

LIBRO DE TEXTO CIENCIAS

FÍSICA

Autor/Compilador:

Claudia Núñez González

PhD. Biomedicina, Universidad de Alcalá, España

Producto realizado con fondos públicos de proyecto FIAC-MECESUP 1102 ejecutado por el Instituto Profesional Providencia (www.ipp.cl)



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Tabla de contenido

CONVERSIÓN DE UNIDADES Y REDONDEO (CIFRAS SIGNIFICATIVAS)	5
DIMENSIONES FUNDAMENTALES Y DERIVADAS.....	5
SISTEMAS DE UNIDADES	5
SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES O SI.....	6
CONVERSIONES DE UNIDADES.....	7
FACTOR DE CONVERSIÓN.....	7
PRECISIÓN	7
CIFRAS SIGNIFICATIVAS.....	8
NOTACIÓN CIENTÍFICA.....	8
CANTIDADES VECTORIALES Y ESCALARES.....	9
CLASIFICACIÓN DE VECTORES.....	11
COMPONENTES DE UN VECTOR.....	11
OPERACIONES CON VECTORES	13
MECÁNICA.....	17
MECÁNICA CLÁSICA	17
MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS	18
MECÁNICA ESTADÍSTICA	19
MECÁNICA RELATIVISTA	19
MECÁNICA CUÁNTICA.....	21
MECÁNICA CUÁNTICA RELATIVISTA.....	22
ESTÁTICA DE LA PARTÍCULA.....	22
DEFINICIONES FUNDAMENTALES	23
RESULTANTE DE FUERZAS COPLANARES	24
DESCOMPOSICIÓN DE UNA FUERZA EN SUS COMPONENTES RECTANGULARES: EN EL PLANO Y EN EL ESPACIO	27
EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA: EN EL PLANO Y EN EL ESPACIO	27
CUERPO RÍGIDO Y PRINCIPIOS DE TRANSMISIBILIDAD.....	28
CINEMÁTICA.....	32
ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CINEMÁTICA.....	32
FUNDAMENTO DE LA CINEMÁTICA CLÁSICA.....	33
SISTEMAS DE COORDENADAS.....	34
REGISTRO DEL MOVIMIENTO.....	35

MOVIMIENTO CIRCULAR.....	40
MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME.....	41
MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORMEMENTE ACELERADO	42
DINÁMICA	42
CÁLCULO EN DINÁMICA.....	43
LEYES DE CONSERVACIÓN.....	43
ECUACIONES DE MOVIMIENTO.....	44
DINÁMICA DE SISTEMAS MECÁNICOS	45
DINÁMICA DE LA PARTÍCULA	45
DINÁMICA DEL SÓLIDO RÍGIDO.....	46
CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA DINÁMICA	46
TRABAJO.....	48
EL TRABAJO EN LA MECÁNICA.....	49
EL TRABAJO EN LA TERMODINÁMICA.....	51
ENERGÍA.....	53
EL CONCEPTO DE ENERGÍA EN FÍSICA.....	53
EXPRESIÓN MATEMÁTICA.....	54
FÍSICA CLÁSICA.....	55
FÍSICA RELATIVISTA.....	56
FÍSICA CUÁNTICA	56
ENERGÍA POTENCIAL.....	57
ENERGÍA CINÉTICA DE UNA MASA PUNTUAL	58
TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA	59
UNIDADES DE MEDIDA DE ENERGÍA	59
ENERGÍA CINÉTICA	60
ENERGÍA CINÉTICA EN MECÁNICA CLÁSICA.....	61
ENERGÍA POTENCIAL.....	62
ELECTRICIDAD	69
CONCEPTOS.....	70
PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES.....	76
ORIGEN MICROSCÓPICO	76
CONDUCTIVIDAD Y RESISTIVIDAD.....	76
CARGA ELÉCTRICA.....	78

NATURALEZA DE LA CARGA	79
PROPIEDADES DE LAS CARGAS.....	80
PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA CARGA	80
LEY DE COULOMB.....	97
DESARROLLO DE LA LEY	97
ENUNCIADO DE LA LEY	98
CONSTANTE DE COULOMB	100
POTENCIAL DE COULOMB.....	100
POTENCIAL ELÉCTRICO	101
TRABAJO ELÉCTRICO Y ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA	102
DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICO	104
CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME.....	107
CAMPO ELÉCTRICO NO UNIFORME	109
CORRIENTE ELÉCTRICA	111
Ley de Ohm	118
Magnetismo	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

CONVERSIÓN DE UNIDADES Y REDONDEO (CIFRAS SIGNIFICATIVAS)

DIMENSIONES FUNDAMENTALES Y DERIVADAS

El Sistema Internacional de Unidades se basa en dos tipos de magnitudes físicas, las siete que toma como fundamentales son: longitud, tiempo, masa, intensidad de corriente eléctrica, temperatura, cantidad de sustancia, intensidad luminosa.

Una vez definidas las magnitudes que se consideran básicas, las demás resultan derivadas y se pueden expresar como combinación de las primeras. Las unidades derivadas más frecuentes son: superficie, volumen, velocidad, aceleración, densidad, frecuencia, periodo, fuerza, presión, trabajo, calor, energía, potencia, carga eléctrica, diferencia de potencial, potencial eléctrico, resistencia eléctrica, etc.

SISTEMAS DE UNIDADES

Un sistema de unidades es un conjunto consistente de unidades de medida. Definen un conjunto básico de unidades de medida a partir del cual se derivan el resto. Existen varios sistemas de unidades:

- Sistema Internacional de Unidades o SI: Es el sistema más utilizado. Sus unidades básicas son: el metro, el kilogramo, el segundo, el ampere, el kelvin, la candela y el mol.
- Sistema Métrico Decimal: Primer sistema unificado de medidas.
- Sistema Cegesimal o CGS: Denominado así porque sus unidades básicas son el centímetro, el gramo y el segundo.
- Sistema Técnico de Unidades: Derivado del sistema métrico con unidades del anterior, actualmente este sistema está en desuso.

- Sistema Inglés: Aún utilizado en los países anglosajones, principalmente Estados Unidos. Muchos de ellos lo están intentando reemplazar por el Sistema Internacional de Unidades.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES O SI

El Sistema Internacional de Unidades (abreviado SI del francés: *Le Système International d'Unités*), también denominado Sistema Internacional de Medidas, es el nombre que recibe el sistema de unidades que se usa en la mayoría de los países y es la forma actual del sistema métrico decimal. El SI también es conocido como sistema métrico, especialmente en las naciones en las que aún no se ha implantado para su uso cotidiano. Fue creado en 1960 por la Conferencia General de Pesos y Medidas, que inicialmente definió seis unidades físicas básicas. En 1971 se añadió la séptima unidad básica, el mol.

Una de las principales características, que constituye la gran ventaja del SI, es que sus unidades están basadas en fenómenos físicos fundamentales. La única excepción es la unidad de la magnitud masa, el kilogramo, que está definida como la masa del prototipo internacional del kilogramo o aquel cilindro de platino e iridio almacenado en una caja fuerte de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas.

Las unidades del SI son la referencia internacional de las indicaciones de los instrumentos de medida y a las que están referidas a través de una cadena ininterrumpida de calibraciones o comparaciones. Esto permite alcanzar la equivalencia de las medidas realizadas por instrumentos similares, utilizados y calibrados en lugares apartados y por ende asegurar, sin la necesidad de ensayos y mediciones duplicadas, el cumplimiento de las características de los objetos que circulan en el comercio internacional y su intercambiabilidad.

CONVERSIONES DE UNIDADES

La conversión de unidades es la transformación de una unidad en otra. Un método para realizar este proceso es con el uso de los factores de conversión y las muy útiles tablas de conversión. Bastaría multiplicar una fracción (factor de conversión) y el resultado es otra medida equivalente en la que han cambiado las unidades.

Cuando el cambio de unidades implica la transformación de varias unidades se pueden utilizar varios factores de conversión uno tras otro, de forma que el resultado final será la medida equivalente en las unidades que buscamos, por ejemplo si queremos pasar 8 metros a yardas, lo único que tenemos que hacer es multiplicar $8(0.914 \text{ yd}) = 7.312 \text{ yd}$.

FACTOR DE CONVERSIÓN

El factor de conversión es una fracción en la que el numerador y el denominador son medidas iguales expresadas en unidades distintas, de tal manera, que esta fracción vale la unidad. Método efectivo para cambio de unidades y resolución de ejercicios sencillos dejando de utilizar la regla de tres.

PRECISIÓN

Se denomina precisión a la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo. No debe confundirse con exactitud ni con reproducibilidad.

La precisión es un parámetro relevante, especialmente en la investigación de fenómenos físicos, ámbito en el cual los resultados se expresan como un número más una indicación del error máximo estimado para la magnitud. Es decir, se indica una zona dentro de la cual está comprendido el verdadero valor de la magnitud.

CIFRAS SIGNIFICATIVAS

Son aquellas que tienen significado real o aportan alguna información. Las cifras no significativas aparecen como resultado de los cálculos y no tienen significado alguno. Las cifras significativas de un número vienen determinadas por su error. Son cifras significativas aquellas que ocupan una posición igual o superior al orden o posición del error.

Por ejemplo, consideremos una medida de longitud que arroja un valor de 5432.4764 m con un error de 0.8 m. El error es por tanto del orden de décimas de metro. Es evidente que todas las cifras del número que ocupan una posición menor que las décimas no aportan ninguna información. En efecto, ¿qué sentido tiene dar el número con precisión de diezmilésimas si afirmamos que el error es de casi 1 metro? Las cifras significativas en el número serán por tanto las que ocupan la posición de las décimas, unidades, decenas, etc., pero no las centésimas, milésimas y diezmilésimas.

Cuando se expresa un número debe evitarse siempre la utilización de cifras no significativas, puesto que puede suponer una fuente de confusión. Los números deben redondearse de forma que contengan solo cifras significativas. Se llama redondeo al proceso de eliminación de cifras no significativas de un número.

