio de la Termodinámica.

De igual forma, una máquina frigorífica ideal, podría ser aquella capaz de sacar calor  $Q$  de un cuerpo a temperatura  $T_1$  y llevarlo a otro cuerpo de temperatura mayor  $T_2$ .

En la figura se puede ver cómo serían esquemáticamente estas máquinas ideales.

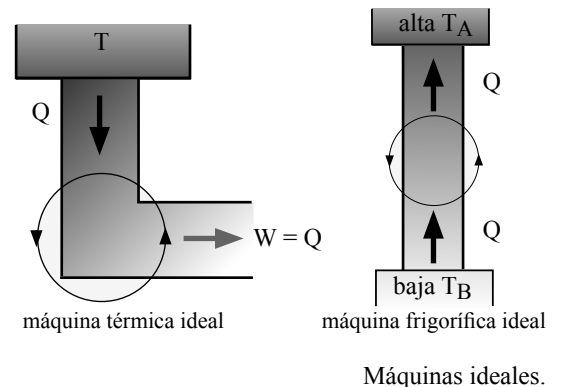
Sin embargo el Segundo Principio de la Termodinámica, prohíbe la existencia de tales máquinas. Existen dos formas de enunciar el principio, ambas equivalentes.

Es imposible efectuar una transformación cuyo único resultado sea transformar en trabajo el calor extraído de una fuente.

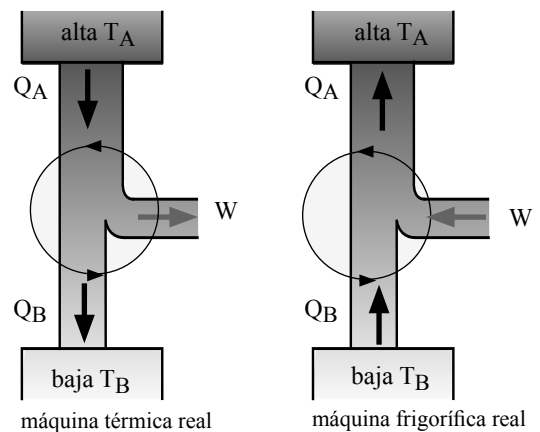
Es imposible transportar calor continuamente de un cuerpo a otro de mayor temperatura mediante una máquina que no reciba energía externa.

De manera que los esquemas de las máquinas térmicas y frigoríficas reales serían como se muestra en las figuras.

La Segunda Ley de la Termodinámica regula la dirección de los procesos. Al igual que en las leyes anteriores que establecen la existencia de ciertas magnitudes (la temperatura, en el caso de la Ley cero; la energía interna en el caso de la Primera Ley), la Segunda Ley establece la existencia de la entropía, magnitud que aumenta en los procesos irreversibles. Un análisis más detallado del concepto de entropía rebasa el alcance de nuestro curso.



Máquinas ideales.



Máquinas reales.

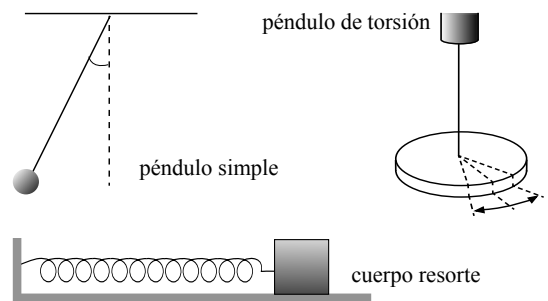
## TAREAS PROPUESTAS

### Oscilaciones

- 1) Los relojes de péndulo a pesar de su antigüedad continúan en uso. Describa su funcionamiento.



- 2) Investigue la dependencia de la frecuencia propia del péndulo simple, la balanza de torsión y el sistema cuerpo - resorte, en función de las características de cada uno de estos sistemas oscilantes.



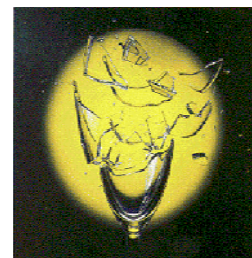
- 3) Se pulsa la sexta cuerda de una guitarra apretada en el quinto traste y se observa que la quinta cuerda vibra. Explique lo sucedido.



- 4) Investigue las condiciones bajo las que ocurrió el desplome del puente de Tacoma Narrows.



- 5) Cantantes famosos como Enrico Caruso y Ella Fitzgerald eran capaces de romper una copa con la voz. Explique cómo es posible.



## Ondas mecánicas

- 6) Sobre la superficie del agua se crean ondas que deben pasar por una compuerta de ancho  $D$  y se observa que al pasar, las ondas se desvían. Qué puede decir de la distancia entre crestas de las ondas
- 7) Un despertador en una campana de vacío deja de oírse pero se continúa viendo. Explique.



## Acústica

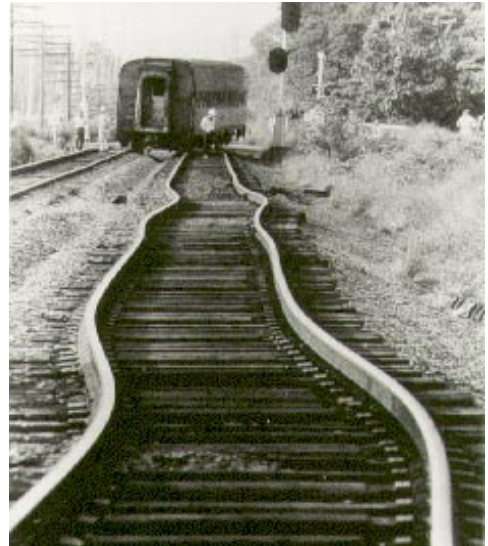
- 8) Para la localización de objetos en el mar (bancos de peces y el propio fondo marino) se utiliza el sonar. Explique su funcionamiento.
- 9) Compare una conversación Habana - Santiago a través de un hipotético tubo acústico, con una efectuada por teléfono.
- 10) ¿Cuál es la distancia mínima a una pared para apreciar el eco?
- 11) Hoy día el ultrasonido ha encontrado grandes aplicaciones. Mencione algunas de ellas relacionadas con la Medicina y la Industria.
- 12) Una característica a tener en cuenta en las condiciones acústicas de un local es la reverberación. ¿Cómo podría modificarse?
- 13) Explique por qué escuchamos el sonido de un avión de combate después de verlo pasar.
- 14) Investigue cómo los murciélagos son capaces orientarse en la oscuridad.



15) Hoy día en Medicina se utiliza el medidor de flujo Doppler para estudiar las características de la circulación sanguínea de los pacientes. Explique su funcionamiento

## Propiedades térmicas

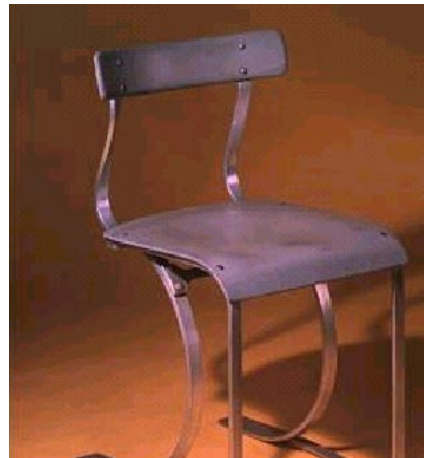
16) Proponga una posible causa de la situación que se observa en la foto.



17) ¿Cómo funciona el termostato a partir de una lámina bimetálica?

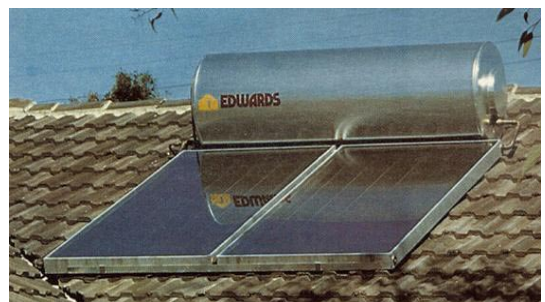
18) Al colocar sobre una fuente de calor un vaso de papel lleno de agua, esta ebulle y el papel no se quema. Explique.

19) Explique por qué en el diseño de un mueble es necesario considerar la conductividad térmica del material.



20) Un recipiente de vidrio será sometido a cambios bruscos de temperatura. ¿que será más conveniente, que sus paredes sean gruesas o finas?

21) Como parte de la política ambientalista que llevan a cabo los gobiernos se ha extendido el uso de los colectores solares. Explique su funcionamiento.



## Procesos termodinámicos

22) En las montañas se dificulta cocer los alimentos, por ejemplo, salcochar un huevo. Proponga una explicación al problema.



23) Explique cómo funciona el refrigerador basado en un compresor.



24) Explique cómo se logra disminuir el rozamiento en el patinaje sobre hielo.



25) La olla de presión es un artículo de uso doméstico que permite ahorrar tiempo y combustible en el proceso de cocción de los alimentos. Fundamente su funcionamiento.



## Tema II

# ELECTROMAGNETISMO

### Electrostática

Una propiedad de la sustancia es la carga eléctrica. La experiencia demuestra que hay dos tipos de carga, que convencionalmente han sido llamadas positiva y negativa. Al frotar una varilla de vidrio con seda, tanto el vidrio como la seda se electrizan. Se asume que la carga del vidrio es positiva y la de la seda, negativa. Es posible observar una cierta atracción entre ambos cuerpos.

Por otra parte, si se acercan dos varillas de vidrio previamente cargadas se aprecia repulsión entre ellas. Así se establece la ley cualitativa de las cargas: **cargas de signo contrario se atraen y de igual signo se repelen**. Cuantitativamente esto viene dado por la **Ley de Coulomb**:

$$F_{12} = kq_1q_2/r_{12}^2$$

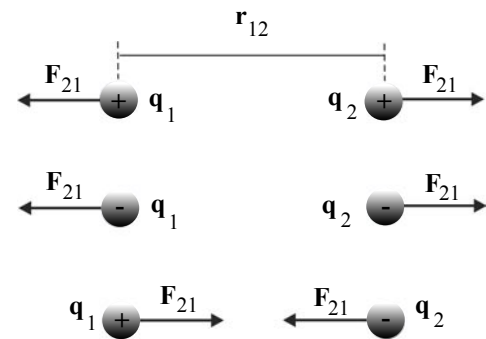
Donde  $F_{12}$  es la fuerza que la carga  $q_1$  ejerce sobre  $q_2$ , consideradas concentradas en un punto (cargas puntuales), y separadas a la distancia  $r_{12}$ .  $k$  es una constante de proporcionalidad, que en la mayoría de los casos se da como  $k = 1/2\pi\epsilon_0$  donde  $\epsilon_0$  es otra constante conocida como permitividad del vacío. La unidad de carga es el Coulomb (C).

Nótese que si las cargas tienen signos contrarios la fuerza  $F_{12}$  tendrá signo negativo, lo cual se asume como fuerza de atracción. Además, la fuerza disminuye con el aumento de la distancia  $r_{12}$ , como era de esperar. Resulta evidente que  $F_{12}$  y  $F_{21}$  son iguales en magnitud, aunque siempre van a tener sentidos diferentes.

La carga eléctrica satisface además dos leyes importantes. En primer lugar, **la carga se conserva**, esto es, no existe proceso en la naturaleza en que el resultado sea la aparición o la destrucción de carga. Antes y después del proceso la carga sigue siendo la misma. En segundo término, **la carga está cuantificada** lo cual significa que existe un valor mínimo de carga tal que cualquier otra cantidad de carga es un número entero de veces ese valor. Ese valor corresponde a la carga del electrón  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}C$ .

Una primera división entre los materiales de acuerdo a su comportamiento eléctrico es la de **conductores y aislantes**. El **conductor se caracteriza por tener cargas libres**, que pueden moverse con relativa facilidad dentro del material; **el aislante**, por el contrario, **no posee cargas capaces de moverse libremente**.

Un concepto importante es el de **campo eléctrico**, dado como una **modificación del espacio que rodea una carga o distribución de cargas**. Para saber si en una zona existe un campo eléctrico se coloca una carga de magnitud conocida  $q$  (carga de prueba).



Cargas de igual signo se repelen y de signo contrario se atraen.

Sobre ella aparecerá una **fuerza eléctrica F** tal que:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

Donde **E** representa el **vector intensidad de campo eléctrico**. Nótese que los vectores **F** y **E** están en la misma dirección. Si *q* es positiva, tendrán igual sentido; contrario, si *q* es negativa.

Esta relación es análoga a la vista en Mecánica para el campo gravitatorio, donde la fuerza de gravedad es  $\mathbf{F}_g = m\mathbf{g}$ . Aquí la masa *m* representa la propiedad que hace que el cuerpo experimente la fuerza, al igual que en el caso eléctrico la carga: sin masa no hay fuerza de gravedad y sin carga no hay fuerza eléctrica. **g** representa la intensidad de campo gravitatorio en cada punto del espacio, al igual que **E** para el análogo eléctrico.

Así, la interacción entre dos cargas se entiende como una interacción carga-campo, y no una interacción directa entre las cargas.

Un concepto que ayuda a visualizar la acción del campo eléctrico es el de **línea de fuerza**, considerada como aquella línea en que **el campo eléctrico es tangente a ella en cada punto**. Las líneas se aprietan en las zonas más intensas del campo. Para una carga puntual, el campo tiene simetría radial. Sale de las cargas positivas y entra en las negativas.

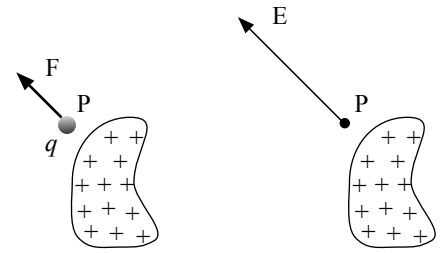
Un caso interesante es el de dos cargas de igual valor pero que tienen el mismo signo o signo contrario.

En el caso de un conductor (digamos, un metal) en un campo eléctrico externo, puede deducirse que en su interior el campo eléctrico **E** ha de ser cero. En caso contrario, existiría una fuerza sobre los portadores de carga, que libres de moverse, estarían en un movimiento perpetuo, lo cual es imposible. Asimismo, las líneas de fuerza deben ser perpendiculares a la superficie del cuerpo. De no ser así, existirían componentes tangenciales que permitirían el movimiento por la superficie de forma ilimitada, lo cual en la realidad no ocurre.

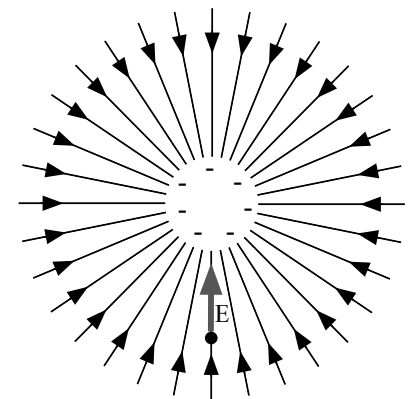
Otro concepto de gran utilidad es el de **dipolo eléctrico**, que consiste en **dos cargas de igual magnitud *q* y de signo opuesto, separadas una distancia *d***. Entonces se define el **momento de dipolo eléctrico *p*** como  $\mathbf{p} = q\mathbf{d}$  y es **un vector que va de la carga negativa a la positiva a lo largo de la distancia que los une**. Un dipolo eléctrico en un campo eléctrico externo **E** trata de orientarse a lo largo del campo, pues aparece un **momento de fuerza**:

$$\mathbf{M} = \mathbf{pE} \sin\theta$$

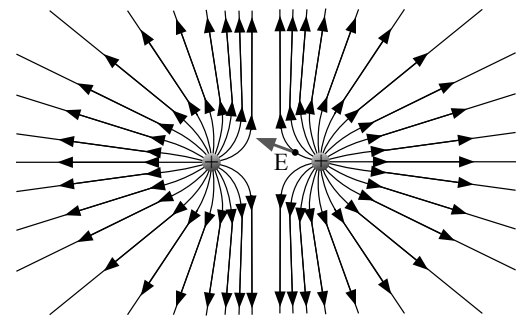
Siendo  $\theta$  el ángulo entre la dirección del campo y la orientación del dipolo. Existen materiales en los que sus moléculas presentan un momento de dipolo eléctrico, lo cual le permite lograr cierta **orientación en presencia de un campo eléctrico**, fenómeno que se conoce como **polarización eléctrica**. Un ejemplo de ello es la molécula de agua.