NOTACIÓN CIENTÍFICA

La notación científica (o notación índice estándar) es un modo conciso de representar un número utilizando potencias de base diez. Los números se escriben como un producto: $a \times 10^k$, (siendo a un número mayor o igual que 1 y menor que 10, y k un número entero). Esta notación se utiliza para poder expresar más fácilmente números muy grandes o demasiado pequeños. La notación científica utiliza un sistema llamado coma flotante, o de punto flotante en países de habla inglesa y en algunos hispanos hablantes.

$$10^0 = 1$$

$$10^1 = 10$$

$$10^2 = 100$$

$$10^3 = 1000$$

$$10^4 = 10000$$

$$10^5 = 100000$$

$$10^6 = 1000000$$

$$10^9 = 1000000000$$

$$10^{10} = 10000000000$$

$$10^{20} = 100000000000000000000$$

$$10^{30} = 1000000000000000000000000000000$$

CANTIDADES VECTORIALES Y ESCALARES

Frente a aquellas magnitudes físicas, tales como la masa, la presión, el volumen, la energía, la temperatura, etc; que quedan completamente definidas por un número y las unidades utilizadas en su medida, aparecen otras, tales como el desplazamiento, la velocidad, la aceleración, la fuerza, el campo eléctrico, etc., que no quedan completamente definidas dando un dato numérico, sino que llevan asociadas una dirección. Estas últimas magnitudes son llamadas vectoriales en contraposición a las primeras llamadas escalares.

Las magnitudes escalares quedan representadas por el ente matemático más simple; por un número. Las magnitudes vectoriales quedan representadas por un ente matemático que recibe el nombre de vector. En un espacio euclidiano, de no más de tres dimensiones, un vector se representa por un segmento orientado. Así, un vector queda caracterizado por los siguientes elementos: su longitud o módulo, siempre positivo por definición, y su dirección, la cual puede ser representada mediante la suma de sus componentes vectoriales ortogonales, paralelas a los ejes de coordenadas; o mediante coordenadas polares, que determinan el ángulo que forma el vector con los ejes positivos de coordenadas.

Se representa como un segmento orientado, con una dirección, dibujado de forma similar a una flecha. Su longitud representa el módulo del vector y la punta de flecha indica su dirección.

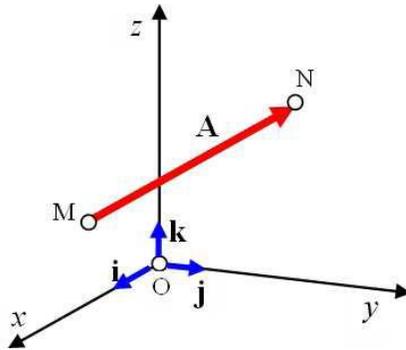


Figura 1. Representación gráfica de una magnitud vectorial, con indicación de su punto de aplicación y de los versores cartesianos. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglfm01sn_vector.jpg

Las magnitudes vectoriales se representan en los textos impresos por letras en negrita, para diferenciarlas de las magnitudes escalares que se representan en cursiva. En los textos manuscritos, las magnitudes vectoriales se representan colocando una flecha sobre la letra que designa su módulo (el cual es un escalar).

Ejemplos: \mathbf{A} , \mathbf{a} , $\boldsymbol{\omega}$,

Representan, respectivamente, las magnitudes vectoriales de módulos $|\mathbf{A}|$, $|\mathbf{a}|$, $|\boldsymbol{\omega}|$, . . .

El módulo de una magnitud vectorial también se representa encerrando entre barras la notación correspondiente al vector: $|\mathbf{A}|$, $|\mathbf{a}|$, $|\boldsymbol{\omega}|$. En los textos manuscritos se escribe: \overrightarrow{A} , \overrightarrow{a} , $\overrightarrow{\omega}$, para los vectores y $|\overrightarrow{A}|$, $|\overrightarrow{a}|$, $|\overrightarrow{\omega}|$ para los módulos.

Cuando convenga, se representan la magnitud vectorial haciendo referencia al origen y al extremo del segmento orientado que la representa geoméricamente, resultando muy útil esta notación para los vectores que representan el desplazamiento.

Además de estas convenciones los vectores unitarios o versores, cuyo módulo es la unidad, se representan frecuentemente con un circunflejo encima

CLASIFICACIÓN DE VECTORES

Según los criterios que se utilicen para determinar la igualdad o equipolencia de dos vectores, pueden distinguirse distintos tipos de los mismos:

- Vectores libres: no están aplicados en ningún punto en particular.
- Vectores deslizantes: su punto de aplicación puede deslizarse a lo largo de su recta de acción.
- Vectores fijos o ligados: están aplicados en un punto en particular.

Podemos referirnos también a:

- Vectores unitarios: vectores de módulo unidad.
- Vectores concurrentes o angulares: son aquellas cuyas direcciones o líneas de acción pasan por un mismo punto. También se les suele llamar angulares por que forman un ángulo entre ellas.
- Vectores opuestos: vectores de igual magnitud, pero dirección contraria.
- Vectores colineales: los vectores que comparten una misma recta de acción.
- Vectores paralelos: si sobre un cuerpo rígido actúan dos o más fuerzas cuyas líneas de acción son paralelas.
- Vectores coplanarios: los vectores cuyas rectas de acción son coplanarias (situadas en un mismo plano).
-

COMPONENTES DE UN VECTOR

Un vector en el espacio se puede expresar como una combinación lineal de tres vectores unitarios o versores perpendiculares entre sí que constituyen una base vectorial.

En coordenadas cartesianas, los vectores unitarios se representan por i, j, k , paralelos a los ejes de coordenadas x, y, z positivos. Las componentes del vector en una base vectorial predeterminada pueden escribirse entre paréntesis y separadas con comas: $a = (a_x, a_y, a_z)$

O expresarse como una combinación de los vectores unitarios definidos en la base vectorial. Así, en un sistema de coordenadas cartesiano, será $\mathbf{a} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$

Estas representaciones son equivalentes entre sí, y los valores a_x , a_y , a_z , son las componentes de un vector que, salvo que se indique lo contrario, son números reales.

Una representación conveniente de las magnitudes vectoriales es mediante un vector columna o un vector fila, particularmente cuando están implicadas operaciones matrices (tales como el cambio de base), del modo siguiente:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{a}^\dagger = [a_x \ a_y \ a_z]$$

Con esta notación, los vectores cartesianos quedan expresados en la forma: $\mathbf{i} = [1 \ 0 \ 0]$, $\mathbf{j} = [0 \ 1 \ 0]$, $\mathbf{k} = [0 \ 0 \ 1]$

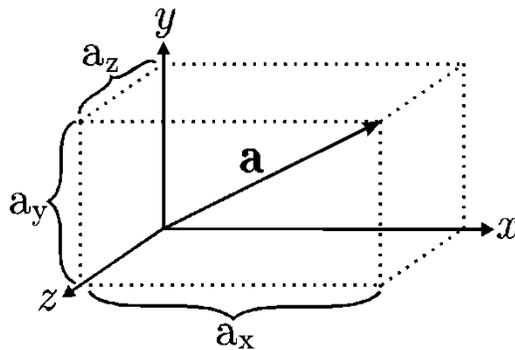


Figura 2. Componentes de un vector. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vector1.png>

OPERACIONES CON VECTORES

Suma De Vectores

Para sumar dos vectores libres (vector y vector) se escogen como representantes dos vectores tales que el extremo final de uno coincida con el extremo origen del otro vector.

Método del paralelogramo

Este método permite solamente sumar vectores de a pares. Consiste en disponer gráficamente los dos vectores de manera que los orígenes de ambos coincidan en un punto, trazando rectas paralelas a cada uno de los vectores, en el extremo del otro y de igual longitud, formando así un paralelogramo. El resultado de la suma es la diagonal de dicho paralelogramo que parte del origen común de ambos vectores.

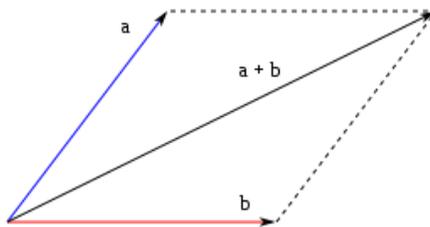


Figura 3. Método del paralelogramo. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vectoren_optellen.svg

Método del triángulo

Consiste en disponer gráficamente un vector a continuación de otro; es decir, el origen de cada uno de los vectores se lleva sobre el extremo del otro. El vector resultante es aquél que nace en el origen del primer vector y termina en el extremo del último.

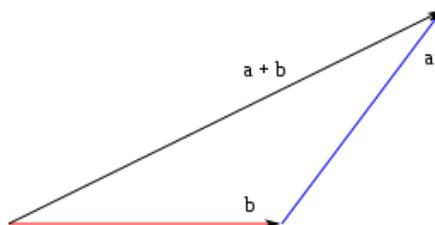


Figura 4. Método del triángulo. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vectoren_optellen_2.svg

Método analítico para la suma y diferencia de vectores

Dados dos vectores libres,

$$\mathbf{a} = (a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k})$$

$$\mathbf{b} = (b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k})$$

El resultado de su suma o de su diferencia se expresa en la forma

$$\mathbf{a} \pm \mathbf{b} = (a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}) \pm (b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k})$$

y ordenando las componentes,

$$\mathbf{a} \pm \mathbf{b} = (a_x \pm b_x)\mathbf{i} + (a_y \pm b_y)\mathbf{j} + (a_z \pm b_z)\mathbf{k}$$

Con la notación matricial sería

$$\mathbf{a} \pm \mathbf{b} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \pm \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \pm b_x \\ a_y \pm b_y \\ a_z \pm b_z \end{bmatrix}$$

Conocidos los módulos de dos vectores dados, a y b , así como el ángulo θ que forman entre sí, el módulo de $\mathbf{a} \pm \mathbf{b}$ es:

$$|\mathbf{a} \pm \mathbf{b}| = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab\cos\theta}$$

Producto de un vector por un escalar

El producto de un vector por un escalar es otro vector cuyo módulo es el producto del escalar por el módulo del vector, cuya dirección es igual a la del vector, o contraria a esta si el escalar es negativo. Partiendo de la representación gráfica del vector, sobre la misma línea de su dirección tomamos tantas veces el módulo de vector como indica el escalar. Sean p un escalar y \mathbf{a} un vector, el producto de p por \mathbf{a} se representa $p \mathbf{a}$ y se realiza multiplicando cada una de las componentes del vector por el escalar; esto es,

$$p \mathbf{a} = p a_x \mathbf{i} + p a_y \mathbf{j} + p a_z \mathbf{k}$$

Con la notación matricial sería

$$p \mathbf{a} = p \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p a_x \\ p a_y \\ p a_z \end{bmatrix}$$

Producto escalar

El producto escalar de dos vectores en un espacio euclídeo se define como el producto de sus módulos por el coseno del ángulo que forman.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}||\mathbf{B}| \cos\theta = AB \cos\theta$$

Esta definición de carácter geométrico es independiente del sistema de coordenadas elegido y por lo tanto de la base del espacio vectorial escogida.

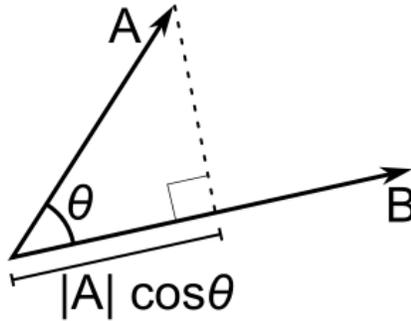


Figura 5. Producto escalar. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dot_Product.svg

Producto vectorial

Sean dos vectores a y b en el espacio vectorial \mathbb{R}^3 . El producto vectorial entre a y b da como resultado un nuevo vector c . Para definir este nuevo vector es necesario especificar su módulo y dirección:

El módulo de c está dado por: $c = a b \sin \theta$

donde θ es el ángulo determinado por los vectores a y b .

La dirección del vector c , que es ortogonal a a y ortogonal a b , está dada por la regla de la mano derecha. El producto vectorial entre a y b se denota mediante $a \times b$, por ello se lo llama también producto cruz.

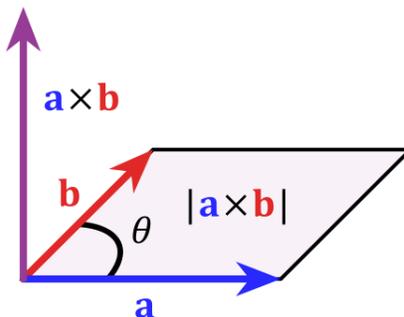


Figura 6. Producto vectorial. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cross_product_parallelogram.svg

MECÁNICA

La mecánica es la rama de la física que estudia y analiza el movimiento y reposo de los cuerpos, y su evolución en el tiempo, bajo la acción de fuerzas. Modernamente la mecánica incluye la evolución de sistemas físicos más generales que los cuerpos másicos. En ese enfoque la mecánica estudia también las ecuaciones de evolución temporal de sistemas físicos como los campos electromagnéticos o los sistemas cuánticos donde propiamente no es correcto hablar de cuerpos físicos.

El conjunto de disciplinas que abarca la mecánica convencional es muy amplio y es posible agruparlas en cuatro bloques principales:

- Mecánica clásica
- Mecánica cuántica
- Mecánica relativista
- Teoría cuántica de campos

La mecánica es una ciencia perteneciente a la física, ya que los fenómenos que estudia son físicos, por ello está relacionada con las matemáticas. Sin embargo, también puede relacionarse con la ingeniería, en un modo menos riguroso.

MECÁNICA CLÁSICA

La mecánica clásica está formada por áreas de estudio que van desde la mecánica del sólido rígido y otros sistemas mecánicos con un número finito de grados de libertad, a sistemas como la mecánica de medios continuos (sistemas con infinitos grados de libertad). Existen dos formulaciones diferentes, que difieren en el grado de formalización para los sistemas con un número finito de grados de libertad:

- Mecánica newtoniana. Dio origen a las demás disciplinas y se divide en varias de ellas: la cinemática, estudio del movimiento en sí, sin atender a las causas que lo

originan; la estática, que estudia el equilibrio entre fuerzas y la dinámica que es el estudio del movimiento atendiendo a sus orígenes, las fuerzas.

- Mecánica analítica, una formulación matemática muy potente de la mecánica newtoniana basada en el principio de Hamilton, que emplea el formalismo de variedades diferenciables, en concreto el espacio de configuración y el espacio fásico. Aplicados al espacio euclídeo tridimensional y a sistemas de referencia inerciales, las tres formulaciones son básicamente equivalentes.

Los supuestos básicos que caracterizan a la mecánica clásica son:

Predictibilidad teóricamente infinita, matemáticamente si en un determinado instante se conociera (con precisión infinita) las posiciones y velocidades de un sistema finito de N partículas teóricamente pueden ser conocidas las posiciones y velocidades futuras, ya que en principio existen las funciones vectoriales $\{\vec{r}_i = \vec{r}_i(t; \vec{r}_i^{(0)}, \vec{v}_i^{(0)})\}_{i=1}^N$ que proporcionan las posiciones de las partículas en cualquier instante de tiempo. Estas funciones se obtienen de unas ecuaciones generales denominadas ecuaciones de movimiento que se manifiestan de forma diferencial relacionando magnitudes y sus derivadas. Las funciones $\{\vec{r}_i(t)\}_{i=1}^N$ se obtienen por integración, una vez conocida la naturaleza física del problema y las condiciones iniciales.

Existen otras áreas de la mecánica que cubren diversos campos aunque no tienen carácter global. No forman un núcleo fuerte para considerarse como disciplina: Mecánica de medios continuos y Mecánica estadística.

MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS

La mecánica de medios continuos trata de cuerpos materiales extensos deformables y que no pueden ser tratados como sistemas con un número finito de grados de libertad. Esta parte de la mecánica trata a su vez de:

- La mecánica de sólidos deformables, que considera los fenómenos de la elasticidad, la plasticidad, la viscoelasticidad, etc.
- La mecánica de fluidos, que comprende un conjunto de teorías parciales como la hidráulica, la hidrostática o fluidoestática y la hidrodinámica o fluidodinámica. Dentro del estudio de los flujos se distingue entre flujo compresible y flujo incompresible. Si se atiende a los fluidos de acuerdo a su ecuación constitutiva, se tienen fluidos perfectos, fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.
- La acústica, la mecánica ondulatoria clásica.

MECÁNICA ESTADÍSTICA

La mecánica estadística trata de sistemas con muchas partículas y que por tanto tienen un número elevado de grados de libertad, al punto que no resulta posible escribir todas las ecuaciones de movimiento involucradas y, en su defecto, trata de resolver aspectos parciales del sistema por métodos estadísticos que dan información útil del comportamiento global del sistema sin especificar qué sucede con cada partícula del sistema. Los resultados obtenidos coinciden con los resultados de la termodinámica. Usa tanto formulaciones de la mecánica hamiltoniana como formulaciones de la teoría de probabilidad. Existen estudios de mecánica estadística basados tanto en la mecánica clásica como en la mecánica cuántica.

MECÁNICA RELATIVISTA

La mecánica relativista o teoría de la relatividad comprende:

- La Teoría de la relatividad especial, que describe adecuadamente el comportamiento clásico de los cuerpos que se mueven a grandes velocidades en un espacio-tiempo plano (no-curvado).
- La Teoría general de la relatividad, que generaliza la anterior describiendo el movimiento en espacios-tiempo curvados, además de englobar una teoría relativista de la gravitación que generaliza la teoría de la gravitación de Newton.

Existen varias propiedades interesantes de la dinámica relativista, entre ellas:

- La fuerza y la aceleración no son en general vectores paralelos en una trayectoria curva, ya que la relación entre la aceleración y la fuerza tangenciales es diferente que la que existe entre la aceleración y fuerza normales. Tampoco la razón entre el módulo de la fuerza y el módulo de la aceleración es constante, ya que en ella aparece el inverso del factor de Lorentz, que es decreciente con la velocidad, llegando a ser nulo a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.
- El intervalo de tiempo medido por diferentes observadores en movimiento relativo no coincide, por lo que no existe un tiempo absoluto, y no puede establecerse un presente común a todos los observadores, aunque se mantienen relaciones de causalidad estrictas.
- Otro hecho interesante de la mecánica relativista es que elimina la acción a distancia. Las fuerzas que experimenta una partícula en el campo gravitatorio o electromagnético provocado por otras partículas depende de la posición de las partículas en un instante anterior, siendo el "retraso" en la influencia que ejercen unas partículas sobre otras del orden de la distancia dividida entre la velocidad de la luz:

$$\Delta t \approx \frac{d}{c}$$

MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica trata con sistemas mecánicos de pequeña escala o con energía muy pequeñas (y ocasionalmente sistemas macroscópicos que exhiben cuantización de alguna magnitud física). En esos casos los supuestos de la mecánica clásica no son adecuados. En particular el principio de determinación por el cual el estado futuro del sistema depende por completo del estado actual no parece ser válido, por lo que los sistemas pueden evolucionar en ciertos momentos de manera no determinista, ya que las ecuaciones para la función de onda de la mecánica cuántica no permiten predecir el estado del sistema después de una medida concreta, asunto conocido como problema de la medida. Sin embargo, el determinismo también está presente porque entre dos medidas filtrantes el sistema evoluciona de manera determinista de acuerdo con la ecuación de Schrödinger.