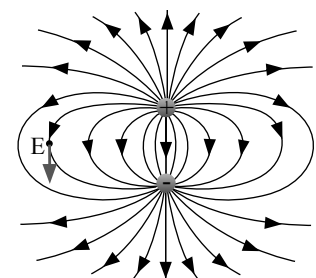
En un punto P cerca de un objeto cargado existe un campo eléctrico E. Al colocar en ese punto una carga puntual, ésta experimenta una fuerza F.



Líneas de fuerza de una carga negativa.



Líneas de fuerza de un sistema de dos cargas.



Líneas de fuerza de un dipolo eléctrico.



Sea  $W_{AB}$  el trabajo necesario para llevar la carga  $q$  desde el punto A hasta el B, bajo la acción del campo eléctrico  $E$  que pueda estar presente. Definiremos la diferencia de **potencial eléctrico como:**

$$V_B - V_A = W_{AB}/q$$

Sea un campo eléctrico, para simplificar, uniforme, y dos puntos situados a lo largo de la dirección del campo a una distancia  $d$ . En tal situación, sobre la carga actúa una fuerza eléctrica  $qE$ . Por tanto, para contrarrestarla hace falta una fuerza igual a ese valor y el trabajo  $W_{AB}$  sería  $Fd$ , por lo que  $W_{AB} = qEd$ . De esta forma,  $V_B - V_A = Ed$ .

Considerando que el trabajo  $W_{AB}$  está asociado a la variación de energía (al igual que se hizo en Mecánica) entonces la energía que la carga  $q$  adquiere (o pierde) al moverse de A hasta B en el campo  $E$  será  $q(V_B - V_A)$ . En la práctica, la diferencia de potencial se define simplemente como  $V$  (también se le dice voltaje) y se expresa en Volt (V). El campo eléctrico se orienta de la zona de mayor potencial a la de menor.

Se conoce como **superficie equipotencial** a aquella en la que la **diferencia de potencial entre sus puntos es nula, o sea, son puntos de igual potencial eléctrico**. El campo eléctrico es siempre perpendicular a una superficie equipotencial, ya que de lo contrario existirían componentes tangenciales, y por tanto, diferencia de potencial. En el caso de una carga puntual, las superficies equipotenciales son esferas concéntricas.

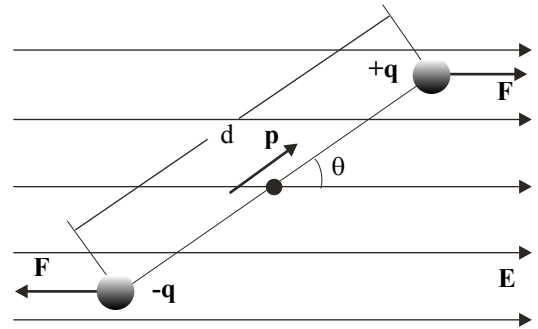
Un dispositivo importante para la Electrónica es el **capacitor** (también llamado **condensador**) Un capacitor puede considerarse como dos placas metálicas, separadas por cierta distancia y con la misma carga pero con signo opuesto. Se define la **capacidad eléctrica C como  $C = Q/V$** , siendo  $Q$  la carga de las placas y  $V$  la diferencia de potencial eléctrico entre ellas. La capacidad puede variarse intercalando un dieléctrico entre las placas, de modo que si  $C_0$  era la capacidad sin dieléctrico (al vacío), ahora sería  $C = \epsilon C_0$  donde  $\epsilon$  es la permitividad eléctrica del material, que es un índice de cuanto se polariza. Entre las placas paralelas de un capacitor se tiene un campo uniforme.

La utilidad del capacitor radica en que es un almacén de energía eléctrica. Si  $U_E$  es la **densidad de energía eléctrica** (energía por unidad de volumen) entre las placas del capacitor, entonces:

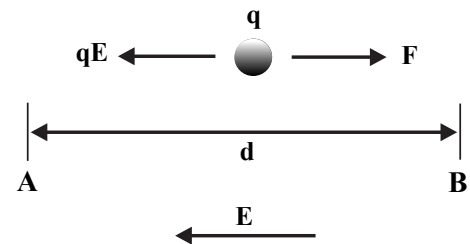
$$U_E = \frac{1}{2} CV^2$$

## Corriente eléctrica

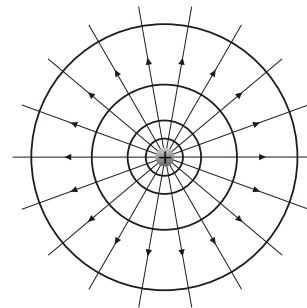
Entenderemos por **corriente eléctrica el flujo ordenado de portadores de carga de un punto a otro de un material conductor**. En el caso de los metales, los portadores son electrones. Básicamente hay dos tipos de corriente: **directa y alterna**.



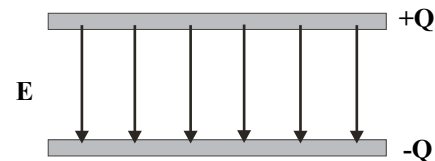
Dipolo electrico en un campo electrico uniforme.



Para mover la carga de A a B hay que realizar un trabajo  $W_{AB} = qEd$ .



Superficies equipotenciales de una carga positiva.



Campo eléctrico entre las placas de un capacitor.

La **corriente directa** es aquella en la que el flujo no varía de sentido a lo largo del tiempo. En la **corriente alterna**, por el contrario, hay un cambio periódico en el sentido del flujo.

Para describir cuantitativamente a la corriente eléctrica se introduce el concepto de intensidad de corriente  $I$ , como la cantidad de carga por unidad de tiempo, y su unidad es el Ampere (A). También se utiliza la densidad de corriente  $J$  como la carga que atraviesa la unidad de área por unidad de tiempo.

Muchos conductores, entre ellos los metales, satisfacen la Ley de Ohm:

$$V = RI$$

$V$  es la diferencia de potencial a la que está sometido el conductor,  $I$  la corriente que lo atraviesa y  $R$  la **resistencia eléctrica**, que indica el grado de **dificultad que se presenta al paso de la corriente**.

Para caracterizar este aspecto de un material en específico se usa el concepto de **resistividad**, que se simboliza por la letra griega  $\rho$ . Cada material posee un valor de  $\rho$ , que depende fuertemente de la temperatura. El inverso de  $\rho$  se conoce como **conductividad** ( $\sigma$ ), de modo que  $\sigma = 1/\rho$

Para un conductor filiforme, de longitud  $l$  y sección transversal  $S$ , la **Ley de Poulette** relaciona la resistividad con la resistencia, de acuerdo a:

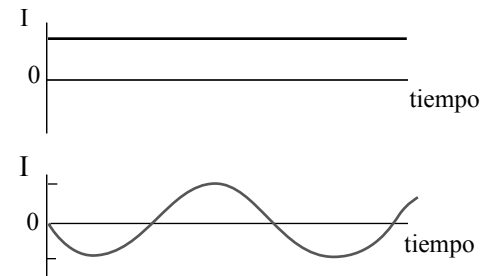
$$R = \rho l/S$$

La **potencia eléctrica** disipada (energía por unidad de tiempo) por un conductor a una diferencia de potencial  $V$  por el que circula una corriente  $I$  es:

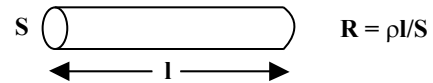
$$P = VI$$

Asumiendo que se disipa en calor, el calor disipado por unidad de tiempo es  $Q = RI^2$ , resultado de sustituir la ley de Ohm en la fórmula de la potencia y se conoce como **ley de Joule-Lenz**.

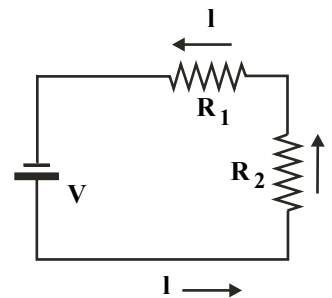
Se dice que se tiene un circuito eléctrico cuando es posible la circulación de corriente, pudiendo ser cerrado o abierto, de acuerdo a si el paso de corriente puede ocurrir de forma cíclica o no. Para mantener una diferencia de potencial constante en el tiempo existen las llamadas **fuentes de fuerza electromotriz**, como pueden ser las baterías o los generadores. Una **FEM (fuerza electromotriz) es una diferencia de potencial constante en un circuito**. Esto quiere decir que si en un circuito hay una fuente de FEM con una diferencia de potencial  $V$ , y además dos resistencias  $R_1$  y  $R_2$  colocadas en serie, la corriente que circula será la misma en ambas e igual a  $I = V/R$  donde  $R$  es la resistencia total, dada por la suma de  $R_1$  y  $R_2$ . En los extremos de cada resistencia, se tiene una diferencia de potencial  $V_1 = R_1 I$  y  $V_2 = R_2 I$ . Obsérvese que  $V_1$  depende del valor de  $R_2$  (a través del valor de la corriente); sin embargo  $V$  será siempre el mismo.



Gráficas de la corriente directa y la corriente alterna en función del tiempo.



Ley de Poulette para un conductor filiforme



Circuito eléctrico

## Campo magnético

En principio, el **campo magnético es una modificación del espacio alrededor de un imán**. Más adelante veremos que puede haber campo magnético no sólo debido a un imán. Para describir al campo magnético utilizaremos el **vector inducción magnética  $\mathbf{B}$** . Para visualizar gráficamente al campo magnético se introduce el concepto de **líneas de inducción**, muy similar al caso eléctrico, en el sentido que **el vector inducción magnética es tangente a cada punto de la línea de inducción**.

A diferencia de la electricidad, en el magnetismo no es posible encontrar polos aislados. En efecto, en un imán encontramos siempre dos polos, que por convención han sido denominados norte y sur. Los polos de distintas clase se atraen y de igual clase se repelen, similar a la ley cualitativa de las cargas eléctricas. Sin embargo, existen cargas eléctricas positivas y negativas aisladas. Por el contrario, no se ha encontrado en la naturaleza el monopolo magnético, esto es, un polo norte o sur aislados. Si se divide un imán, tendremos dos imanes, cada cual con sus polos.

Se ha acordado que las líneas de inducción vayan del polo norte al sur. En la figura se muestran las líneas de un imán. Se observa que el campo del imán es bastante inhomogéneo, lo cual le permite atraer o repeler materiales magnéticos, ya que las fuerzas de atracción o repulsión no están compensadas.

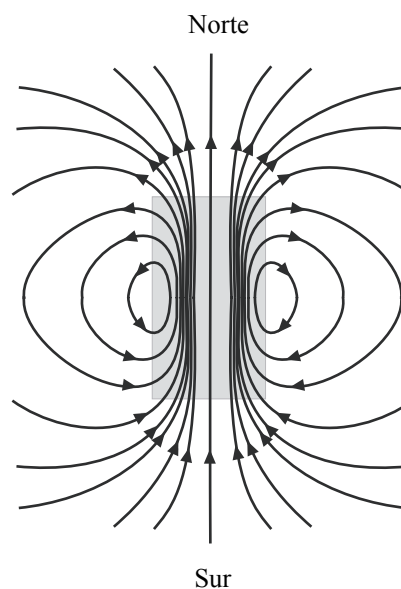
La presencia de un campo magnético en una región del espacio puede confirmarse utilizando, al igual que para el campo eléctrico, una carga de prueba. Sin embargo, ahora la carga ha de estar en movimiento. Si  $v$  es la velocidad y  $q$  su carga, el valor de la **fuerza magnética** aplicada sobre la carga vendrá dado por:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v}\mathbf{B}\sin\theta$$

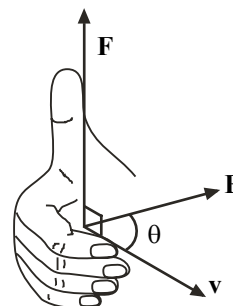
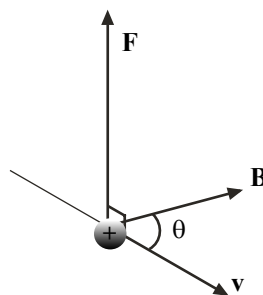
Donde  $\mathbf{B}$  es la inducción magnética y  $\theta$  el ángulo formado entre la dirección de movimiento de la carga y  $\mathbf{B}$ . Para conocer la dirección y sentido es necesario utilizar la llamada regla de la mano derecha. Para ello, con la mano derecha, los dedos se colocan en la dirección de la partícula cargada, y se envuelven hacia la dirección de  $\mathbf{B}$ . El dedo pulgar marca la dirección y sentido de la fuerza. Como puede observarse, la fuerza siempre es perpendicular al plano que forman  $v$  y  $\mathbf{B}$ . Si la carga es negativa, la fuerza se dirige en sentido contrario al visto anteriormente.

En el caso en que el ángulo entre  $v$  y  $\mathbf{B}$  sea  $90^\circ$ , el seno será 1. La partícula está sometida a una fuerza perpendicular a su velocidad, lo cual origina un movimiento circular, en el que la fuerza magnética juega el papel de fuerza centrípeta.

Se acostumbra simbolizar un campo entrando al plano del papel con una cruz; de salir, se simboliza con un punto.



Líneas de inducción de un imán.

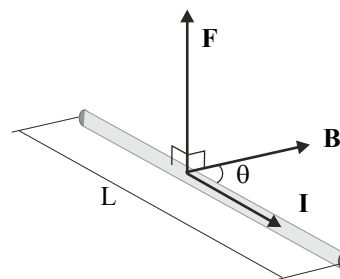


Fuerza sobre una carga que se mueve en presencia de un campo magnético.

Un alambre **conductor** por el que circula una corriente colocado en presencia de un campo magnético experimenta una fuerza:

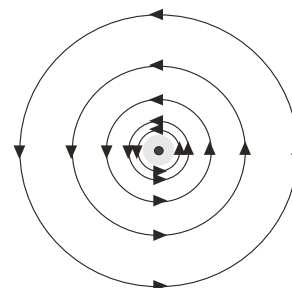
$$F = LIB \sin \theta$$

L es la longitud del conductor, I la intensidad de corriente y  $\theta$  el ángulo entre **B** y la dirección de I. Al igual que para la carga en movimiento, utilizamos la regla de la mano derecha para saber la dirección y sentido de F. Aquí I envuelve a **B** y el pulgar da el sentido de la Fuerza F.



Fuerza sobre un conductor con corriente.

En la figura se muestra el caso de un conductor de longitud L inmerso en una región donde hay un campo de inducción magnética B en el sentido que se indica. El sentido de la corriente hace que la fuerza sea hacia arriba.

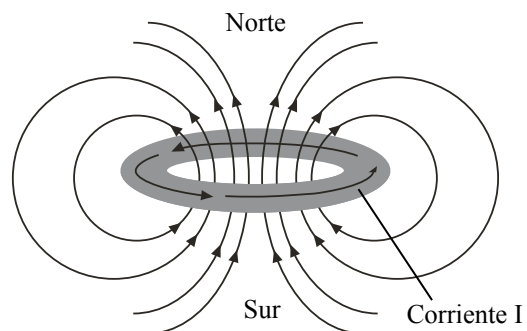


Líneas de inducción alrededor de un conductor por el que circula una corriente, en este caso, saliendo del plano del papel.