La evolución no determinista y las medidas sobre un sistema, están regidas por un enfoque probabilístico. En mecánica cuántica este enfoque probabilístico, lleva por ejemplo en el enfoque más común a renunciar al concepto de trayectoria de una partícula. Peor aún el concepto la interpretación de Copenhague renuncia por completo a la idea de que las partículas ocupen un lugar concreto y determinado en el espacio-tiempo. La estructura interna de algunos sistemas físicos de interés como los átomos o las moléculas solo pueden ser explicados mediante un tratamiento cuántico, ya que la mecánica clásica hace predicciones sobre dichos sistemas que contradicen la evidencia física. En ese sentido la mecánica cuántica se considera una teoría más exacta o más fundamental que la mecánica clásica que actualmente sólo se considera una simplificación conveniente de la mecánica cuántica para cuerpos macroscópicos.

También existe una mecánica estadística cuántica que incorpora restricciones cuánticas en el tratamiento de los agregados de partículas.

MECÁNICA CUÁNTICA RELATIVISTA

La mecánica cuántica relativista trata de aunar mecánica relativista y mecánica cuántica, aunque el desarrollo de esta teoría lleva a la conclusión de que en un sistema cuántico relativista el número de partículas no se conserva y de hecho no puede hablarse de una mecánica de partículas, sino simplemente de una teoría cuántica de campos. Esta teoría logra aunar principios cuánticos y teoría de la relatividad especial (aunque no logra incorporar los principios de la relatividad general). Dentro de esta teoría, no se consideran los estados de las partículas sino del espacio-tiempo. De hecho cada uno de los estados cuánticos posibles del espacio tiempo viene caracterizado por el número de partículas de cada tipo representadas por campos cuánticos y las propiedades de dichos campos.

Es decir, un universo donde existan N_i partículas del tipo i en los estados cuánticos E_1, \dots, E_{N_i} representa un estado cuántico diferente de otro estado en el que observamos en mismo universo con un número diferente de partículas. Pero ambos, "estados" o aspectos del universo son dos de los posibles estados cuánticos físicamente realizables del espacio-tiempo. De hecho la noción de partícula cuántica es abandonada en la teoría cuántica de campos, y esta noción se substituye por la de campo cuántico. Un campo cuántico es una aplicación que asigna a una función suave sobre una región del espacio-tiempo un operador autoadjunto. La función suave representa la región donde se mide el campo, y los valores propios del operador número asociado al campo el número de partículas observables a la hora de realizar una medida de dicho campo.

ESTÁTICA DE LA PARTÍCULA

La estática es la parte de la mecánica que estudia el equilibrio de fuerzas, sobre un cuerpo en reposo. Es la rama de la mecánica que analiza las cargas (fuerza, par / momento) en los sistemas físicos en equilibrio estático, es decir en un estado en el que las posiciones relativas de los subsistemas no varían con el tiempo. Por la primera ley de Newton, esta situación implica que la red de la fuerza y el par neto (también conocido como momento de la fuerza) de cada organismo en el sistema es igual a cero. De esta limitación, las cantidades

como la carga o la presión pueden ser derivadas. La red de fuerzas de igual a cero se conoce como la primera condición de equilibrio, y el par neto igual a cero se conoce como la segunda condición de equilibrio.

La estática proporciona, mediante el empleo de la mecánica del sólido rígido, solución a los problemas denominados isostáticos. En estos problemas, es suficiente plantear las condiciones básicas de equilibrio, que son:

1. El resultado de la suma de fuerzas es nulo.
2. El resultado de la suma de momentos respecto a un punto es nulo.

Estas dos condiciones, mediante el álgebra vectorial, se convierten en un sistema de ecuaciones; la resolución de este sistema de ecuaciones, es resolver la condición de equilibrio. Existen métodos de resolución de este tipo de problemas estáticos mediante gráficos, heredados de los tiempos en que la complejidad de la resolución de sistemas de ecuaciones se evitaba mediante la geometría, si bien actualmente se tiende al cálculo por ordenador.

DEFINICIONES FUNDAMENTALES

- Fuerza: Magnitud vectorial capaz de deformar los cuerpos (efecto estático), modificar su velocidad o vencer su inercia y ponerlos en movimiento si estaban inmóviles. Suele ser común hablar de la fuerza aplicada sobre un objeto, sin tener en cuenta al otro objeto con el que está interactuando; en este sentido la fuerza puede definirse como toda acción o influencia capaz de modificar el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo (imprimiéndole una aceleración que modifica el módulo, dirección, o sentido de su velocidad), o bien de deformarlo.
- Partícula: Una partícula posee masa pero de tamaño poco significativo. Por ejemplo, el tamaño de la Tierra es insignificante comparado con el tamaño de su órbita, y por lo tanto la Tierra se puede tomar como una partícula cuando se estudia su

movimiento orbital en un modelo. Cuando un cuerpo se idealiza como una partícula, los principios de la Mecánica se simplifican de manera importante, debido a que la geometría del cuerpo no se tomará en cuenta en el análisis del problema.

- **Cuerpo Rígido:** Un cuerpo rígido puede ser considerado como un conjunto formado por un gran número de partículas que permanecen separadas entre sí por una distancia fija antes y después de aplicar la carga. Como resultado, las propiedades del material de que está hecho cualquier cuerpo que se suponga rígido no se tendrá que considerar cuando se analicen las fuerzas que actúan sobre éste. En la mayoría de los casos, las deformaciones reales que se presentan en estructuras, máquinas, mecanismos, etc, son relativamente pequeñas, y la suposición de cuerpo rígido es apropiada para efectos de análisis.

RESULTANTE DE FUERZAS COPLANARES

Cuando sobre un cuerpo o sólido rígido actúan varias fuerzas que se aplican en el mismo punto, el cálculo de la fuerza resultante resulta trivial: basta sumarlas vectorialmente y aplicar el vector resultante en el punto común de aplicación. El equilibrio mecánico es una situación estacionaria en la que se cumplen una de estas dos condiciones:

1. Un sistema está en equilibrio mecánico cuando la suma de fuerzas y momentos, sobre cada partícula del sistema es cero.
2. Un sistema está en equilibrio mecánico si su posición en el espacio de configuración es un punto en el que el gradiente de energía potencial es cero.

Como consecuencia de las leyes de la mecánica, una partícula en equilibrio no sufre aceleración lineal ni de rotación, pero puede estar moviéndose a velocidad uniforme o rotar a velocidad angular uniforme. Esto es ampliable a un sólido rígido. Las ecuaciones necesarias y suficientes de equilibrio mecánico son:

Una partícula o un sólido rígido está en equilibrio de traslación cuando: la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es cero.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$$

En el espacio, tiene tres ecuaciones de fuerzas, una por dimensión; Descomponiendo cada fuerza en sus coordenadas tenemos:

$$\vec{F}_i = F_{i,x} \vec{u}_x + F_{i,y} \vec{u}_y + F_{i,z} \vec{u}_z$$

Y como un vector es cero, cuando cada una de sus componentes es cero, tenemos:

1.

$$\sum_{i=1}^n F_{i,x} = 0$$

2.

$$\sum_{i=1}^n F_{i,y} = 0$$

3.

$$\sum_{i=1}^n F_{i,z} = 0$$

Un sólido rígido está en equilibrio de traslación cuando la suma, de las componentes, de las fuerzas que actúan sobre él es cero. Un sólido rígido está en equilibrio de rotación, si la suma de momentos sobre el cuerpo es cero.

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0$$

En el espacio tiene las tres ecuaciones una por dimensión; por un razonamiento similar al de las fuerzas:

$$\vec{M}_i = M_{i,x} \vec{u}_x + M_{i,y} \vec{u}_y + M_{i,z} \vec{u}_z$$

Resultando:

1.
$$\sum_{i=1}^n M_{i,x} = 0$$

2.
$$\sum_{i=1}^n M_{i,y} = 0$$

3.
$$\sum_{i=1}^n M_{i,z} = 0$$

Un sólido rígido está en equilibrio de rotación cuando la suma de las componentes de los momentos que actúan sobre él es cero. Un sólido rígido está en equilibrio si está en equilibrio de traslación y de rotación. Se distingue un tipo particular de equilibrio mecánico llamado equilibrio estático que correspondería a una situación en que el cuerpo está en reposo, con velocidad cero: una hoja de papel sobre un escritorio estará en equilibrio mecánico y estático, un paracaidista cayendo a velocidad constante, dada por la velocidad límite estaría en equilibrio mecánico pero no estático.

DESCOMPOSICIÓN DE UNA FUERZA EN SUS COMPONENTES RECTANGULARES: EN EL PLANO Y EN EL ESPACIO

Muchas veces tenemos distintas fuerzas aplicadas a un cuerpo y en distintas direcciones. Para conocer su comportamiento lo que hacemos es calcular la fuerza resultante, equivalente a la suma de todas las fuerzas aplicadas. Pero no siempre tenemos las coordenadas cartesianas de los vectores de las fuerzas aplicadas, sino que en la mayoría de los casos las encontramos como un módulo y un ángulo, lo que suele llamarse coordenadas polares. Para resolver este tipo de problemas, lo que hay que hacer es descomponer a las fuerzas proyectándolas sobre los ejes por medio de relaciones trigonométricas simples, tales como seno, coseno y tangente. Una vez que se tiene cada componente proyectada, se realizan las sumas y restas sobre cada eje para luego volver a componer todo en una resultante.

EQUILIBRIO DE UNA PARTÍCULA: EN EL PLANO Y EN EL ESPACIO

La obra de Newton sigue siendo la base de la Mecánica clásica. La ciencia física se apoya en el concepto fundamental de fuerza que sigue definiéndose con los mismos términos que Newton empleó en los llamados axiomas o Leyes del Movimiento.

Estas leyes aparecieron por primera vez en su obra fundamental titulada *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, publicada en 1687. Las leyes del movimiento de Newton son las siguientes:

- Todo Cuerpo material persiste en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo si no actúa sobre él ninguna fuerza.
- Al aplicar una fuerza, el cambio de movimiento que se produce es proporcional a la fuerza motriz y sigue la línea recta según la cual ha sido aplicada dicha fuerza.
- Siempre que haya interacción entre dos objetos cualquiera, el primer objeto ejercerá una acción sobre el segundo, y éste una reacción sobre el primero. Estas fuerzas serán iguales y de sentido contrario.