Si una carga q está situada en una región donde existe tanto campo eléctrico como magnético, entonces la fuerza resultante será la suma de la fuerza eléctrica y la magnética, relación que se conoce como **Fuerza de Lorentz**:

$$F_L = qE + qvB \sin \theta$$

Como ya mencionamos, no sólo los imanes son fuentes de campos magnéticos. Un alambre por el que circula una corriente de intensidad I posee a su alrededor un campo magnético tal que las líneas de inducción son círculos concéntricos, de modo que a medida que aumenta la distancia del alambre, **B** se hace menor. Además, **B** es proporcional al valor de la corriente I. El sentido de B se obtiene por una variante de la regla de la mano derecha: el dedo pulgar sigue la dirección de la corriente y los restantes dedos el sentido de **B**.

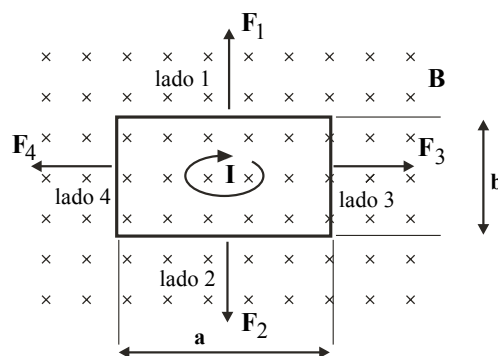


Líneas de inducción de una espira conductora con corriente

Para el caso de una espira cerrada con corriente, las líneas se comportan de manera semejante a un imán, con un polo norte y un sur.

Un efecto reforzado se logra con un solenoide o bobina, o sea, un conjunto de espiras donde resulta que el campo en el exterior es prácticamente nulo y homogéneo en su interior. Para intensificar los efectos magnéticos del solenoide se coloca en su interior un material **ferromagnético**. Estos materiales tienen la propiedad de que intensifican el campo magnético B.

Un imán se caracteriza por **momento de dipolo magnético**  $\mu$  o simplemente **momento magnético**. Es un vector que va del polo sur al polo norte. Para el caso de una espira con corriente se define el dipolo magnético como  $\mu = NIS$  donde N es el número de vueltas de la espira, I la intensidad de corriente y S el área de la espira. Si con los dedos de la mano derecha se envuelve la espira siguiendo la dirección de la corriente, el pulgar señala el sentido del momento de dipolo  $\mu$ . En presencia de un campo magnético, la espira (o el imán) sufre un momento de fuerza  $M = \mu B \sin \theta$  siendo  $\theta$  el ángulo entre B y la orientación del dipolo magnético. Por tal razón, un dipolo tiende a orientarse a lo largo del campo magnético.



Fuerzas sobre una espira rectangular con corriente en presencia de un campo magnético.

En las figuras se observan las fuerzas que actúan sobre cada lado de una espira rectangular colocada en un campo B. Se puede apreciar la tendencia a alinearse según el campo magnético, debido al efecto del par de fuerzas.

### Inducción eletromagnética

Sea una región del espacio donde existe un campo magnético de inducción B. Si delimitamos un área A que lo corta perpendicular, entonces se define el **flujo magnético** como  $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$  (si A no es perpendicular a B, en la fórmula se sustituye por la proyección de A sobre el plano perpendicular a B)

La experiencia demuestra que si se acerca un imán a una espira, en ella aparece una corriente inducida *sólo cuando hay movimiento*. Además, si se coloca un imán fijo frente a una espira y esta se deforma, digamos, estrechándola, aparece una corriente inducida en la espira, *sólo mientras dura la deformación*.

Nótese que en ambos casos ha ocurrido variación de flujo magnético, ya sea por la variación del campo B que atraviesa el área de la espira, o por variación del área de la misma. La variación de flujo trae consigo la aparición de corriente inducida.

De modo que la **ley de inducción de Faraday** dice que **la fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual a la variación del flujo magnético en el tiempo** (rapidez) Esta ley se completa con la **ley o regla de Lenz: la corriente inducida aparece en un sentido tal que se opone a la causa que la produce**. Llamando  $\varepsilon$  a la FEM inducida, queda:

$$\varepsilon = - \Delta\Phi_B / \Delta t$$

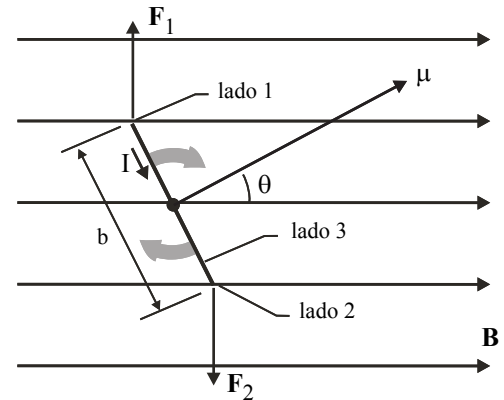
La corriente inducida sólo aparece cuando el circuito es cerrado, si está abierto aparece una diferencia de potencial entre sus extremos.

En el caso de un alambre de longitud L que se desplaza con velocidad v en presencia de un campo magnético se demuestra que en sus extremos aparece una diferencia de potencial igual a  $LvB\sin\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que forma la velocidad con B. Este fenómeno se conoce como FEM en movimiento. La regla de la mano derecha permite conocer el sentido de la FEM que tiende a producir una corriente en esa dirección (v envuelve a B y el pulgar señala hacia el potencial positivo)

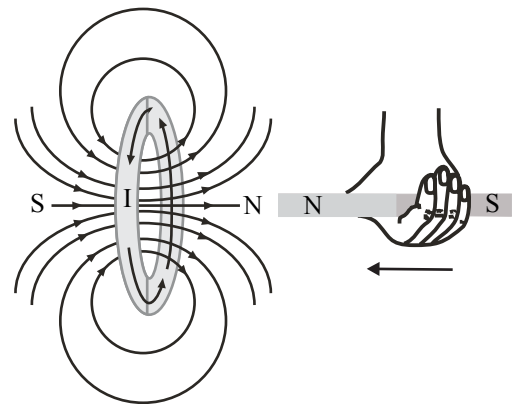
Para una bobina de N espiras se tiene que:

$$\varepsilon = - N\Delta\Phi_B / \Delta t$$

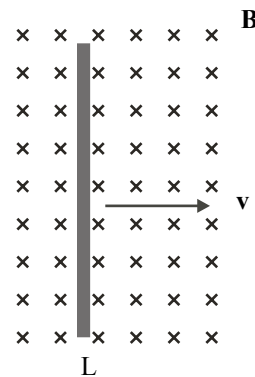
La **inductancia L** se define como  $L = N\Phi_B / I$ . Al igual que la capacidad de un capacitor depende de la geometría (distancia entre placas, área de las placas), la inductancia L depende del número de vueltas de la bobina y es una característica de la misma.



La espira de la figura anterior vista de lado. Las fuerzas F3 y F4 se compensan. Las fuerzas F1 y F2 conforman un par de fuerzas que tiende a rotar la espira con un momento  $\mathbf{M} = \mu\mathbf{B}\sin\theta$



Al mover el imán hacia la espira, en ésta se induce una corriente. El sentido de la corriente inducida es tal que el campo magnético que produce se opone a la variación del flujo



FEM en movimiento.

Asimismo, una bobina puede ser un almacén de energía magnética. Sea  $U_B$  la **densidad de energía magnética** (energía por unidad de volumen) encerrada en la bobina. Entonces:

$$U_B = \frac{1}{2} L I^2$$

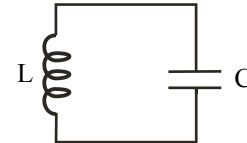
## Ondas electromagnéticas

Las **oscilaciones electromagnéticas** se refieren a variaciones en el tiempo de magnitudes asociadas con el electromagnetismo. Un ejemplo es el circuito oscilante compuesto por un capacitor y una bobina. Si asumimos que no hay pérdidas en los conductores (al igual que despreciamos la fricción en un péndulo que oscila) si al inicio el capacitor está cargado, con el tiempo este se descargará y la carga irá de una placa a otra, oscilando. En analogía con el péndulo, en que la energía potencial gravitatoria se transforma en cinética, aquí la energía eléctrica almacenada en el capacitor se transforma en magnética en la bobina, y luego ocurre el proceso inverso.

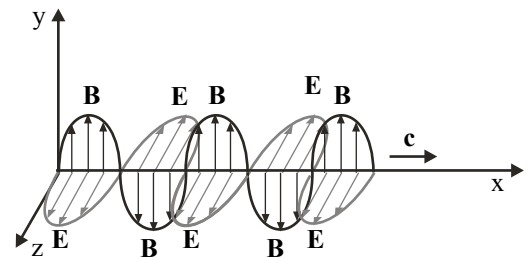
Con un oscilador se pueden generar ondas electromagnéticas. Una **onda electromagnética** no es más que la variación u oscilación de campos eléctricos y magnéticos en el espacio. A diferencia de las ondas mecánicas, no necesita de un medio, por lo que puede propagarse en el vacío con la velocidad  $c$  (300 000 Km/s) Los vectores campo eléctrico e inducción magnética oscilan perpendiculares entre sí.

La onda electromagnética se caracteriza por su longitud de onda y su frecuencia relacionadas por  $c = \lambda f$  Esto define el **espectro electromagnético**, de manera que de acuerdo a la longitud de onda (o la frecuencia) las ondas son conocidas por características muy particulares. Así, si descendemos en la escala de longitud de onda, tenemos las ondas de radio (metros), microondas (cm), **infrarrojo** (micras), visible (décimas de micras), **ultravioleta**, rayos x (nanómetros) y finalmente los rayos gamma. Lo esencial es comprender que todas son ondas electromagnéticas, pero de distinta longitud de onda.

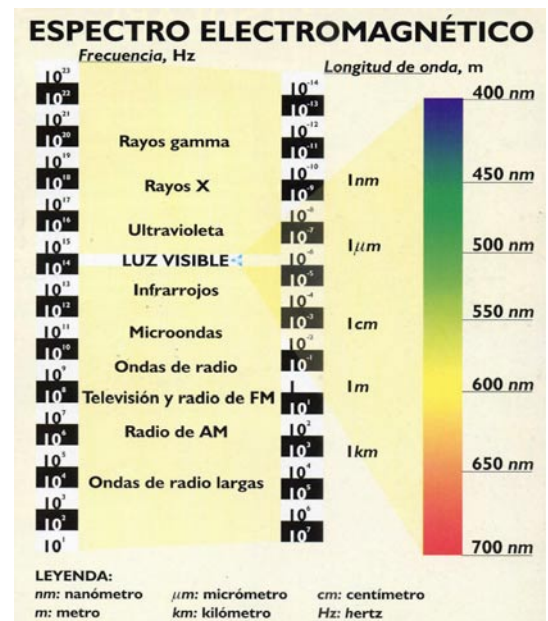
Sea una fuente de ondas electromagnéticas y un detector. Si no se mueven entre sí, el detector recibirá la señal con la misma frecuencia que la que emite la fuente. Si se acercan, el detector recibe una señal con una frecuencia superior a la que emite la fuente. Si se alejan, el detector recibe una señal con una frecuencia menor que la que emite la fuente. Esto se conoce como **efecto Doppler**, ya estudiado para el caso de las ondas sonoras. Aquí lo que importa es el movimiento relativo fuente detector, o sea, si se acercan o se alejan, sin importar si uno está estático o los dos se mueven. Según sea la velocidad relativa entre emisor y receptor, así será la diferencia entre las frecuencias emitida y recibida.



Circuito LC.



Esquema de una onda electromagnética.



Espectro electromagnético.

## TAREAS PROPUESTAS

### Electrostática

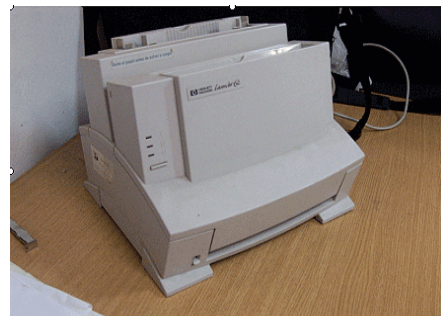
1) Uno de los sistemas de reproducción más utilizado es la fotocopiadora. Explique su funcionamiento.



2) Como parte de las acciones para conservar el medio ambiente se utilizan en las industrias el llamado precipitador electrostático o limpiador electrostático de polvo. Investigue su funcionamiento.



3) En la industria del automóvil se utiliza un sistema de pintura conocido como electroplating. Justifique físicamente.



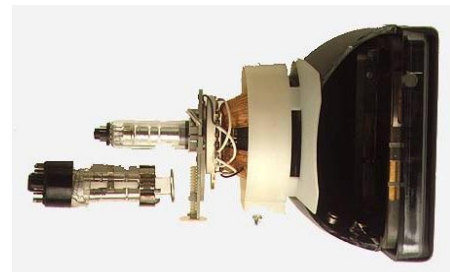
4) La impresora láser es un periférico de gran utilidad. Explique las bases de su funcionamiento.

5) Los radios y grabadoras de los automóviles se encuentran siempre en carcasas metálicas, pudiendo ser, por ejemplo, plásticas. Proponga una explicación a la conveniencia de que sean de metal.

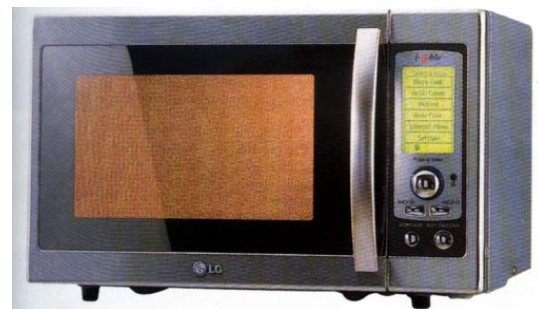


6) El capacitor es un dispositivo básico de la electrónica moderna, cuya misión es el almacenamiento de energía eléctrica. Investigue su papel en productos como: flash de cámara fotográfica, desfibrilador, encendedor de lámpara fluorescente y teclado de computadora.

7) El tubo de rayos catódicos es un dispositivo de amplia utilización (TV, displays, etc.) Proponga una explicación a su funcionamiento.



8) Un equipo electrodoméstico que permite reducir el tiempo de cocción de los alimentos es el horno de microondas. Explique las bases físicas de su funcionamiento.



9) Explique cuál es el funcionamiento de la impresora de chorro de tinta.





## Corriente eléctrica

- 10) La utilización de la energía calorífica debido al paso de la corriente por un conductor se aprovecha en varios productos. Mencione algunos y explique su funcionamiento.



- 11) El comprobador de pilas resulta muy útil. Proponga una explicación de funcionamiento.

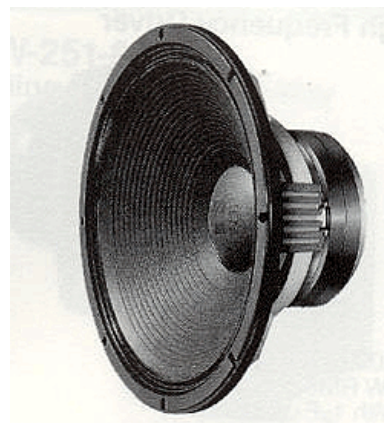


- 12) En los laboratorios y la industria es común medir la temperatura utilizando un termopar. Investigue su funcionamiento.