CUERPO RÍGIDO Y PRINCIPIOS DE TRANSMISIBILIDAD

Cuerpo rígido

Un cuerpo rígido se define como aquel que no sufre deformaciones por efecto de fuerzas externas, es decir un sistema de partículas cuyas posiciones relativas no cambian. Un cuerpo rígido es una idealización, que se emplea para efectos de estudios de Cinemática, ya que esta rama de la Mecánica, únicamente estudia los objetos y no las fuerzas exteriores que actúan sobre de ellos.

Principio de transmisibilidad

Este principio establece condiciones de equilibrio o movimiento de un cuerpo rígido. Una fuerza \vec{F} puede ser reemplazada por otra fuerza \vec{F}' que tenga la misma magnitud y sentido, en un distinto punto siempre y cuando las dos fuerzas tengan la misma línea de acción.

Momento de una fuerza

Un par de fuerzas es un sistema formado por dos fuerzas de la misma intensidad o módulo, pero de dirección contraria. Al aplicar un par de fuerzas a un cuerpo se produce una rotación o una torsión. La magnitud de la rotación depende del valor de las fuerzas que forman el par y de la distancia entre ambas, llamada brazo del par. Un par de fuerzas queda caracterizado por su momento. El momento de un par de fuerzas, M , es una magnitud vectorial que tiene por módulo el producto de cualquiera de las fuerzas por la distancia (perpendicular) entre ellas d . Esto es, $M = F_1 d = F_2 d$

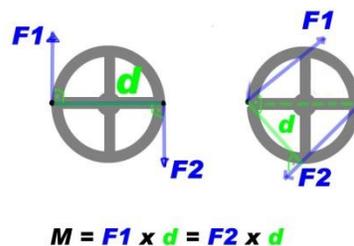


Figura 7. Momento de un par de fuerzas. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Par_de_fuerzas.jpg

Momento de una fuerza con respecto a un punto

Se denomina momento de una fuerza (respecto a un punto dado) a una magnitud (pseudo) vectorial, obtenida como producto vectorial del vector de posición del punto de aplicación de la fuerza con respecto al punto al cual se toma el momento por la fuerza, en ese orden. También se le denomina momento dinámico o sencillamente momento. Ocasionalmente recibe el nombre de torque a partir del término inglés (torque), derivado a su vez del latín *torquere* (retorcer).

El momento de una fuerza \vec{F} aplicada en un punto P con respecto de un punto O viene dado por el producto vectorial del vector \vec{OP} por el vector fuerza; esto es:

$$\vec{M}_O = \vec{OP} \times \vec{F} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Donde r es el vector que va desde O a P. Por la propia definición del producto vectorial, el momento M es un vector perpendicular al plano determinado por los vectores F y r.

La definición de momento se aplica a otras magnitudes vectoriales. Así, por ejemplo el momento de la cantidad de movimiento o momento lineal, p, es el momento cinético o momento angular, L definido como

$$\vec{L} = \vec{OP} \times \vec{p} = \vec{r} \times \vec{p}$$

El momento de fuerza conduce a los conceptos de par, par de fuerzas, par motor, etc.

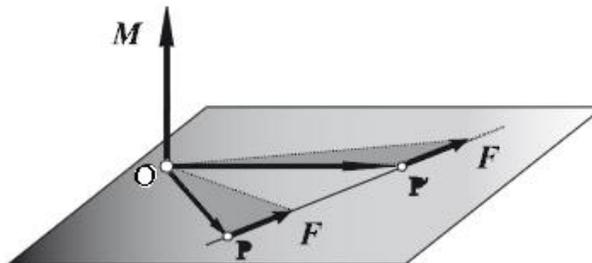


Figura 8. Definición de momento de una fuerza con respecto a un punto. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglfm0201_momento.jpg

El momento de una fuerza con respecto a un punto da a conocer en qué medida existe capacidad en una fuerza o sistema de fuerzas para cambiar el estado de la rotación del cuerpo alrededor de un eje que pase por dicho punto.

El momento tiende a provocar una aceleración angular (cambio en la velocidad de giro) en el cuerpo sobre el cual se aplica y es una magnitud característica en elementos que trabajan sometidos a torsión (como los ejes de maquinaria) o a flexión (como las vigas).

El momento dinámico se expresa en unidades de fuerza por unidades de distancia. En el Sistema Internacional de Unidades la unidad se denomina newtonmetro o newton-metro, indistintamente. Su símbolo debe escribirse como $\text{N} \cdot \text{m}$ o N m . (nunca mN , que indicaría milinewton). Si bien, dimensionalmente, $\text{N} \cdot \text{m}$ parece equivaler al julio, no se utiliza esta unidad para medir momentos, ya que el julio conceptualmente es unidad de trabajo o energía, que son conceptualmente diferentes a un momento de fuerza. El momento de fuerza es una magnitud vectorial, mientras que la energía es una magnitud escalar.

No obstante, la equivalencia dimensional de ambas magnitudes no es una mera coincidencia. Un momento de $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ aplicado a lo largo de una revolución completa (2π radianes) realiza un trabajo igual a 2π julios, ya que $W = M \theta$, donde W es el trabajo, M es el momento y θ es el ángulo girado (en radianes). Es esta relación la que podría motivar el nombre de julios por radián para la unidad de momento, aunque no es correcto.

Cuando se consideran problemas mecánicos bidimensionales, en los que todas las fuerzas y demás magnitudes vectoriales son coplanarias, el cálculo de momentos se simplifica notablemente. Eso se debe a que los momentos serían perpendiculares al plano de coplanariedad y, por tanto, sumar momentos se reduciría a sumar tan solo sus componentes perpendiculares al plano, que son magnitudes escalares.

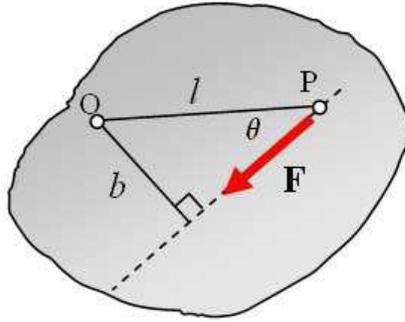


Figura 9. Momento es igual a fuerza por su brazo.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglf0200_Momento_de_fuerza.jpg

Si se considera una fuerza aplicada en un punto P del plano de trabajo y otro punto O sobre el mismo plano, el módulo del momento en O viene dado por:

$$M = F l \sin \theta = F b$$

siendo F el módulo de la fuerza, b, el brazo de momento, es decir, la distancia a la que se encuentra el punto O (en el que tomamos momento) de la recta de aplicación de la fuerza, y θ el suplementario del ángulo que forman los dos vectores. La dirección de un momento es paralela al eje de momento, el cual es perpendicular al plano que contiene la fuerza F, y por su brazo de momento d. Para establecer la dirección se utiliza la regla de la mano derecha.

La regla o ley de la mano derecha o del sacacorchos es un método para determinar direcciones vectoriales, y tiene como base los planos cartesianos. Se emplea prácticamente en dos maneras; la primera principalmente es para direcciones y movimientos vectoriales lineales, y la segunda para movimientos y direcciones rotacionales.



Figura 10. Regla de la mano derecha. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Right_hand_rule_simple.png

Así, cuando se hace girar un sacacorchos o un tornillo hacia la derecha (en el sentido de la agujas de un reloj) el sacacorchos o el tornillo avanza, y viceversa, cuando se hace girar un sacacorchos o un tornillo hacia la izquierda (contrario a las agujas del reloj), el sacacorchos o el tornillo retroceden.

CINEMÁTICA

La cinemática es la rama de la física que estudia las leyes del movimiento de los cuerpos sin considerar las causas que lo originan (las fuerzas) y se limita, principalmente al estudio de la trayectoria en función del tiempo. La aceleración es el ritmo con el que cambia la velocidad. La velocidad y la aceleración son las dos principales magnitudes que describen cómo cambia la posición en función del tiempo.

ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CINEMÁTICA

Los elementos básicos de la cinemática son el espacio, el tiempo y un móvil. En la mecánica clásica se admite la existencia de un espacio absoluto, es decir, un espacio anterior a todos los objetos materiales e independiente de la existencia de estos. Este espacio es el escenario donde ocurren todos los fenómenos físicos, y se supone que todas las leyes de la física se cumplen rigurosamente en todas las regiones del mismo. El espacio físico se representa en la mecánica clásica mediante un espacio euclidiano. Análogamente, la mecánica clásica admite la existencia de un tiempo absoluto que transcurre del mismo modo en todas las regiones del Universo y que es independiente de la existencia de los objetos materiales y de la ocurrencia de los fenómenos físicos.

El móvil más simple que se puede considerar es el punto material o partícula; cuando en la cinemática se estudia este caso particular de móvil, se denomina cinemática de la partícula, y cuando el móvil bajo estudio es un cuerpo rígido se lo puede considerar un sistema de partículas y hacer extensivos análogos conceptos; en este caso se le denomina cinemática del sólido rígido o del cuerpo rígido.

FUNDAMENTO DE LA CINEMÁTICA CLÁSICA

La cinemática trata del estudio del movimiento de los cuerpos en general y, en particular, el caso simplificado del movimiento de un punto material, pero no estudia por qué se mueven los cuerpos. Para sistemas de muchas partículas, por ejemplo los fluidos, las leyes de movimiento se estudian en la mecánica de fluidos.

El movimiento trazado por una partícula lo mide un observador respecto a un sistema de referencia. Desde el punto de vista matemático, la cinemática expresa cómo varían las coordenadas de posición de la partícula (o partículas) en función del tiempo. La función matemática que describe la trayectoria recorrida por el cuerpo (o partícula) depende de la velocidad (la rapidez con la que cambia de posición un móvil) y de la aceleración (variación de la velocidad respecto del tiempo).

El movimiento de una partícula (o cuerpo rígido) se puede describir según los valores de velocidad y aceleración, que son magnitudes vectoriales:

- Si la aceleración es nula, da lugar a un movimiento rectilíneo uniforme y la velocidad permanece constante a lo largo del tiempo.
- Si la aceleración es constante con igual dirección que la velocidad, da lugar al movimiento rectilíneo uniformemente acelerado y la velocidad variará a lo largo del tiempo.
- Si la aceleración es constante con dirección perpendicular a la velocidad, da lugar al movimiento circular uniforme, donde el módulo de la velocidad es constante, cambiando su dirección con el tiempo.

Cuando la aceleración es constante y está en el mismo plano que la velocidad y la trayectoria, tiene lugar el movimiento parabólico, donde la componente de la velocidad en la dirección de la aceleración se comporta como un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, y la componente perpendicular se comporta como un movimiento rectilíneo uniforme, y se genera una trayectoria parabólica al componer ambas.

En el movimiento armónico simple se tiene un movimiento periódico de vaivén, como el del péndulo, en el cual un cuerpo oscila a un lado y a otro desde la posición de equilibrio en una dirección determinada y en intervalos iguales de tiempo. La aceleración y la velocidad son funciones, en este caso, sinusoidales del tiempo.

Al considerar el movimiento de traslación de un cuerpo extenso, en el caso de ser rígido, conociendo como se mueve una de las partículas, se deduce como se mueven las demás. Así, basta describir el movimiento de una partícula puntual, como por ejemplo el centro de masa del cuerpo, para especificar el movimiento de todo el cuerpo. En la descripción del movimiento de rotación hay que considerar el eje de rotación respecto del cual rota el cuerpo y la distribución de partículas respecto al eje de giro. El estudio del movimiento de rotación de un sólido rígido suele incluirse en la temática de la mecánica del sólido rígido, por ser más complicado. Un movimiento interesante es el de una peonza, que al girar puede tener un movimiento de precesión y de nutación.

Cuando un cuerpo posee varios movimientos simultáneamente, como por ejemplo uno de traslación y otro de rotación, se puede estudiar cada uno por separado en el sistema de referencia que sea apropiado para cada uno, y luego, superponer los movimientos.

SISTEMAS DE COORDENADAS

En el estudio del movimiento, los sistemas de coordenadas más útiles se encuentran viendo los límites de la trayectoria a recorrer o analizando el efecto geométrico de la aceleración que afecta al movimiento. Así, para describir el movimiento de un talón obligado a desplazarse a lo largo de un aro circular, la coordenada más útil sería el ángulo trazado sobre el aro. Del mismo modo, para describir el movimiento de una partícula sometida a la acción de una fuerza central, las coordenadas polares serían las más útiles.

En la gran mayoría de los casos, el estudio cinemático se hace sobre un sistema de coordenadas cartesianas, usando una, dos o tres dimensiones, según la trayectoria seguida por el cuerpo.

REGISTRO DEL MOVIMIENTO

La tecnología hoy en día nos ofrece muchas formas de registrar el movimiento efectuado por un cuerpo. Así, para medir la velocidad de los vehículos se dispone del radar de tráfico cuyo funcionamiento se basa en el efecto Doppler. El tacómetro es un indicador de la velocidad de un vehículo basado en la frecuencia de rotación de las ruedas. Los caminantes disponen de podómetros que detectan las vibraciones características del paso y, suponiendo una distancia media característica para cada paso, permiten calcular la distancia recorrida. El vídeo, unido al análisis informático de las imágenes, permite igualmente determinar la posición y la velocidad de los vehículos.

Movimiento rectilíneo: Es aquél en el que el móvil describe una trayectoria en línea recta.

Movimiento rectilíneo uniforme: En este movimiento la velocidad permanece constante y no hay una variación de la aceleración (a) en el transcurso del tiempo. Esto corresponde al movimiento de un objeto lanzado en el espacio fuera de toda interacción, o al movimiento de un objeto que se desliza sin fricción. Siendo la velocidad v constante, la posición variará linealmente respecto del tiempo, según la ecuación:

$$v = v_0 = \text{const.}$$
$$x = v_0 t + x_0$$

donde x_0 es la posición inicial del móvil respecto al centro de coordenadas, es decir para $t = 0$.

Si $x_0 = 0$ la ecuación anterior corresponde a una recta que pasa por el origen, en una representación gráfica de la función $x(t)$.

Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado:

En este movimiento la aceleración es constante, por lo que la velocidad de móvil varía linealmente y la posición cuadráticamente con tiempo. Las ecuaciones que rigen este movimiento son las siguientes:

$$\begin{aligned}a &= a_0 = \text{const.} \\v &= v_0 + at \\x &= x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \\v^2 &= v_0^2 + 2a(x_f - x_0)\end{aligned}$$

Donde x_0 es la posición inicial del móvil, x_f es la posición final y v_0 su velocidad inicial, aquella que tiene para $t = 0$.

Obsérvese que *si la aceleración fuese nula*, las ecuaciones anteriores corresponderían a las de un movimiento rectilíneo uniforme, es decir, con velocidad $v = v_0$ constante.

Dos casos específicos de MRUA son la caída libre y el tiro vertical. La caída libre es el movimiento de un objeto que cae en dirección al centro de la Tierra con una aceleración equivalente a la aceleración de la gravedad (que en el caso del planeta Tierra al nivel del mar es de aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$). El tiro vertical, en cambio, corresponde al de un objeto arrojado en la dirección opuesta al centro de la tierra, ganando altura. En este caso la aceleración de la gravedad, provoca que el objeto vaya perdiendo velocidad, en lugar de ganarla, hasta llegar al estado de reposo; seguidamente, y a partir de allí, comienza un movimiento de caída libre con velocidad inicial nula.

Movimiento armónico simple:

Una masa colgada de un muelle se mueve con un movimiento armónico simple.

Es un movimiento periódico de vaivén, en el que un cuerpo oscila a un lado y a otro de una posición de equilibrio en una dirección determinada y en intervalos iguales de tiempo. Matemáticamente, la trayectoria recorrida se expresa en función del tiempo usando funciones trigonométricas, que son periódicas. Así por ejemplo, la ecuación de posición respecto del tiempo, para el caso de movimiento en una dimensión es:

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \phi)$$

ó

$$x(t) = A \cos(2\pi ft + \phi)$$

la que corresponde a una función sinusoidal de frecuencia f , de amplitud A y fase de inicial ϕ .

Los movimientos del péndulo, de una masa unida a un muelle o la vibración de los átomos en las redes cristalinas son de estas características.

La aceleración que experimenta el cuerpo es proporcional al desplazamiento del objeto y de dirección contraria, desde el punto de equilibrio. Matemáticamente:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

donde k es una constante positiva y x se refiere a la elongación (desplazamiento del cuerpo desde la posición de equilibrio).

La solución a esa ecuación diferencial lleva a funciones trigonométricas de la forma anterior. Lógicamente, un movimiento periódico oscilatorio real se ralentiza en el tiempo (por fricción mayormente), por lo que la expresión de la aceleración es más complicada,

necesitando agregar nuevos términos relacionados con la fricción. Una buena aproximación a la realidad es el estudio del movimiento oscilatorio amortiguado.

Movimiento parabólico

El movimiento parabólico se puede analizar como la composición de dos movimientos rectilíneos distintos: uno horizontal (según el eje x) de velocidad constante y otro vertical (según eje y) uniformemente acelerado, con la aceleración gravitatoria; la composición de ambos da como resultado una trayectoria parabólica.

Claramente, la componente horizontal de la velocidad permanece invariable, pero la componente vertical y el ángulo θ cambian en el transcurso del movimiento.

En la figura se observa que el vector velocidad inicial v_0 forma un ángulo inicial θ_0 respecto al eje x ; y , para el análisis se descompone en los dos tipos de movimiento mencionados; bajo este análisis, las componentes según x e y de la velocidad inicial serán:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$$
$$v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$$

El desplazamiento horizontal está dado por la ley del movimiento uniforme, por tanto sus ecuaciones serán (si se considera $x_0 = 0$):

$$a_x = 0$$
$$v_x = v_{0x}$$
$$x = v_{0x} t$$

En tanto que el movimiento según el eje y será rectilíneo uniformemente acelerado, siendo sus ecuaciones:

$$a_y = -g$$
$$v_y = v_{0y} - gt$$

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Si se reemplaza y opera para eliminar el tiempo, con las ecuaciones que dan las posiciones x e y , se obtiene la ecuación de la trayectoria en el plano xy :

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \theta_0} x^2 + \tan \theta_0 x + y_0$$

que tiene la forma general

$$y = ax^2 + bx + c$$

y representa una parábola en el plano $y(x)$. En la figura 4 se muestra esta representación, pero en ella se ha considerado $y_0 = 0$ (no así en la animación respectiva). En esa figura también se observa que la altura máxima en la trayectoria parabólica se producirá en H, cuando la componente vertical de la velocidad v_y sea nula (máximo de la parábola); y que el alcance horizontal x ocurrirá cuando el cuerpo retorne al suelo, en $y = 0$ (donde la parábola corta al eje x).

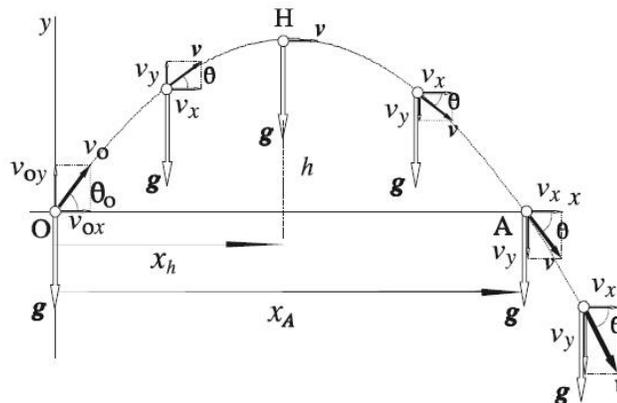


Figura 11. Esquema de la trayectoria del movimiento balístico.
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglfm0415_bal%C3%ADstica.jpg

MOVIMIENTO CIRCULAR

El movimiento circular en la práctica es un tipo muy común de movimiento: Lo experimentan, por ejemplo, las partículas de un disco que gira sobre su eje, las de una noria, las de las agujas de un reloj, las de las paletas de un ventilador, etc. Para el caso de un disco en rotación alrededor de un eje fijo, cualquiera de sus puntos describe trayectorias circulares, realizando un cierto número de vueltas durante determinado intervalo de tiempo. Para la descripción de este movimiento resulta conveniente referirse ángulos recorridos; ya que estos últimos son idénticos para todos los puntos del disco (referido a un mismo centro). La longitud del arco recorrido por un punto del disco depende de su posición y es igual al producto del ángulo recorrido por su distancia al eje o centro de giro. La velocidad angular (ω) se define como el desplazamiento angular respecto del tiempo, y se representa mediante un vector perpendicular al plano de rotación; su dirección se determina aplicando la "regla de la mano derecha" o del sacacorchos. La aceleración angular (α) resulta ser variación de velocidad angular respecto del tiempo, y se representa por un vector análogo al de la velocidad angular, pero puede o no tener la misma dirección (según acelere o retarde).