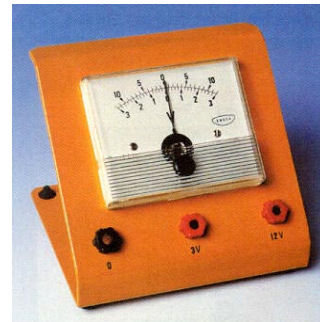


## Campo magnético

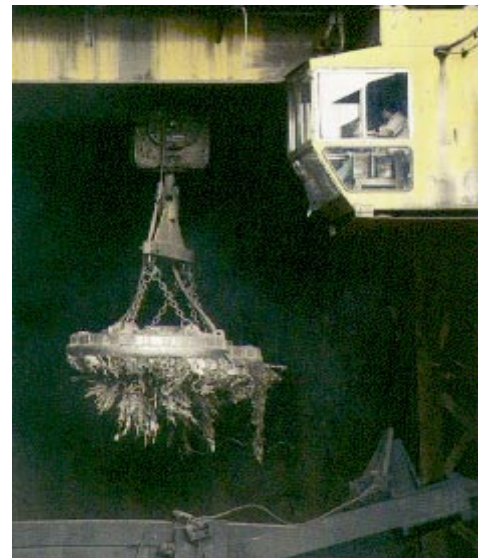
- 13) El altavoz es un dispositivo presente en la vida diaria. ¿Cómo funciona?



14) El galvanómetro es un instrumento de medición muy utilizado en los laboratorios de Física. Explique su funcionamiento.



15) Todavía hoy se utiliza el timbre eléctrico. ¿Cómo funciona?



16) Para obtener campos magnéticos se utilizan los electroimanes. Investigue su aplicación en: interruptores automáticos (relés), sistema de imágenes RMN, izaje de chatarra, tren de levitación magnética (maglev).

## Inducción electromagnética

17) En muchos equipos electrodomésticos se utilizan transformadores para aumentar o reducir el voltaje. Explique su funcionamiento. Explique por qué el núcleo se conforma en forma de láminas.



18) Existen distintos tipos de micrófonos uno de ellos es el llamado micrófono dinámico. Explique su funcionamiento.



19) La guitarra eléctrica permite amplificar el sonido de la cuerda sin caja de resonancia. Fundamente sobre la base de la inducción electromagnética.



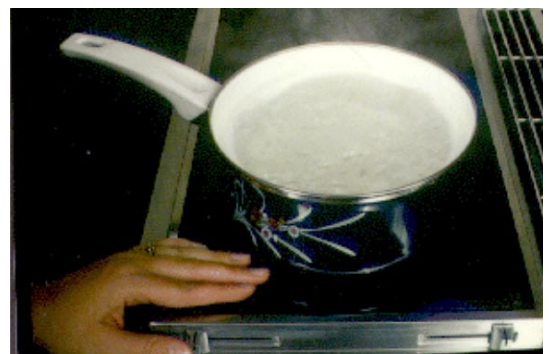
20) El *hookmeter* permite medir el valor de la intensidad de la corriente que circula por un conductor sin conexión directa. Explique su basamento físico y su funcionamiento.



21) Un equipo de amplio uso es el detector de metales, ya sea para encontrar desechos metálicos en la arena de las playas o en los aeropuertos. Explique cómo funciona.



22) Existe en el mercado un tipo de cocina que al contacto de la mano no produce calor, sin embargo un recipiente metálico se calienta. Proponga una explicación a su funcionamiento.



## Ondas electromagnéticas

23) Para medir la velocidad de los autos o de las pelotas de béisbol se utiliza un equipo especial. Proponga una explicación para su funcionamiento.

24) Este tipo de barco, se dice que es “invisible” o indetectable por el radar. Explique.



25) El mando a distancia es un complemento obligatorio de los equipos domésticos de audio y video. ¿Cómo funciona?



## Tema III

# ÓPTICA Y FÍSICA MODERNA

## ÓPTICA

### Reflexión

La Óptica se ocupa de la propagación y el comportamiento de la luz. En un sentido amplio, la luz es la zona del espectro electromagnético que se extiende desde los rayos X hasta las microondas, aunque generalmente se asocia a la parte visible. El estudio de la Óptica se divide en dos ramas, la Óptica geométrica y la Óptica ondulatoria.

En la luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, por lo que se trata de una onda transversal. Sin embargo, dado que el efecto del campo magnético sobre la sustancia respecto al producido por el campo eléctrico es despreciable, asumiremos la luz como una onda constituida sólo por el vector campo eléctrico.

El rango visible va desde 350nm (violeta) hasta 750nm (rojo). La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda visibles. No existen límites definidos entre las diferentes longitudes de onda, pero puede considerarse que la radiación ultravioleta va desde los 350nm hasta los 10nm. Los rayos infrarrojos, que incluyen la energía calorífica radiante, abarcan las longitudes de onda situadas aproximadamente entre 750nm y 1mm. En el vacío, la velocidad es la misma para todas las longitudes de onda, es decir  $c = 300\,000\text{Km/s}$ .

Índices de Refracción	
Medio	Índice
vacío	1
aire	1,00029
agua	1,33
vidrio crown	1,52
vidrio flint	1,66
diamante	2,42

Cuando la longitud de onda cumple que  $\lambda < D$ , donde  $D$  es la dimensión característica de los obstáculos que aparecen en el recorrido de la luz, se dice que se cumplen las condiciones de la Óptica geométrica, y se utiliza el concepto de **rayo de luz**, dado por la **dirección de propagación de la onda**.

Si por el contrario,  $\lambda \geq D$ , es el caso de la Óptica ondulatoria, relacionada con fenómenos propios de las ondas como la difracción, la interferencia y la polarización.

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío  $c$  y la velocidad en una sustancia  $v$  se conoce como **índice de refracción** de la sustancia, que se simboliza por  $n$ . O sea, que  $v = c/n$ . La superficie que separa un medio de otro con distintos índices de refracción se conoce como **dióptrico**.

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un dióptrico, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado, pudiendo o no ser absorbido. Estudiemos el fenómeno de la **reflexión**.

El **plano de incidencia** se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del dióptrico) en el punto de incidencia. El **ángulo de incidencia** es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. El **ángulo de reflexión** se define como el formado entre la normal y el rayo reflejado.

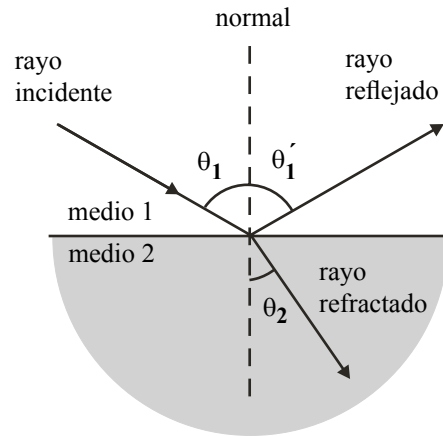
Las leyes de la reflexión afirman que: 1) el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, 2) que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano. Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada.

De acuerdo a las leyes de la reflexión puede construirse la imagen  $I$  del objeto  $O$  para un espejo plano, tomando como puntos característicos sus dos extremos.

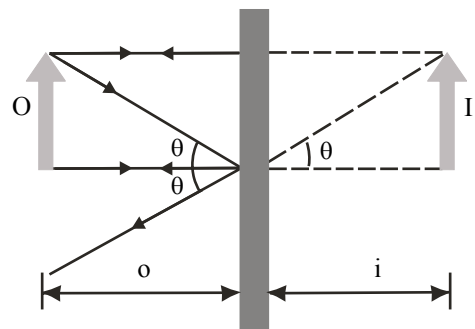
La imagen del objeto parece situada detrás del espejo y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante. Se dice que  $I$  es la **imagen virtual** del objeto  $O$ . El término de virtual está dado porque realmente en ese punto no hay energía (si se coloca un observador o una pantalla no puede recogerse nada) Nótese que se construye por la prolongación de rayos reales. La distancia de  $O$  hasta el espejo es la **distancia objeto**; la distancia entre  $I$  y el espejo es la **distancia imagen**

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie tienen direcciones aleatorias. Los rayos que están en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia y de reflexión, aleatorios. Esto hace que rayos incidentes paralelos no se reflejen paralelos y no puedan formar una imagen, lo que se conoce como **reflexión difusa**.

También existen los espejos esféricos, cóncavos o convexos, que poseen dos puntos notables. El **centro de curvatura  $C$** , que se encuentra equidistante de cualquier punto del espejo y permite definir un eje de referencia que llamaremos eje principal. Este eje pasa por  $C$  y corta al espejo radialmente. Y el **foco principal**, que es el punto por el que pasan los rayos que llegan al espejo paralelos al eje principal. La distancia del foco al espejo es la **distancia focal**.



Reflexión en un dióptrico. El ángulo de incidencia  $\theta_1$  y el ángulo de reflexión  $\theta'_1$  son iguales. El rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano.



Formación de la imagen de un objeto en un espejo plano. La imagen resultante es virtual y directa.

En general, se conoce como aberración el hecho de que la imagen esté distorsionada respecto al objeto. En un espejo esférico los rayos no paraxiales, o sea, los que se alejan del eje principal, no cortan el foco principal, sino que poseen otros focos. Esto se conoce como aberración esférica y es la causa de que en ciertas aplicaciones se utilicen espejos parabólicos que no presentan esta dificultad.

## Refracción

Como se ha dicho anteriormente, un rayo que incide en el dióptrico parte se refleja y parte se refracta. Pasemos a estudiar la refracción. Como se muestra en la figura, al pasar del medio con índice  $n_1$  al que posee  $n_2$  el rayo varía su dirección. En realidad pueden pasar dos cosas: o se acerca a la normal o se aleja de esta. Esto depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios: si pasa de uno menos denso a otro más denso, tiende a acercarse (por ejemplo, del aire al agua) En el caso contrario, se aleja.

La **ley de la refracción** plantea que el rayo incidente, la normal y el rayo refractado están en el mismo plano, y además se cumple la siguiente relación (también conocida como Ley de Snell):

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

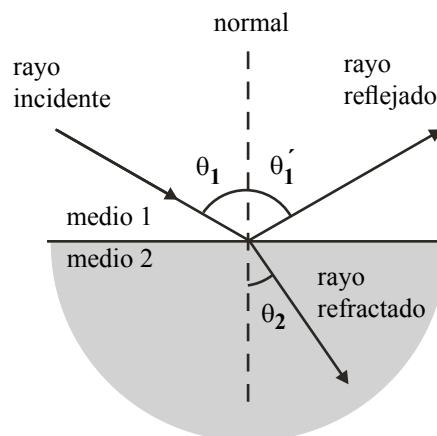
En la figura se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente  $AB$ , pero resulta desplazado.

La ley de la refracción puede obtenerse teóricamente por el llamado **Principio de Fermat**, que plantea que la luz viaja de un punto a otro siguiendo el camino en el que emplea el menor tiempo posible. De hecho, al variar el índice de refracción de un medio a otro cambia la velocidad, implicando una desviación de la dirección inicial.

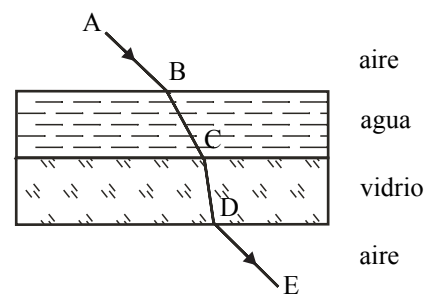
Una analogía es el recorrido que hacemos en la playa cuando vamos desde la arena a un punto en el agua que no esté frente a nosotros y queremos llegar lo antes posible, lo cual está dado por la diferencia de velocidad en la arena y en el agua. Es obvio que si la luz incide perpendicularmente sobre el dióptrico no habrá desviación y el rayo refractado será también perpendicular a éste.

Una **lente** es un medio transparente limitado por dos superficies esféricas o por una superficie esférica y otra plana. Si su espesor es despreciable comparado con los radios de las superficies se dice que es una lente delgada, que es el caso que trataremos en lo adelante.

Hay dos tipos fundamentales de lentes: **convergentes y divergentes**. Las primeras hacen que los rayos paralelos incidentes coincidan en un punto. Las divergentes, por el contrario, tienden a abrir el haz de rayos incidentes.

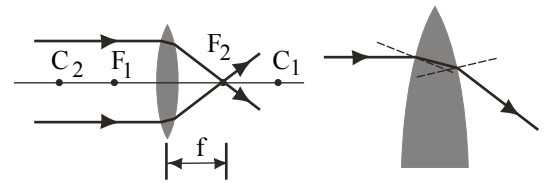


Refracción en un dióptrico. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo refractado depende de la relación entre los índices de refracción de los medios.



Refracciones sucesivas del rayo de luz a través de medios diferentes. De acuerdo al valor de los índices de refracción el rayo refractado se acerca o se aleja de la normal. Al regresar al mismo medio (aire) la dirección inicial y final son iguales.

Para una lente se definen, al igual que los espejos, rayos y puntos notables. El **rayo central**, pasa por el centro de la lente. El punto de intersección es el **centro óptico** de la lente. El rayo paralelo es cualquier rayo paralelo al central. El **foco** de la lente es aquel punto en el que se cortan los rayos paralelos en el rayo central luego de pasar la lente. En las convergentes es un foco real, está del otro lado de la lente respecto a la fuente de luz. En las divergentes es virtual, pues está dado por la prolongación de los rayos emergentes, encontrándose del mismo lado de la lente que la fuente de luz. El **aumento** se refiere a la relación entre el tamaño de la imagen y el del objeto.



Lente convergente.  $C_1$  y  $C_2$  se son los centros de curvaturas de las caras de la lente.  $F_1$  y  $F_2$  marcan los focos (reales) en función del sentido del rayo de luz. La distancia focal se señala como  $f$ .

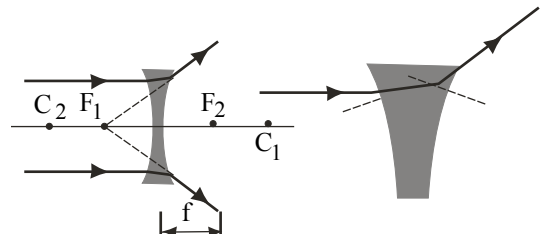
### Reflexión total

Si la luz pasa de un medio de mayor a otro con menor índice de refracción, puede ocurrir la llamada reflexión total interna.

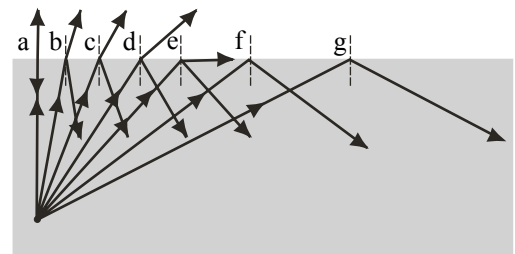
Puesto que los rayos refractados se alejan de la normal y la desviación aumenta con el ángulo de incidencia, hay un determinado valor, denominado **ángulo límite**  $\theta_1$  (o ángulo crítico) para el cual el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ . En ese caso el rayo refractado avanza rasante a la superficie de separación entre ambos medios. Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados. El ángulo crítico puede hallarse haciendo uso de la ley de la refracción:

$$\text{sen } \theta_1 = n_2/n_1$$

La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso.



Lente divergente. Los focos son virtuales porque se encuentran con la prolongación de los rayos refractados.



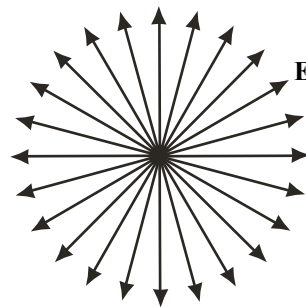
Reflexión total. A partir de un cierto ángulo crítico el rayo incidente se refleja totalmente.

### Polarización

Los átomos de una fuente de luz ordinaria emiten pulsos de radiación de duración muy corta. Cada pulso procedente de un único átomo es un tren de ondas prácticamente **monocromático**, es decir con una única longitud de onda. El vector eléctrico correspondiente a esa onda vibra en un plano que mantiene el mismo ángulo respecto a la dirección de propagación de la onda.

El ángulo inicial puede tener cualquier valor, pero cuando hay un número elevado de átomos emitiendo luz, los ángulos están distribuidos de forma aleatoria. Al no existir un único plano de vibración, se dice que la luz no está polarizada. Muchos autores le llaman a esto luz natural. Esto puede verse en la figura, donde se muestra que el vector  $E$  oscila en distintos planos respecto a la dirección de propagación que en este caso es perpendicular al plano del papel.

Si los vectores eléctricos oscilan en el mismo plano se dice que **la luz está polarizada** en un plano, o linealmente polarizada. La polarización es un fenómeno exclusivo de las ondas transversales.



Luz no polarizada (o luz natural). El vector intensidad de campo eléctrico  $E$  vibra en distintos planos.



Una forma de **polarizar la luz es por reflexión**. Cuando el rayo refractado y el reflejado forman un ángulo recto, la parte reflejada está totalmente polarizada en el plano perpendicular al plano de incidencia. El ángulo de incidencia para ese caso se conoce como **ángulo de Brewster**  $\theta_B$ . De acuerdo a la ley de la refracción, se halla que :

$$\tan \theta_B = n_1/n_2$$

Para otros ángulos la polarización del rayo reflejado es parcial.

Por su parte, el rayo refractado siempre sufre una polarización parcial, siendo la componente paralela al plano de incidencia mayoritaria respecto a la perpendicular. Esto también puede utilizarse para polarizar la luz, haciéndolo incidir el rayo sobre un sistema de láminas alternas de dos materiales como aire y vidrio. Después de atravesar varias de estas láminas, el rayo refractado está casi totalmente polarizado en el plano paralelo al de incidencia.

También puede polarizarse la luz aprovechando las propiedades de algunas sustancias que son anisótropas, es decir, muestran cualidades distintas según la dirección del espacio que se considere. En esos materiales, la velocidad de la luz depende de la dirección en que ésta se propaga a través de ellos. Esto los convierte en materiales **birrefringentes**, es decir, presentan **doble refracción**.

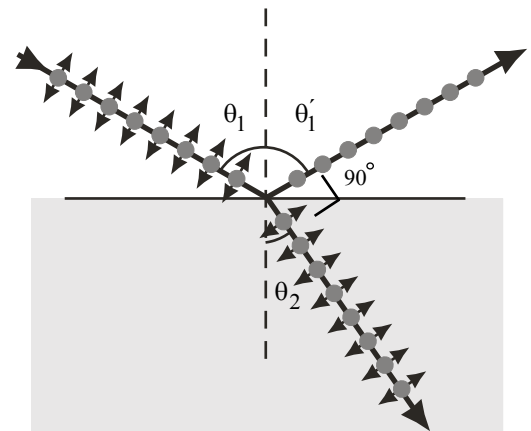
A no ser que la luz se propague de forma paralela a uno de los ejes de simetría del cristal (un eje óptico del cristal), la luz se separa en dos partes que avanzan con velocidades diferentes. Un rayo, llamado rayo ordinario, cumple la ley de la refracción. La otra componente constituye el rayo extraordinario y no cumple la ley de refracción. La velocidad de este rayo depende de su dirección en el cristal.

De modo que si un haz de luz llega a un cristal birrefringente, al salir se desdobra. Quiere decir que si observamos cierto objeto a través de tal sustancia, lo veremos doble. La experiencia demuestra que ambos rayos están polarizados perpendicularmente entre sí.

Algunas de estas sustancias birrefringentes presentan además **dicroísmo**, es decir, una de las componentes es fuertemente absorbida y si el espesor es suficiente, no pasa el cristal. Tal sustancia sirve para construir un polarizador, ya que la luz natural que llega emerge polarizada.

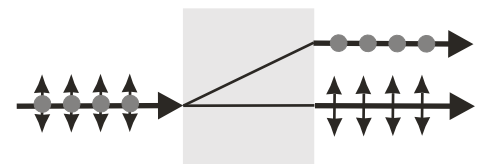
Existen otros tipos de polarizadores, que combinan estas propiedades de birrefringencia con diferentes factores geométricos, como los llamados prismas de Nicol.

A la luz polarizada se le puede interponer otro polarizador que en ese caso recibe el nombre de **analizador**, lo cual permite conocer el plano de polarización. Si se cruzan un polarizador y un analizador situados consecutivamente, de forma que el analizador esté orientado para permitir la transmisión de las vibraciones situadas en un plano perpendicular a las que transmite el polarizador, se bloqueará toda la luz procedente del polarizador.

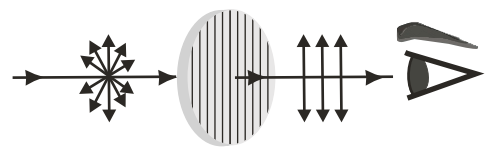


- componente perpendicular
- ↔ componente paralela

**Polarización por reflexión.** La luz natural que incide sobre el dióptico tiene componentes perpendiculares y paralelas al plano de incidencia. Cuando  $\theta_i$  coincide con el ángulo de Brewster, el rayo reflejado está totalmente polarizado

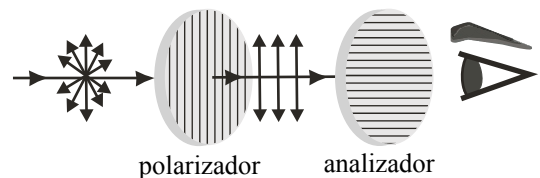


**Cristal birrefringente.** La luz natural incidente se desdobra en un rayo ordinario y otro extraordinario polarizados perpendicularmente entre sí.



polarizador

Polarización de la luz por un polarizador.



polarizador analizador

Sistema formado por un polarizador y un analizador.

Si la intensidad de la luz natural incidente al polarizador es  $I_0$  y la que emerge del analizador es  $I$ , se relacionan por la **Ley de Malus**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

$\theta$  es el ángulo que forman los ejes del polarizador y del analizador.

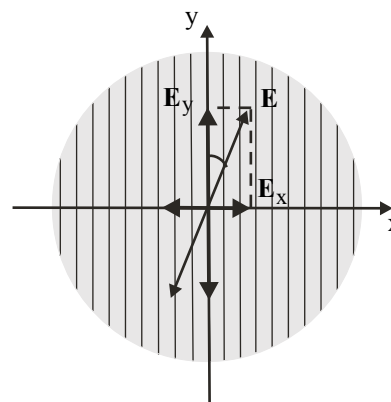
Otro fenómeno característico de la Óptica ondulatoria es la interferencia. Cuando dos haces de luz se cruzan pueden interferir, lo cual afecta a la distribución de intensidades resultante. Bajo condiciones adecuadas puede obtenerse un patrón de interferencia como el de la figura, dado por una sucesión de franjas claras y oscuras.

Para ello es necesario que las fuentes de luz que interfieren tengan igual frecuencia, o sea, exista monocromaticidad; y que sean coherentes. La **coherencia** de dos haces significa que la diferencia de fase entre ellos es constante en el tiempo. Si la relación de fase cambia de forma rápida y aleatoria, los haces son incoherentes. Las fuentes de luz habituales (incandescente, fluorescente, LED) no son coherentes ya que el mecanismo de emisión de luz debido a la desexcitación de los electrones en los átomos no es coordinado. Un laser es una fuente de luz coherente.

La interferencia constructiva se produce en los puntos en que las ondas que interfieren están en fase; es decir, cuando los máximos y mínimos de ambas ondas coinciden. En ese caso, las dos ondas se refuerzan mutuamente y forman una onda cuya amplitud es igual a la suma de las amplitudes individuales de las ondas originales. La interferencia destructiva se produce cuando las ondas están completamente desfasadas una respecto a la otra; es decir, cuando el máximo de una onda coincide con el mínimo de otra. En este caso, las dos ondas se cancelan mutuamente. Para que el patrón de interferencia se mantenga, la diferencia de fase no puede variar en el tiempo; de ahí la necesidad de la coherencia.

En el experimento ilustrado en la figura se muestra cómo lograr un patrón de interferencia a partir de una fuente no coherente. Un haz de luz pasa previamente por un orificio, convirtiéndose en un foco secundario  $S_0$  que ilumina una superficie opaca con dos rendijas. La luz producida por  $S_1$  y  $S_2$  forma un patrón de franjas sucesivamente claras y oscuras en una pantalla. En la ilustración están dibujadas las ondulaciones para mostrar que hay puntos en los que las ondas de ambas rendijas llegan en fase y se combinan aumentando la intensidad. En otros puntos las ondas están desfasadas  $180^\circ$  y se anulan mutuamente.

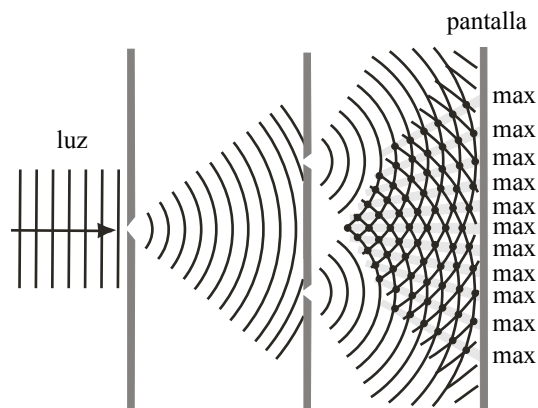
Las ondas de luz reflejadas por las dos superficies de una capa transparente suficientemente fina pueden interferir entre sí. Esto se conoce como **interferencia en láminas delgadas**. En principio, la condición de encontrar un máximo o un mínimo de intensidad sobre la superficie de la lámina depende de la longitud de onda  $\lambda$  de la luz y del ancho  $d$  de la lámina.



Componentes del vector eléctrico correspondientes al rayo polarizado respecto al eje del analizador.



Franjas de interferencia.



Formación de un patrón de interferencia a partir de dos ranuras.

Además, hay que tener en cuenta el hecho de que la onda, al incidir sobre un medio de mayor índice de refracción, se refleja invirtiendo su fase. Si se trata de una lámina de vidrio rodeada de aire, esto es lo que ocurre al reflejarse en la superficie de la lámina. En la reflexión interior se mantiene la fase. Los factores anteriores determinan si la interferencia es constructiva o destructiva.

Cuando la magnitud de la longitud de onda es comparable con la de los obstáculos, puede ocurrir el fenómeno de la **difracción**. La luz que incide sobre el borde de un obstáculo es desviada, o difractada, y el obstáculo no genera una sombra geométrica nítida.

El paso de la luz por una abertura estrecha permite recoger en una pantalla posterior un patrón de difracción, consistente en una sucesión de anillos brillantes y oscuros. Al igual que en la interferencia, ocurren procesos constructivos (brillantez) y destructivos (oscuridad). Tal patrón se muestra en la figura.

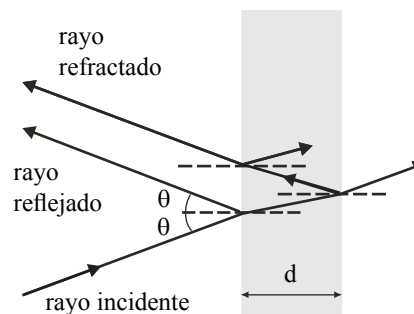
En la figura inferior se tiene el patrón de difracción de un disco. Nótese un punto brillante en el centro, prueba de la desviación de la luz al pasar por el borde del disco.

Un rayo de luz que va de un punto a otro no puede ser visto lateralmente, es decir, por un observador que se encuentra a una distancia perpendicular a la dirección de propagación. Sin embargo, en no pocas ocasiones apreciamos un rayo de luz en esa posición. Esto es debido a al **difusión de la luz**. La difusión se refiere a la desviación de parte del haz inicial por su interacción con partículas que encuentra en su camino o incluso con los átomos de la sustancia que atraviesa. Si observamos un rayo de luz de forma lateral es por nos llega luz que ha sido desviada del haz central.

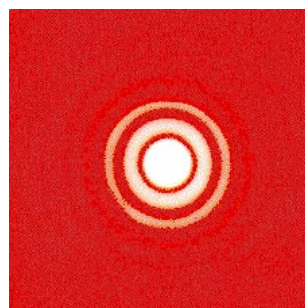
Para el caso de la difusión debido a la interacción con átomos o moléculas, se encuentra que la difusión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda de la luz. Esto quiere decir que en la medida que la longitud de onda es menor, será más difundida. Hay que agregar que la luz que se difunde está parcialmente polarizada.

Sabemos por experiencia que cuando la luz penetra un medio, aunque sea transparente, poco a poco será cada vez menos intensa. Esto se debe a la **absorción de la luz**. Para describir este hecho se utiliza la ecuación:  $I = I_0 e^{-\mu x}$  donde  $I_0$  es la intensidad de la luz inicial. Por intensidad de la luz nos referimos a energía por unidad de tiempo que atraviesa la unidad de área.  $I_0$  es, por tanto, la intensidad del haz de luz al instante de arribar a la sustancia. El coeficiente de absorción  $\mu$  es característico del material;  $I$  es la intensidad de la luz luego de atravesar la distancia  $x$ .

En el vacío, la velocidad de la luz es la misma para todas las longitudes de onda. Sin embargo, **la velocidad de la luz en las sustancias** es menor que en el vacío, y **varía para las distintas longitudes de onda**; este efecto se denomina **dispersión**.



Interferencia en lámina delgada. El rayo reflejado y el rayo refractado que proviene de la lámina interfieren, dando lugar a máximos y mínimos de intensidad.



Patrón de difracción de una abertura, en la que se observan anillos alternos de sombra y luz.



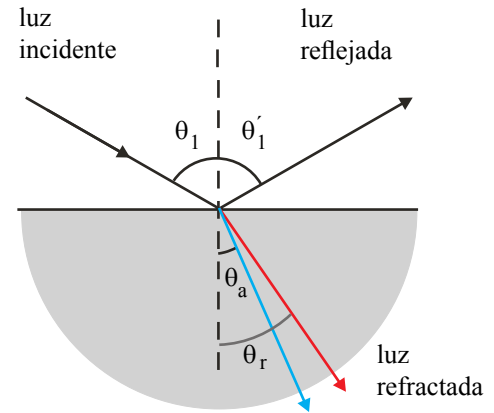
Patrón de difracción de un disco. Nótese el punto luminoso en el centro de la sombra del disco

La dispersión se manifiesta en que el índice de refracción de un medio depende de la longitud de onda de la luz que pasa a través del mismo. En general, el índice de refracción disminuye con la longitud de onda.

Al pasar la luz blanca por un dióptrico, la ley de la refracción se cumplirá de diversa manera para la longitud de onda, digamos correspondiente al azul que a la del rojo, como se muestra en la figura.

Por último, señalemos que para un instrumento óptico, como un microscopio o un telescopio, es decisivo su **poder separador**. Esto significa la posibilidad que posee de separar dos puntos, o sea, que en vez de verse como uno sólo, puedan realmente apreciarse los dos puntos.

Se encuentra que el poder separador depende de la distancia angular a la que se encuentre el objeto (se refiere al ángulo formado entre los extremos del objeto y el observador), pero además, de la longitud de onda de la luz de forma inversamente proporcional, de manera que a menor longitud de onda, el poder de resolución aumentará.



Dispersión de la luz. El índice de refracción del color azul es mayor que el correspondiente al rojo y por esa razón el rayo azul se desvía más (respecto a la dirección inicial del rayo) que el rojo.

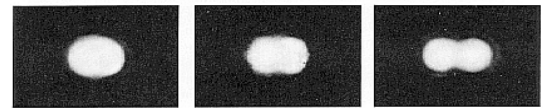
## Actividad óptica

Algunas sustancias presentan la propiedad de ser **ópticamente activas**. Esto significa que si un haz de luz polarizada pasa a través de ellas, **son capaces de hacer girar el plano de polarización cierto ángulo**. Cuando el giro visto por el observador tiene lugar en el sentido de las agujas del reloj, se dice que la sustancia es dextrógira, y en caso contrario, levógira.

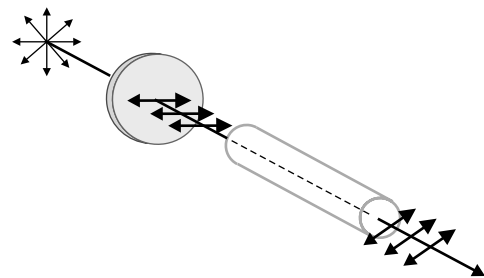
Entre las sustancias ópticamente activas figura una serie de cuerpos sólidos (cuarzo, espato de Islandia, azúcar, etc.) y muchos líquidos (aceite de trementina, soluciones acuosas de azúcar, nicotina, el ácido tartárico, etc.)

En general, el valor del ángulo de rotación depende de la longitud de onda de la luz. Por esta razón las mismas sustancias activas hacen girar el plano de oscilaciones de las ondas de distinta longitud en ángulos diferentes.

Para el caso de las soluciones, el ángulo de rotación del plano de polarización se determina por la fórmula:  $\alpha = (\alpha) c d$  donde  $c$  es la concentración de la solución, igual al número de gramos de la sustancia ópticamente activa por unidad de volumen;  $(\alpha)$  es el **poder rotatorio** o rotación específica, o sea, el ángulo rotado por unidad de longitud de la muestra; y  $d$  la longitud de la muestra.



Ejemplo de poder separador. En la secuencia se observa como en la medida que aumenta el poder separador se logra discernir que son dos focos luminosos en vez de uno.



Cuando la luz polarizada atraviesa una sustancia ópticamente activa el plano de polarización rota cierto ángulo.

## TAREAS PROPUESTAS

### Reflexión

- 1) En la práctica se utilizan espejos esféricos para maquillaje y seguridad. Estudie las características de los mismos.
- 2) Una persona desea verse de cuerpo entero en un espejo plano. ¿Qué tamaño debe tener el espejo? ¿cómo colocarlo?
- 3) El reflector retrovisor se utiliza como indicador de peligro en las carreteras o en los reflectorizantes de los autos. Explique como funciona.
- 4) Una alternativa para resolver el problema energético disminuyendo el impacto ambiental es la utilización de la energía solar. Investigue el funcionamiento de los hornos solares.



### Refracción

- 5) Investigue los tipos de lentes que se utilizan para corregir los principales defectos de la vista.
- 6) Un microscopio permite observar un objeto pequeño cercano. Explique cómo funciona.



- 7) Un telescopio permite observar un objeto grande y distante. Explique cómo funciona.



- 8) Un sistema óptico de interés es la cámara fotográfica reflex. Estudie su funcionamiento.



## Reflexión total

- 9) La fibra óptica es un elemento de gran utilidad. Fundamente desde el punto de vista físico cómo funciona e investigue sobre su uso en las comunicaciones.



- 10) El endoscopio es un equipo médico que permite hacer observaciones internas al cuerpo humano con la finalidad de diagnóstico o para realizar operaciones quirúrgicas de mínimo acceso. Explique su funcionamiento.



## Polarización

11) Queremos hacer una foto de un estanque de modo que salga el fondo, sin embargo el reflejo del cielo lo impide. Proponga una solución.



12) Un dispositivo ampliamente utilizado para brindar información es la pantalla de cristal líquido. Investigue como funciona.

13) A todos nos llama la atención la coloración que adquieren los charcos de agua que contienen grasa. Investigue tal fenómeno.



14) El CD ROM es un dispositivo idóneo para el almacenamiento de la información. Explique cómo se logra esto.

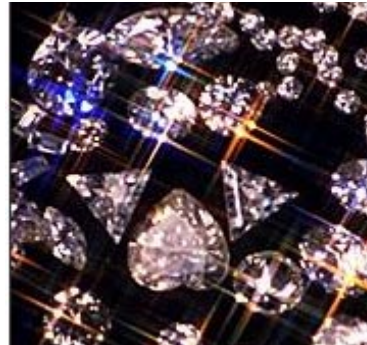
15) El aire es transparente, sin embargo, el cielo es azul. Explique este fenómeno



16) Explique cómo ocurre la descomposición de la luz blanca al atravesar un prisma.



17) Los diamantes nos llaman la atención por su brillo y colorido. Explique por qué esto es posible.



18) Algunas gafas transparentes se oscurecen ante una luz muy intensa como la del sol. Proponga una explicación.

19) La percepción de este famoso cuadro de Seurat, dibujado con la técnica del puntillismo, varía con la distancia a la que nos colocamos del mismo. Explique.



### Actividad óptica

20) El polarímetro es un instrumento que permite conocer la concentración de soluciones de ciertas sustancias, entre ellas, el azúcar. Explique su funcionamiento.





## FÍSICA MODERNA

### Radiación térmica

Al abordar las distintas formas de transmisión del calor se estudió la radiación, junto a la conducción y la convección. Fue definida como la energía emitida por un cuerpo y que se transmite sin necesidad de un medio (como la conducción) o del movimiento de sustancia (como la convección)

La **radiación térmica no es más que la energía propagada por ondas electromagnéticas en la zona del espectro correspondiente fundamentalmente del infrarrojo**. Es importante comprender que no se refiere a la radiación reflejada por la superficie de un cuerpo (tal como ocurre en un espejo), sino que es energía emitida por el cuerpo debido a su movimiento térmico, de ahí su nombre. Y puesto que una medida de este movimiento es la temperatura, es de esperar una relación entre la radiación térmica y la temperatura.

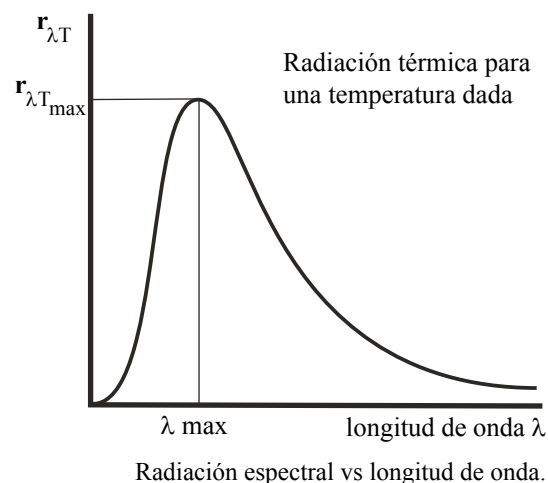
En efecto, esta relación existe y al inicio de este siglo constituía uno de los principales problemas de la Física, toda vez que la teoría existente (la llamada Física Clásica) no permitía explicar los resultados experimentales; por el contrario, conducía a graves contradicciones. La solución del problema de la radiación térmica por Max Planck en el año 1900 fue el nacimiento de la Física Moderna.

Dado un cuerpo, se define para su superficie la **radiación espectral  $r_{\lambda T}$**  como la **energía emitida por la unidad de superficie, en la unidad de tiempo correspondiente a una longitud de onda  $\lambda$  a la temperatura  $T$** . Dicho de otra manera, es la energía que una sección de superficie de  $1\text{m}^2$  emite en 1s correspondiente a un valor de longitud de onda determinado. De manera que de acuerdo a la longitud de onda de la onda electromagnética emitida, será mayor o menor la intensidad de energía transmitida.

Experimentalmente se estableció la dependencia entre la radiación espectral  $r_{\lambda T}$  y la longitud de onda  $\lambda$  para una temperatura  $T$  constante, tal y como se muestra en la figura. La curva muestra cómo la intensidad de energía máxima corresponde a un valor de longitud de onda que se ha denominado  $\lambda_{\text{max}}$ . Significa que el cuerpo emite la mayor parte de su energía en radiación de esa longitud de onda.

Asimismo, se observó que esta dependencia era la misma para todos los cuerpos a igual temperatura en la medida que se aproximaban a un modelo teórico conocido como **cuerpo negro**.

Para entender este concepto de cuerpo negro hay que partir del hecho de que los cuerpos no sólo emiten, sino también absorben energía. Al incidir radiación sobre la superficie de un cuerpo ocurren dos procesos: parte se refleja y parte se absorbe. La experiencia muestra que los cuerpos que mejor absorben la energía que llega a ellos (y que por tanto reflejan poco) son los que mejor emiten.



Así, se define como **cuerpo negro** a aquel que **absorbe toda la energía que incide sobre él**. Ejemplo de cuerpo negro puede ser el terciopelo negro o el hollín. Una forma de construir un cuerpo negro es un recipiente de paredes interiores oscuras y rugosas al que se ha practicado un agujero. Tal orificio es un ejemplo de cuerpo negro, ya que la radiación incidente, debido a las múltiples reflexiones, queda atrapada y no logra salir.

Pero al mismo tiempo, el cuerpo negro es **el cuerpo que más emite entre todos los cuerpo a un temperatura dada**. Esto se aprecia en la foto, en la que un cilindro metálico tiene un pequeño orificio. El cuerpo está a una temperatura suficientemente alta tal que el metal se muestra incandescente; sin embargo, el agujero es más brillante que el resto de la superficie.

Aunque el cuerpo negro es una idealización las leyes que a continuación se establecerán corresponden a este modelo. El grado de acercamiento de un cuerpo a la condición de cuerpo negro se da por el coeficiente de absorción  $a_T$ , que posee valores entre 0 y 1, éste último, por supuesto, corresponde exactamente al cuerpo negro. Tampoco podemos pensar que el modelo sólo es válido para los cuerpos de color negro. Un filamento de un bombillo incandescente puede modelarse como cuerpo negro admitiendo que toda la energía que recibe (energía eléctrica) la emite en forma de calor.

Se define la **radiación integral  $R_T$**  como **la energía total emitida por unidad de superficie y de tiempo a una temperatura determinada**. Esto es, la cantidad total de energía que el cuerpo emite en todas las longitudes de onda. La ley de Stefan-Boltzman establece que la radiación integral del cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, o sea:

$$R_T = \sigma T^4$$

Donde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$  es la llamada constante de Stefan-Boltzman. Para un cuerpo cualquiera queda como:  $R_T = a_T \sigma T^4$ .

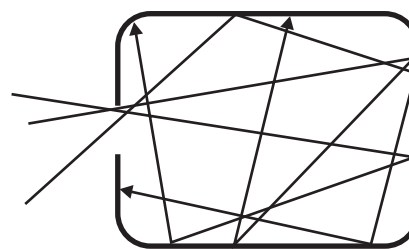
Experimentalmente se ha estudiado la variación de la dependencia de la curva de radiación espectral  $r_{\lambda T}$  contra  $\lambda$  en función de la temperatura, como se observa en la figura. La familia de curvas muestra que al aumentar la temperatura del cuerpo, el valor del máximo de la distribución se corre hacia las bajas longitudes de ondas, o sea,  $\lambda_{\text{max}}$  se hace menor. Al mismo tiempo, el valor del máximo de  $r_{\lambda T}$  aumenta con la temperatura.

Lo anterior se concreta en las Leyes de la radiación térmica. La primera es la Ley de desplazamiento de Wien:

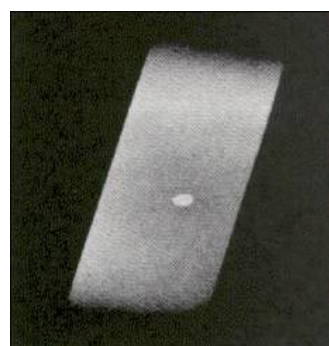
$$\lambda_{\text{max}} = C_1/T$$

$C_1$  es una constante cuyo valor es  $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/K}$ . La siguiente Ley de la radiación térmica (donde  $C_2$  es otra constante) sería:

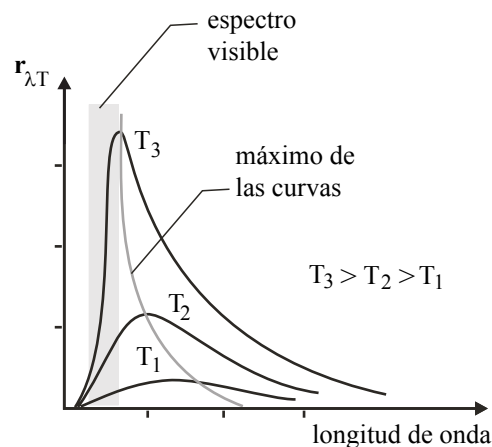
$$r_{\lambda T(\text{max})} = C_2 T^5$$



Esquema de una cavidad que funciona como un cuerpo negro. A temperatura ambiente, la luz que penetra por el agujero prácticamente no sale debido a las múltiples reflexiones en el interior, y termina absorbida por las paredes. Sin embargo, la emisión de la superficie interior hace que en la longitud de onda del infrarrojo, el orificio irradia más energía que el resto del recipiente.



Orificio en un cilindro metálico a alta temperatura.



Variación de la curva de radiación espectral para distintos valores de temperatura.

Estas leyes no podían ser deducidas de acuerdo con la Física Clásica. En el año 1900 Max Planck propuso la hipótesis de que la energía era absorbida y emitida por un cuerpo en forma de cuantos o paquetes de energía (del latín quantum) y no de forma continua como era la concepción clásica. La energía de un cuanto esta dada por la expresión:

$$\varepsilon = hf$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  es la constante de Planck y  $f$  es la frecuencia de la radiación (recordemos que  $f = c/\lambda$  siendo  $c$  la velocidad de la luz) De manera que la energía que absorbe o emite un cuerpo para una longitud de onda dada será:  $E = nhf$  donde  $n$  es un número entero. Esta idea revolucionaria de Planck marcó el surgimiento de la nueva Física conocida como Física Cuántica.

Albert Einstein extendió estas nuevas ideas, al asumir que la energía también se trasmite en forma de cuantos. Consideró la luz como un haz de partículas, llamadas fotones, cada cual de energía  $hf$ . Esto le permitió explicar en 1905 el llamado efecto fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico, conocido desde finales del siglo XIX, consiste en que al incidir radiación electromagnética en el rango de ultravioleta o visible sobre una placa metálica se desprenden electrones que en condiciones experimentales adecuadas pueden provocar la circulación de corriente eléctrica.

La teoría ondulatoria de la luz era incapaz de explicar las regularidades del efecto fotoeléctrico. Sin embargo, Einstein propuso una fórmula muy sencilla:

$$hf = W_0 + E_{c(\max)}$$

Siendo  $hf$  la energía del fotón incidente,  $W_0$  el trabajo de extracción, es decir, la energía necesaria para extraer un electrón del metal (que es una característica del mismo) y  $E_{c(\max)}$  es la energía con la que sale desprendido el electrón. Con ella se explican las características del efecto fotoeléctrico.

De lo anterior se concluye que la luz posee un comportamiento dual: como onda y como partícula. Esto no debe verse como contradictorio, sino como una propiedad de la naturaleza. En algunos fenómenos (interferencia, difracción, polarización) se manifiesta como onda y en otros (efecto fotoeléctrico) se comporta como partícula.

## Cuantificación de la energía

La idea de la cuantificación, o sea, del carácter discreto de las magnitudes es uno de los fundamentos de la Física Moderna. Ya se sabe que la carga eléctrica está cuantificada, siendo  $e$ , la carga del electrón, el cuanto de carga. Cualquier otro valor de carga eléctrica es un número de entero de veces ese valor.

En la luz, considerada como un flujo de fotones, se observa la cuantificación de la energía, pues esta se encuentra distribuida en paquetes  $hf$ , y no en cualquier valor. En el estudio del átomo, este concepto resulta esencial.

A partir de 1911, y como consecuencia de los experimentos de Ernest Rutherford, se estableció un modelo atómico en el que la carga positiva está concentrada en el núcleo y alrededor del mismo están los electrones, en número suficiente para mantener la neutralidad del átomo. Rutherford hizo incidir partículas alfa (que después se supo eran núcleos de helio ionizados) sobre una fina lámina de oro y observó que algunas partículas rebotaban hacia atrás, lo cual evidenciaba que la carga positiva del átomo está concentrada en una pequeña región del espacio que llamó núcleo. Por ejemplo, el átomo más simple, el átomo de hidrógeno, está compuesto por un núcleo con carga  $+e$  y un electrón, que con su carga  $-e$ , garantiza una carga total nula.

Ahora bien, la energía del átomo esta dada por la energía del electrón. Éste normalmente se encuentra en un estado llamado básico, que es estable, pero que por influencia externa (un campo eléctrico, calor, etc.) puede excitarse y pasar a un estado de energía superior. Lo cierto es que la energía que puede adquirir el electrón en el átomo está cuantificada. En otras palabras, el electrón no puede tener cualquier valor de energía, sino determinados valores.

En la figura puede observarse como  $E_1$  es el estado básico;  $E_2$  y  $E_3$  son estados excitados y  $E_{\text{ionización}}$  es la energía de ionización. Si el electrón la alcanza, escapa del átomo y éste queda ionizado.

De manera que son posibles dos procesos: la absorción o la emisión de energía, los cuales están representados en el esquema. La ecuación que describe ambos procesos es:

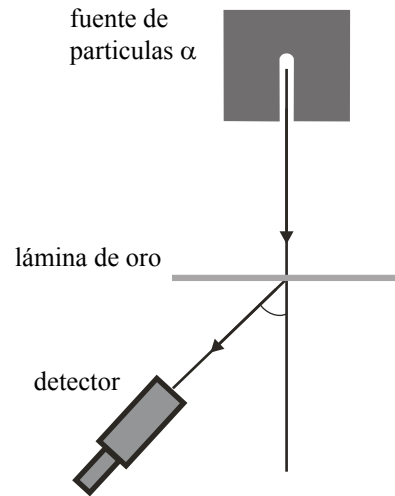
$$hf = E_2 - E_1$$

En el caso de la absorción, un fotón de energía  $hf$  excita al electrón haciendo que pase del nivel  $E_1$  al  $E_2$ . Así, el fotón es absorbido.

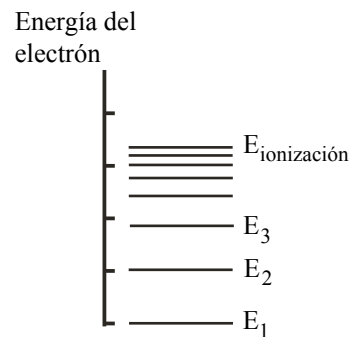
Pero el estado  $E_2$  (como cualquiera diferente al básico) es inestable y allí el electrón sólo permanece un intervalo de tiempo (del orden de  $10^{-8}$ s) pasando al nivel  $E_1$  y emitiendo un fotón de energía  $hf$ .

Este proceso de emisión explica los llamados espectros atómicos. Mediante excitación, las sustancias emiten energía, que no sólo abarca el rango visible, sino que puede estar desde el infrarrojo al ultravioleta e incluso a la región de rayos x. Los electrones, al desexcitarse, saltan desde un nivel superior de energía a otro inferior, y la magnitud del salto determina la frecuencia del fotón emitido. Este espectro de emisión es una característica propia de cada elemento, y constituye una vía de identificación (la llamada espectroscopia atómica)

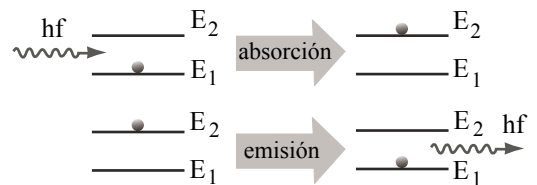
La figura muestra un esquema de varios niveles de energía correspondientes a un átomo de hidrógeno en los que se han representado distintas transiciones posibles.



Esquema del experimento de Rutherford de dispersión de partículas  $\alpha$  que le permitió establecer el modelo nuclear del átomo.



Niveles de energía para un electrón en un átomo.  $E_1$  es el estado básico o estable y  $E_{\text{ionización}}$  la energía de ionización o energía necesaria para que el electrón abandone al átomo.



Procesos de absorción y emisión de energía por un átomo. Al pasar el electrón de un nivel de energía a otro, absorbe o emite un fotón de energía  $hf$ .

El nivel final determina lo que se conoce como una serie. Por la magnitud de los saltos, es de esperar que la serie de Lyman esté en la zona ultravioleta y la de Paschen en el infrarrojo. Por su parte, la serie de Balmer está en la parte visible del espectro.

Para átomos más complejos que el del hidrógeno no ocurre lo que podría ser más lógico: que todos los electrones del átomo estén en el estado básico, que es el de menor energía. Por el contrario, en el estado básico sólo hay dos electrones, 8 en el próximo, 18 en el tercero, 32 en el cuarto y así sucesivamente. Esta restricción se explica por el **Principio de exclusión de Pauli**, que prohíbe la existencia de más de dos electrones en un mismo estado cuántico, lo cual justifica que exista una distribución de electrones por niveles. Una explicación más detallada de este aspecto escapa al alcance del curso.

### Dualidad onda corpúsculo de las partículas

En 1924 Luis De Broglie llegó a la conclusión de que la dualidad onda corpúsculo de la luz debería extenderse a las partículas. De esta forma, al igual que la luz, en algunos experimentos las partículas se comportarían como corpúsculos y en otros, como ondas.

De forma simplificada la idea puede entenderse de la siguiente manera. A cada partícula que posee un momento lineal  $p$  se le asocia una onda de longitud de onda  $\lambda$  de acuerdo a la relación de De Broglie:

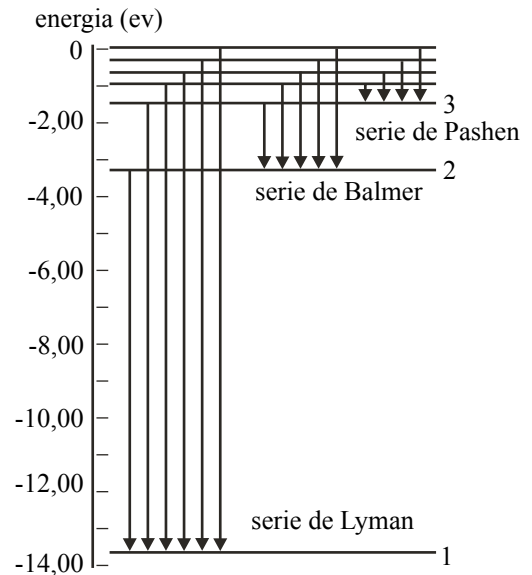
$$\lambda = h/p$$

Donde  $h$  es la constante de Planck. De aquí se infiere que a mayor momento la longitud de onda asociada es menor. Puesto que  $p = mv$  es de esperar que para los cuerpos macroscópicos  $\lambda$  sea tan pequeña que los efectos ondulatorios no sean apreciables, tal y como ocurre en realidad.

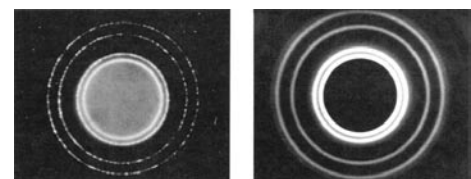
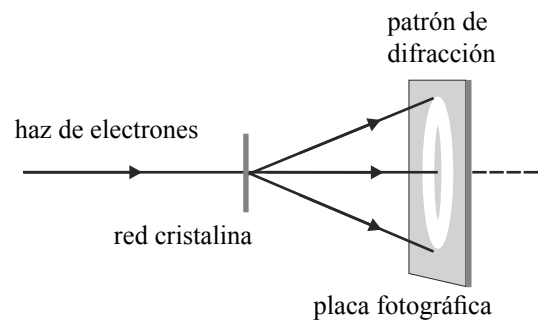
Por ejemplo, un auto de masa 1000 Kg que se mueve a 10 m/s posee un momento  $p = 10^4$  Kg m/s. Con estos valores su longitud de onda sería entonces del orden de  $10^{-30}$  m. De acuerdo a la condición de difracción ( $\lambda \sim D$ ) nos damos cuenta que no es posible observar esto en la práctica, al ser  $\lambda$  tan pequeña.

En cambio, para el caso de un electrón, es posible acelerarlos de manera que la longitud de onda asociada pueda estar en el orden de los nanómetros, el mismo orden de los espacios interatómicos en una red cristalina de un metal. Esto da la posibilidad de que ocurra la difracción de electrones al pasar a través de la red, lo cual fue observado por primera vez en 1927.

En la figura se muestra el esquema de un experimento en el que un haz de electrones se hace pasar por una red cristalina, que brinda los espacios adecuados para la difracción.



Salto de energía correspondiente a las series espectrales del átomo de hidrógeno.



Arriba, esquema de un experimento de difracción de electrones a través del enrejado de una red cristalina.

Abajo, a la izquierda, el patrón de difracción de un haz de rayos X a través de una estructura cristalina. A la derecha, el patrón correspondiente a un haz de electrones. Nótese la similitud.

En la pantalla, lejos de obtenerse el impacto de un punto frente a la rendija, se forma un patrón de difracción, es decir un arreglo de máximos y mínimos de intensidad. Hay que aclarar que este patrón se forma después de que muchos electrones han sido difractados. En efecto, si el experimento se hace de modo que los electrones llegan a la red de uno en uno, se observaría el impacto individual de cada uno en distintas regiones de la pantalla hasta que finalmente se va conformando el patrón de difracción.

## Radioactividad natural

Como ya se ha mencionado, el átomo está constituido por un núcleo alrededor del cual están los electrones. Las características fundamentales del núcleo son su carga y su masa. La carga del núcleo se da en unidades de carga del electrón y se designa por la letra  $Z$ . De esta manera  **$Z$ , conocido por número atómico**, establece la ubicación del elemento en la tabla periódica.

El núcleo está constituido por dos tipos de partículas: los protones (que tienen carga positiva) y los neutrones (que son neutros) En general son llamados nucleones. Los nucleones se unen por las llamadas fuerzas nucleares, que se caracterizan por ser las fuerzas más intensas de la naturaleza, aunque de corto alcance. La masa del protón y del neutrón es prácticamente la misma y su valor es unas 2000 veces la masa del electrón. Por tanto, la masa del núcleo define la masa del átomo, al ser despreciable el aporte de los electrones. Se comprende entonces que  $Z$  no es más que la cantidad de protones del núcleo. Salvo en los elementos más pesados, la cantidad de protones y neutrones es aproximadamente igual.

El **índice de masa  $A$**  es el número de nucleones del núcleo. Una forma de representar los núcleos es  ${}_Z X^A$  donde  $X$  es el símbolo del elemento. Si se tienen dos núcleos, de igual  $Z$  pero distinta cantidad de neutrones se dice que son isótopos.

Podría pensarse que la masa del núcleo es la suma de las masas de los nucleones que lo conforman. Sin embargo esto no es así. La masa del núcleo  $M$  es menor que la suma de las masas  $\sum m_n$  de modo que existe un **defecto de masa  $\Delta m$**  dado por:

$$\Delta m = \sum m_n - M$$

La explicación de este defecto de masa viene dada por la famosa fórmula de Einstein:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Esto significa que asociada a  $\Delta m$  hay una energía  $\Delta E$  conocida como **energía de enlace**, que se interpreta como una energía desprendida al crearse el núcleo.

Hay núcleos que son inestables y experimentan la llamada **radiactividad natural**. La radiactividad puede ser de tres tipos: alfa( $\alpha$ ), beta( $\beta$ ) y gamma ( $\gamma$ ). La radiactividad alfa consiste en la emisión de núcleos de helio  ${}_2\text{He}^4$ ; la beta son electrones y la gamma radiación electromagnética de alta energía, o sea, alta frecuencia y que siempre acompaña los dos procesos anteriores.

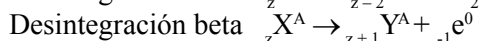
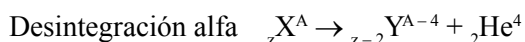
La radiactividad cumple la **Ley de desintegración radiactiva**:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

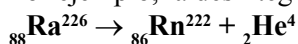
$N_0$  es el número de núcleos inicial, para  $t = 0$ ;  $N$  es el número de núcleos que quedan sin desintegrar al cabo del tiempo  $t$ ; y  $\lambda$  es la constante de desintegración, que indica cuán rápido es el proceso.

En la figura se observa cómo la cantidad de núcleos que quedan sin desintegrar  $N$  decae exponencialmente. Conviene introducir el concepto de **tiempo de vida medio**  $T_{1/2}$  o periodo de desintegración que es el tiempo en que la cantidad  $N$  disminuye en la mitad. Se relaciona con la constante de desintegración a través de la expresión  $T_{1/2} = 0,69/\lambda$ . El tiempo de desintegración varía desde millones de años hasta fracciones de segundo.

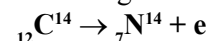
Para describir el proceso de desintegración existen las reglas de desplazamiento. Estas son:



Que muestran como el núcleo madre X se desintegra en el núcleo hijo Y. Por ejemplo, la desintegración alfa del radio en radón:



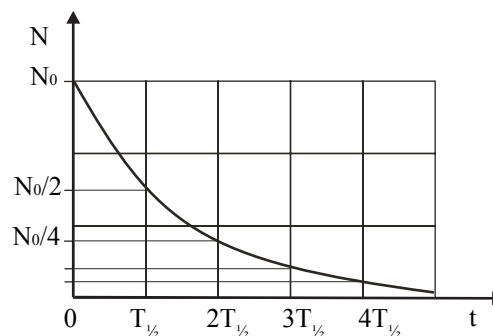
O la desintegración beta del carbono:



Generalmente estos núcleos hijos surgen en un estado inestable y se desexcitan emitiendo un fotón de alta energía (alta frecuencia) que es la radiación gamma. Es un proceso análogo a la emisión atómica, pero en este caso entre estados cuánticos del núcleo.

Para caracterizar una muestra se introduce el concepto de **actividad A** que no es más que el **número de desintegraciones por segundo que sufre la misma**. Formalmente  $A = \lambda N$  y su unidad es el curie (Cu) que resulta muy grande, por lo que se usa comúnmente en los laboratorios unidades derivadas, milicurie y microcurie.

La radiactividad artificial se refiere a la que sufren isótopos que no existen en la naturaleza y que son creados por el hombre en el laboratorio. Realmente los bajos periodos de desintegración hacen que no puedan estar presentes en la naturaleza. En este caso puede existir la desintegración beta positiva, que es similar a la estudiada salvo que se emite un electrón positivo, que es lo que se conoce como positrón.



Ley de desintegración radiactiva. Aquí  $T_{1/2}$  es tiempo de vida medio.

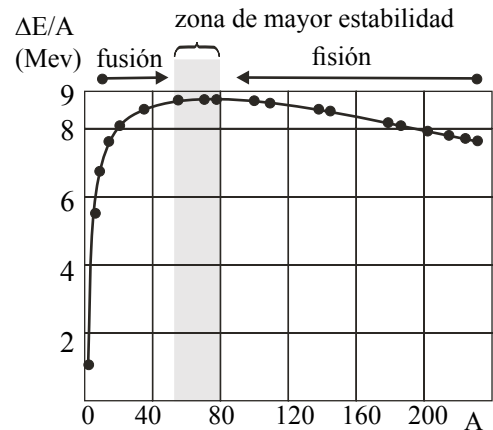
## Fisión nuclear

La **fisión nuclear consiste en la escisión de un núcleo pesado con la emisión de energía**. Esta energía puede ser millones de veces mayor que la que se desprende en un proceso químico de combustión. La más conocida es la del uranio, en la que se aprovecha la llamada reacción en cadena.

Por su parte, **la fusión nuclear consiste en unir dos núcleos ligeros**, por ejemplo, deuterio ( ${}_1\text{H}^2$ ) **con desprendimiento considerable de energía**. Este proceso sólo se ha logrado de forma descontrolada (bomba H) pero de lograrse de manera estable, es la fuente de energía perfecta para el futuro, por la ausencia de desechos radiactivos y las posibilidades infinitas de encontrar deuterio en el agua de mar.

La curva de energía de enlace por nucleón contra índice de masa muestra como estos procesos conllevan desprendimiento de energía.

La fusión de núcleos ligeros termina en una zona de núcleos estables, (entre ellos el hierro); al igual que la fisión de núcleos pesados.



Gráfica de energía de enlace/nucleón Vs índice de masa. Nótese que la fisión es más favorable entre núcleos ligeros, mientras que la fisión lo es en núcleos pesados.



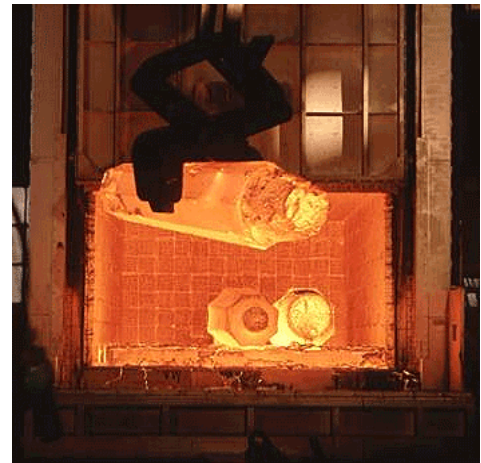
## TAREAS PROPUESTAS

### Radiación térmica

1) Recientemente se ha colocado en el mercado un termómetro infrarrojo para medir la temperatura de las personas, al colocarse en el oído. Investigue su funcionamiento.



2) Explique por qué cuando sobre una pared con una ventana incide la luz del sol, la observamos oscura.



3) Estime la temperatura de la superficie de un trozo de hierro al rojo vivo. ¿Por qué si la temperatura aumenta se observa blanco?

4) ¿Cómo medir la temperatura de fusión del cobre? Se tiene un filamento de cobre por el que puede circular corriente eléctrica y que se encuentra al vacío. Asuma que cuenta con los equipos necesarios para medir corriente y voltaje.

5) Diseñe un sistema de alarma antirrobo utilizando el efecto fotoeléctrico.

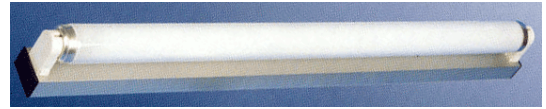
6) Un grave problema medioambiental es el calentamiento global. Explique.

### Cuantificación de la energía

7) Investigue acerca de las aplicaciones del láser en la medicina, la industria y la agricultura, etc.



8) La lámpara fluorescente es más eficiente desde el punto de vista energético. Explique su funcionamiento.



9) Investigue acerca de las aplicaciones de los Rayos X en la medicina.



### Dualidad onda corpúsculo de las partículas

10) Investigue acerca del microscopio electrónico y sus distintos tipos.



### Radiactividad

12) Un procedimiento para conocer la edad de restos fósiles es el método del carbono 14. Explique.



## Fisión nuclear:

13) Investigue acerca de los principios de fabricación de la mal llamada bomba atómica.



14) Explique cómo funciona el reactor de fisión a base de la reacción en cadena del uranio.



15) Una de las perspectivas de solución del problema energético es la reacción termonuclear controlada. Investigue el estado actual de esta propuesta.



## ANEXOS

Para complementar este material de estudio se anexan tres documentos que pueden resultar de utilidad al estudiante, a saber:

### **Pasos para la resolución de problemas**

Resolver problemas es una habilidad importante para el diseñador industrial. Contribuir al desarrollo de la misma es uno de los objetivos fundamentales de la asignatura, en particular, problemas de carácter cualitativo.

Los pasos que se proponen son suficientemente generales, por lo pueden ser aplicados a diversas situaciones “problémicas”.

### **Sistema de conocimientos**

Aquí se exponen los componentes del sistema de conocimientos de la asignatura, es decir, los conceptos, leyes y principios. Están agrupados de acuerdo a como se organizan los seminarios y siguiendo los epígrafes del texto.

### **Bibliografía general**

La elaboración de este material no niega la utilización de otros textos que enriquecen el estudio. Por el contrario, para la resolución de las tareas es necesario, en muchos casos, investigar en otras fuentes bibliográficas, que en este anexo se relacionan.

Para mayor facilidad, se han agrupado de acuerdo a su localización, en las instituciones más cercanas al ISDI, a fin de racionalizar el tiempo del estudiante.

Es conveniente aclarar que algunas tareas requieren de bibliografía aún más específica que no se recoge en el anexo, sino que queda a la orientación directa del profesor.

## Pasos para la resolución de problemas

**1. Comprensión del problema.** Se trata de entender el problema, comprender por qué funciona y por qué es un problema. Para ello se pueden ayudar de un gráfico o de un esquema. Hay que leer detenidamente el enunciado, si es factible, elaborar algunas hipótesis sobre posibles resultados.

**2. Elaborar una estrategia de solución.** Para ello hay que tener en cuenta los datos disponibles, tanto los que dan de forma explícita o los que podemos asumir del enunciado. Si existe una hipótesis, la misma nos sirve de guía hacia la posible solución. Relacionar todas las consideraciones bajo las cuales vamos a resolver el problema y con todo esto, trazar el camino a seguir para la resolución del problema.

**3. Solución del problema.** Se refiere a resolver el problema propiamente, donde quizá hay que resolver alguna ecuación o realizar algún paso matemático. También puede ser que se requiera buscar determinada información en un libro u otra fuente.

**4. Comprobación de los resultados.** Aquí va desde la Física hasta el sentido común. Hay que comprobar si el resultado corresponde a la hipótesis inicial (si la había), y si es compatible con las condiciones del problema.

A lo largo de estos 4 pasos hay una cuestión importante: **Hay que explicar y fundamentar cada paso.** En los exámenes aparecen errores que si esto se hubiera hecho no se hubiesen cometido. Además, no puede ser menos la forma de responder de un estudiante universitario.

Finalmente, es provechoso reflexionar sobre esta frase de Einstein: “Ningún científico piensa con fórmulas. Antes de que el físico comience a calcular, él debe tener en su cerebro el curso de los razonamientos. Estos últimos, en la mayoría de los casos, pueden ser expuestos en palabras sencillas. Los cálculos y las fórmulas constituyen el paso siguiente”

## SISTEMA DE CONOCIMIENTOS

### Mecánica

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Fuerzas	Suma y descomposición de fuerzas	Partícula, cuerpo rígido, cuerpo elástico, fuerza
Centro de gravedad	Principio de la inercia Ley de la dinámica de traslación Ley de acción y reacción	Posición, trayectoria, velocidad, aceleración, movimiento rectilíneo uniforme, movimiento rectilíneo uniformemente variado, inercia, masa, fuerza de gravedad, caída libre, peso, centro de gravedad, impesantez, par de fuerzas, momento del par
Movimiento lineal	Conservación del momento lineal	Momento lineal, impulso lineal, fuerzas internas, fuerzas internas, sistema cerrado
Movimiento de rotación	Ley de la dinámica de rotación Conservación del momento angular	Velocidad angular, aceleración angular, movimiento circular uniforme, movimiento circular uniformemente variado, fuerza centrípeta, momento de una fuerza, momento de inercia, momento angular, fuerza de inercia
Energía Mecánica	Teorema del trabajo y la energía Conservación de la energía mecánica	Trabajo mecánico, energía cinética, fuerzas conservativas, energía potencial, energía potencial gravitatoria, fuerza elástica, energía potencial elástica, energía mecánica

### Mecánica de los fluidos

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Hidrostática	Ley de Pascal Fórmula barométrica	Fluido, presión, densidad de masa, fluido incompresible, viscosidad, presión hidrostática, manómetro, presión atmosférica
Hidrostática	Principio de Arquímedes	Fuerza de empuje
Hidrodinámica	Ecuación de continuidad Ecuación de Bernoulli	Línea de corriente, régimen estacionario, turbulencia, gasto, movimiento del fluido viscoso
Fenómenos de superficie		Tensión superficial, energía de superficie, mojadura, capilaridad, ángulo de contacto, menisco

## Oscilaciones, Ondas y Termodinámica

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Oscilaciones	Ecuación del oscilador armónico simple	Fuerza recuperadora, elemento inercial, coeficiente de restitución, elongación, amplitud, frecuencia, período, fase, movimiento armónico simple, movimiento armónico amortiguado, movimiento armónico forzado, resonancia, oscilación automantenida.
Ondas mecánicas	Principio de superposición	Medio mecánico, onda mecánica, onda transversal, onda longitudinal, pulso, tren de ondas, frente de ondas, rayo, longitud de onda, velocidad de la onda, amplitud, frecuencia, período, número de onda, intensidad de la onda, interferencia, ondas estacionarias, nodos, antinodos, reflexión, refracción, difracción.
Acústica		Onda sonora, infrasonido, ultrasonido, velocidad del sonido, eco, onda de choque, cono de Mach, efecto Doppler acústico.
Propiedades térmicas	Ley cero de la Termodinámica Primer principio de la termodinámica	Sistema termodinámico, parámetros termodinámicos, temperatura, termómetro escala Celsius y Kelvin, dilatación térmica, coeficiente de dilatación térmica, energía interna, trabajo, calor, capacidad calorífica, calor específico, conducción del calor, conductibilidad térmica, convección, radiación.
Procesos Termodinámicos	Ecuación de estado del gas ideal Segundo Principio de la Termodinámica	Procesos adiabático, isobárico, isotérmico, isocórico, modelo del gas ideal, isothermas del gas ideal en gráficos PV, isothermas del gas real, transformaciones de fase vapor-líquido, presión de vapor, isoterma crítica, gráficos PT, punto crítico, procesos reversible, proceso irreversible, máquina térmica, máquina frigorífica.

## Electromagnetismo

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Electrostática	Ley de Coulomb Conservación de la carga Cuantificación de la carga	Carga eléctrica, fuerza eléctrica, conductor, aislante, campo eléctrico, líneas de fuerza, campo de una carga eléctrica, fuerza sobre una carga en un campo eléctrico, dipolo eléctrico, dieléctricos, polarización eléctrica, potencial eléctrico, trabajo del campo eléctrico, superficie equipotencial, condensador, capacidad eléctrica, densidad de energía eléctrica.
Corriente eléctrica	Ley de Ohm Ley de Poullotte Ley de Joule- Lenz	Intensidad y densidad de la corriente eléctrica, corriente directa, corriente alterna, conductor eléctrico, resistencia eléctrica, resistividad, conductividad circuito eléctrico, fuerza electromotriz, potencia eléctrica.
Campo magnético		Campo magnético, inducción magnética, fuerza sobre una carga en movimiento, fuerza de Lorente, fuerza sobre un conductor con corriente, momento magnético, momento de una espira con corriente, campo magnético debido a un conductor con corriente, líneas de inducción magnética, campo de un solenoide, ferromagnetismo.
Inducción electromagnética	Ley de inducción de Faraday Regla de Lenz	Inducción electromagnética, flujo magnético, corriente inducida, FEM inducida, corrientes parásitas, inductancia, densidad de energía magnética.
Ondas electromagnéticas		Oscilaciones electromagnética, circuito eléctrico oscilante, onda electromagnética, velocidad de la luz, efecto Doppler, espectro electromagnético, rayos infrarrojos, rayos ultravioleta.



## Óptica

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Reflexión	Ley de la reflexión	Rayo de luz, índice de refracción, dióptrico, reflexión, ángulo de reflexión, reflexión difusa, espejos planos, objeto, imagen virtual y real.
Refracción	Ley de la refracción	Refracción, ángulo de refracción, lentes, lentes delgadas, foco, objeto, imagen virtual y real, aumento lentes convergentes y divergentes, aberraciones.
Reflexión total		Reflexión total, ángulo límite.
Polarización	Ley de Malus Ley de Brewster	Polarización lineal, birrefringencia, dicroísmo, polarización por reflexión, interferencia, interferencia en láminas delgadas, monocromaticidad, coherencia, difracción, difusión, absorción, dispersión, poder separador de un instrumento óptico.
Actividad óptica		Actividad óptica, poder rotatorio.

## Física moderna

Epígrafe	Leyes y principios	Conceptos y magnitudes
Radiación térmica	Ley de Stefan Boltzman Ley de Desplazamiento de Wien Ley del efecto fotoeléctrico	Radiación térmica, radiación espectral, cuerpo negro, radiación integral, cuanto de energía, efecto fotoeléctrico, fotón, dualidad onda corpúsculo de la luz.
Cuantificación de la energía	Principio de exclusión de Pauli	Átomo, núcleo atómico, espectros atómicos, cuantificación de la energía, electrón, rayos X.
Dualidad onda corpúsculo	Relación de De Broglie	Dualidad onda corpúsculo de las partículas.
Radiactividad natural	Reglas de desplazamiento Ley de desintegración radiactiva	Protón, positrón, fuerza nuclear, defecto de masa, energía de enlace, radiactividad $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ , constante de desintegración, tiempo de vida media, actividad nuclear.
Fisión nuclear		Fisión nuclear, fusión nuclear .

## BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ALONSO M, ACOSTA V.: Introducción a la Física, Cultural SA, La Habana, 1960.
- Cómo funcionan las cosas, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1979
- Cutnell J. et al: Physics, John Wiley and sons, 1995
- Enciclopedia Salvat “Como Funciona”, Barcelona, 1985.
- Enciclopedia World of invention, Mac Graw Hill, EE UU, 1999
- Fishbane et al: Physics for scientist and engineers, Prentice Hill, New Jersey, 1993
- FRISH, TIMOREVA,: Física General, Editorial Mir, 1969
- Giancoli D. Physics, principles with applications, Prentice Hill, New Jersey, 1999
- GRAN M. F.: Elementos de Física, Edición Revolucionaria, La Habana, 1974
- PERELMAN Y.: Física recreativa, Editorial Mir, Moscú, 1985.
- RESNICK R. y HALLIDAY D.: Física para estudiantes de Ciencia e Ingeniería, Edición Revolucionaria, La Habana, 1974.
- SEARS F. W.: Fundamentos de Física, Edición Revolucionaria, La Habana, 1967.
- TIPPENS P.: Física, conceptos y aplicaciones, Mac Graw Hill, México, 1993.
- WILSON J.: Física con aplicaciones, Editorial Interamericana, 1985.
- Yavorsky B. M., Pinski A. K.: Fundamentos de Física, Editorial Mir, Moscú, 1983
- ZEBROWSKI E.: Física: un enfoque para técnicos, Editorial Calipso, 1984.

### CD ROM

- Ciencia de los materiales, EDUMAT, 1997
- Cómo funcionan las cosas, Z Multimedia, 1995
- Halliday et al: Fundamentals of Physics, 1994
- Microsoft, Enciclopedia Encarta, 2005