La velocidad (\mathbf{v}) de una partícula es una magnitud vectorial cuyo módulo expresa la longitud del arco recorrido (espacio) por unidad de tiempo; dicho módulo también se denomina rapidez o celeridad. Se representa mediante un vector cuya dirección es tangente a la trayectoria circular y coincide con el del movimiento.

La aceleración (\mathbf{a}) de una partícula es una magnitud vectorial que indica la rapidez con que cambia la velocidad respecto del tiempo; esto es, el cambio del vector velocidad por unidad de tiempo. La aceleración tiene generalmente dos componentes: la aceleración tangencial a la trayectoria y la aceleración normal a ésta. La aceleración tangencial es la que causa la variación del módulo de la velocidad (celeridad) respecto del tiempo, mientras que la aceleración normal es la responsable del cambio de dirección de la velocidad. Los módulos de ambas componentes de la aceleración dependen de la distancia a la que se encuentre la partícula respecto del eje de giro.

MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORME

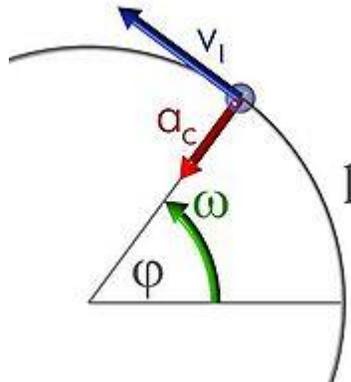


Figura 12. Movimiento circular uniforme. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moviment_circular.jpg

Se caracteriza por tener una velocidad variable o estructural constante por lo que la aceleración angular es nula. La velocidad lineal de la partícula no varía en módulo, pero sí en dirección. La aceleración tangencial es nula; pero existe aceleración centrípeta (la aceleración normal), que es causante del cambio de dirección.

Matemáticamente, la velocidad angular se expresa como:

$$\omega = \omega_0 = \text{const.}$$
$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

donde ω es la velocidad angular (constante), $\Delta\varphi$ es la variación del ángulo barrido por la partícula y Δt es la variación del tiempo.

El ángulo recorrido en un intervalo de tiempo es:

$$\varphi = \varphi_0 + \omega t$$

MOVIMIENTO CIRCULAR UNIFORMEMENTE ACELERADO

En este movimiento, la velocidad angular varía linealmente respecto del tiempo, por estar sometido el móvil a una aceleración angular constante. Las ecuaciones de movimiento son análogas a las del rectilíneo uniformemente acelerado, pero usando ángulos en vez de distancias:

$$\alpha = \alpha_0 = \text{const.}$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

siendo α la aceleración angular constante.

DINÁMICA

La dinámica es la parte de la física (específicamente de la mecánica clásica) que describe la evolución en el tiempo de un sistema físico en relación con las causas que provocan los cambios de estado físico y/o estado de movimiento. El objetivo de la dinámica es describir los factores capaces de producir alteraciones de un sistema físico, cuantificarlos y plantear ecuaciones de movimiento o ecuaciones de evolución para dicho sistema de operación.

El estudio de la dinámica es prominente en los sistemas mecánicos (clásicos, relativistas o cuánticos), pero también en la termodinámica y electrodinámica. En este artículo se describen los aspectos principales de la dinámica en sistemas mecánicos, y se reserva para otros artículos el estudio de la dinámica en sistemas no mecánicos.

En otros ámbitos científicos, como la economía o la biología, también es común hablar de dinámica en un sentido similar al de la física, para referirse a las características de la evolución a lo largo del tiempo del estado de un determinado sistema.

CÁLCULO EN DINÁMICA

A través de los conceptos de desplazamiento, velocidad y aceleración es posible describir los movimientos de un cuerpo u objeto sin considerar cómo han sido producidos, disciplina que se conoce con el nombre de cinemática. Por el contrario, la dinámica es la parte de la mecánica que se ocupa del estudio del movimiento de los cuerpos sometidos a la acción de las fuerzas.

El cálculo dinámico se basa en el planteamiento de ecuaciones del movimiento y su integración. Para problemas extremadamente sencillos se usan las ecuaciones de la mecánica newtoniana directamente auxiliados de las leyes de conservación. La ecuación esencial de la dinámica es la segunda ley de Newton (o ley de Newton-Euler) $F=m \cdot a$ donde F es la sumatoria de las fuerzas aplicadas, la m la sumatoria de todas las masa y la a la aceleración.

LEYES DE CONSERVACIÓN

Las leyes de conservación pueden formularse en términos de teoremas que establecen bajo qué condiciones concretas una determinada magnitud "se conserva" (es decir, permanece constante en valor a lo largo del tiempo a medida que el sistema se mueve o cambia con el tiempo). Además de la ley de conservación de la energía las otras leyes de conservación importante toman la forma de teoremas vectoriales. Estos teoremas son:

- El teorema de la cantidad de movimiento, que para un sistema de partículas puntuales requiere que las fuerzas de las partículas sólo dependan de la distancia entre ellas y estén dirigidas según la línea que las une. En mecánica de medios continuos y mecánica del sólido rígido pueden formularse teoremas vectoriales de conservación de cantidad de movimiento.
- El teorema del momento cinético, establece que bajo condiciones similares al anterior teorema vectorial la suma de momentos de fuerza respecto a un eje es igual a la variación temporal del momento angular.

ECUACIONES DE MOVIMIENTO

Existen varias formas de plantear ecuaciones de movimiento que permitan predecir la evolución en el tiempo de un sistema mecánico en función de las condiciones iniciales y las fuerzas actuantes. En mecánica clásica existen varias formulaciones posibles para plantear ecuaciones:

- La mecánica newtoniana que recurre a escribir directamente ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden en términos de fuerzas y en coordenadas cartesianas. Este sistema conduce a ecuaciones difícilmente integrables por medios elementales y sólo se usa en problemas extremadamente sencillos, normalmente usando sistemas de referencia inerciales.
- La mecánica lagrangiana, este método usa también ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden, aunque permite el uso de coordenadas totalmente generales, llamadas coordenadas generalizadas, que se adapten mejor a la geometría del problema planteado. Además las ecuaciones son válidas en cualquier sistema de referencia sea éste inercial o no. Además de obtener sistemas más fácilmente integrables el teorema de Noether y las transformaciones de coordenadas permiten encontrar integrales de movimiento, también llamadas leyes de conservación, más sencillamente que el enfoque newtoniano.
- La mecánica hamiltoniana es similar a la anterior pero en él las ecuaciones de movimiento son ecuaciones diferenciales ordinarias son de primer orden. Además la gama de transformaciones de coordenadas admisibles es mucho más amplia que en mecánica lagrangiana, lo cual hace aún más fácil encontrar integrales de movimiento y cantidades conservadas.

El método de Hamilton-Jacobi es un método basado en la resolución de una ecuación diferencial en derivadas parciales mediante el método de separación de variables, que resulta el medio más sencillo cuando se conocen un conjunto adecuado de integrales de movimiento.

DINÁMICA DE SISTEMAS MECÁNICOS

En física existen dos tipos importantes de sistemas físicos los sistemas finitos de partículas y los campos. La evolución en el tiempo de los primeros pueden ser descritos por un conjunto finito de ecuaciones diferenciales ordinarias, razón por la cual se dice que tienen un número finito de grados de libertad. En cambio la evolución en el tiempo de los campos requiere un conjunto de ecuaciones complejas. En derivadas parciales, y en cierto sentido informal se comportan como un sistema de partículas con un número infinito de grados de libertad.

La mayoría de sistemas mecánicos son del primer tipo, aunque también existen sistemas de tipo mecánico que son descritos de modo más sencillo como campos, como sucede con los fluidos o los sólidos deformables. También sucede que algunos sistemas mecánicos formados idealmente por un número infinito de puntos materiales, como los sólidos rígidos pueden ser descritos mediante un número finito de grados de libertad.

DINÁMICA DE LA PARTÍCULA

La dinámica del punto material es una parte de la mecánica newtoniana en la que los sistemas se analizan como sistemas de partículas puntuales y que se ejercen fuerzas instantáneas a distancia.

En la teoría de la relatividad no es posible tratar un conjunto de partículas cargadas en mutua interacción, usando simplemente las posiciones de las partículas en cada instante, ya que en dicho marco se considera que las acciones a distancia violan la causalidad física. En esas condiciones la fuerza sobre una partícula, debida a las otras, depende de las posiciones pasadas de la misma.

DINÁMICA DEL SÓLIDO RÍGIDO

La mecánica de un sólido rígido es aquella que estudia el movimiento y equilibrio de sólidos materiales ignorando sus deformaciones. Se trata, por tanto, de un modelo matemático útil para estudiar una parte de la mecánica de sólidos, ya que todos los sólidos reales son deformables. Se entiende por sólido rígido un conjunto de puntos del espacio que se mueven de tal manera que no se alteran las distancias entre ellos, sea cual sea la fuerza actuante (matemáticamente, el movimiento de un sólido rígido viene dado por un grupo uniparamétrico de isometrías).

CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA DINÁMICA

INERCIA

La inercia es la propiedad de los cuerpos de no modificar su estado de reposo o movimiento uniforme, si sobre ellos no influyen otros cuerpos o si la acción de otros cuerpos se compensa.

En física se dice que un sistema tiene más inercia cuando resulta más difícil lograr un cambio en el estado físico del mismo. Los dos usos más frecuentes en física son la inercia mecánica y la inercia térmica. La primera de ellas aparece en mecánica y es una medida de dificultad para cambiar el estado de movimiento o reposo de un cuerpo. La inercia mecánica depende de la cantidad de masa y del tensor de inercia del cuerpo. La inercia térmica mide la dificultad con la que un cuerpo cambia su temperatura al estar en contacto con otros cuerpos o ser calentado. La inercia térmica depende de la cantidad de masa y de la capacidad calorífica. Las llamadas fuerzas de inercia son fuerzas ficticias o aparentes para un observador en un sistema de referencia no-inercial.

La masa inercial es una medida de la resistencia de una masa al cambio en velocidad en relación con un sistema de referencia inercial. En física clásica la masa inercial de partículas puntuales se define por medio de la siguiente ecuación, donde la partícula uno se toma como la unidad ($m_1 = 1$): $m_i a_{i1} = m_1 a_{1i}$

donde m_i es la masa inercial de la partícula i , y a_{i1} es la aceleración inicial de la partícula i , en la dirección de la partícula i hacia la partícula 1, en un volumen ocupado sólo por partículas i y 1, donde ambas partículas están inicialmente en reposo y a una distancia unidad. No hay fuerzas externas pero las partículas ejercen fuerzas entre sí.

TRABAJO Y ENERGÍA

El trabajo y la energía aparecen en la mecánica gracias a los teoremas energéticos. El principal, y de donde se derivan los demás teoremas, es el teorema de la energía cinética. Este teorema se puede enunciar en versión diferencial o en versión integral. En adelante se hará referencia al Teorema de la energía cinética como TEC. Gracias al TEC se puede establecer una relación entre la mecánica y las demás ciencias como, por ejemplo, la química y la electrotecnia, de dónde deriva su vital importancia.

FUERZA Y POTENCIAL

La mecánica de partículas o medios continuos tiene formulaciones ligeramente diferentes en mecánica clásica, mecánica relativista y mecánica cuántica. En todas ellas las causas del cambio se representa mediante fuerzas o conceptos derivados como la energía potencial asociada al sistema de fuerzas. En las dos primeras se usa fundamentalmente el concepto de fuerza, mientras que en la mecánica cuántica es más frecuente plantear los problemas en términos de energía potencial. La fuerza resultante \mathbf{F} sobre un sistema mecánico clásico se relaciona con la variación de la cantidad de movimiento \mathbf{P} mediante la relación simple:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{P}}{dt}$$

Cuando el sistema mecánico es además conservativo la energía potencial V se relaciona con la energía cinética K asociada al movimiento mediante la relación:

$$\frac{dV}{dt} + \frac{dK}{dt} = 0$$

En mecánica relativista las relaciones anteriores no son válidas si t se refiere a la componente temporal medida por un observador cualquiera, pero si t se interpreta como el tiempo propio del observador entonces sí son válidas. En mecánica clásica dado el carácter absoluto del tiempo no existe diferencia real entre el tiempo propio del observador y su coordenada temporal.

TRABAJO

En mecánica clásica, el trabajo que realiza una fuerza sobre un cuerpo equivale a la energía necesaria para desplazar este cuerpo. El trabajo es una magnitud física escalar que se representa con la letra W (del inglés *Work*) y se expresa en unidades de energía, esto es en julios o *joules* (J) en el Sistema Internacional de Unidades.

Ya que por definición el trabajo es un tránsito de energía, nunca se refiere a él como incremento de trabajo, ni se simboliza como ΔW .

Matemáticamente se expresa como:

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d} = F \cdot d \cdot \cos \alpha$$

Donde F es el módulo de la fuerza, d es el desplazamiento y α es el ángulo que forman entre sí el vector fuerza y el vector desplazamiento (ver dibujo).

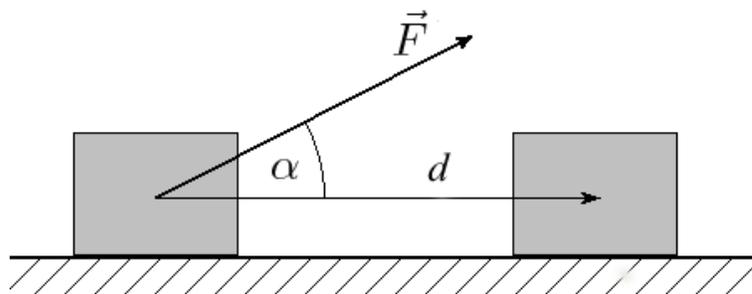


Figura 13. Trabajo. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trabajo.png>

Cuando el vector fuerza es perpendicular al vector desplazamiento del cuerpo sobre el que se aplica, dicha fuerza no realiza trabajo alguno. Asimismo, si no hay desplazamiento, el trabajo también será nulo.

EL TRABAJO EN LA MECÁNICA

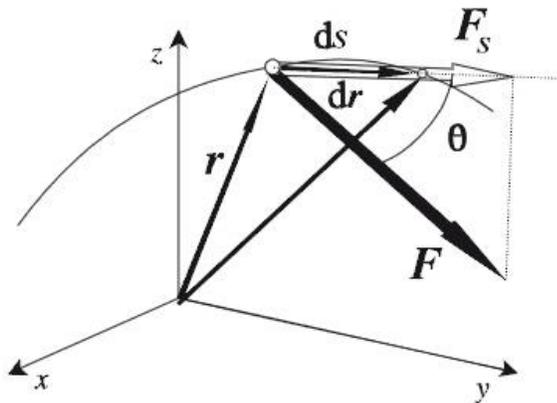


Figura 14. Trabajo de una fuerza.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglfm1001_Trabajo_de_una_fuerza.jpg

Consideremos una partícula P sobre la que actúa una fuerza F , función de la posición de la partícula en el espacio, esto es $F = F(\mathbf{r})$ y sea $d\mathbf{r}$ un desplazamiento elemental (infinitesimal) experimentado por la partícula durante un intervalo de tiempo dt . Llamamos trabajo elemental, dW , de la fuerza \mathbf{F} durante el desplazamiento elemental $d\mathbf{r}$ al producto escalar $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$; esto es,

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

Si representamos por ds la longitud de arco (medido sobre la trayectoria de la partícula) en el desplazamiento elemental, esto es $ds = |d\mathbf{r}|$, entonces el vector tangente a la trayectoria viene dado por $\mathbf{e}_t = d\mathbf{r}/ds$ y podemos escribir la expresión anterior en la forma

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{e}_t ds = (F \cos \theta) ds = F_s ds$$

donde θ representa el ángulo determinado por los vectores $d\mathbf{F}$ y \mathbf{e}_t y F_s es la componente de la fuerza \mathbf{F} en la dirección del desplazamiento elemental $d\mathbf{r}$.

El trabajo realizado por la fuerza \mathbf{F} durante un desplazamiento elemental de la partícula sobre la que está aplicada es una magnitud escalar, que podrá ser positiva, nula o negativa, según que el ángulo θ sea agudo, recto u obtuso.

Si la partícula P recorre una cierta trayectoria en el espacio, su desplazamiento total entre dos posiciones A y B puede considerarse como el resultado de sumar infinitos desplazamientos elementales $d\mathbf{r}$ y el trabajo total realizado por la fuerza \mathbf{F} en ese desplazamiento será la suma de todos esos trabajos elementales; o sea

$$W_{AB} = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

Esto es, el trabajo viene dado por la integral curvilínea de \mathbf{F} a lo largo de la curva C que une los dos puntos; en otras palabras, por la circulación de \mathbf{F} sobre la curva C entre los puntos A y B. Así pues, el trabajo es una magnitud física escalar que dependerá en general de la trayectoria que una los puntos A y B, a no ser que la fuerza \mathbf{F} sea conservativa, en cuyo caso el trabajo resultará ser independiente del camino seguido para ir del punto A al punto B, siendo nulo en una trayectoria cerrada. Así, podemos afirmar que el trabajo no es una variable de estado.

En el caso particular de que la fuerza aplicada a la partícula sea constante (en módulo, dirección y sentido), se tiene que

$$W_{AB} = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \mathbf{F} \cdot \int_A^B d\mathbf{r} = \mathbf{F} \cdot \Delta\mathbf{r} = F s \cos \theta$$

es decir, el trabajo realizado por una fuerza constante viene expresado por el producto escalar de la fuerza por el vector desplazamiento total entre la posición inicial y la final. Si sobre una partícula actúan varias fuerzas y queremos calcular el trabajo total realizado sobre esta ella, entonces \mathbf{F} representará al vector resultante de todas las fuerzas aplicadas.

EL TRABAJO EN LA TERMODINÁMICA

En el caso de un sistema termodinámico, el trabajo no es necesariamente de naturaleza puramente mecánica, ya que la energía intercambiada en las interacciones puede ser también calorífica, eléctrica, magnética o química, por lo que no siempre podrá expresarse en la forma de trabajo mecánico.

No obstante, existe una situación particularmente simple e importante en la que el trabajo está asociado a los cambios de volumen que experimenta un sistema (v.g., un fluido contenido en un recinto de forma variable).

Así, si consideramos un fluido que se encuentra sometido a una presión externa P_{ext} y que evoluciona desde un estado caracterizado por un volumen V_1 a otro con un volumen V_2 , el trabajo realizado será:

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p_{\text{ext}} dV$$

resultando un trabajo positivo ($W > 0$) si se trata de una expansión del sistema $dV > 0$ y negativo en caso contrario, de acuerdo con el convenio de signos aceptado en la Termodinámica. En un proceso cuasiestático y sin fricción la presión exterior (P_{ext}) será igual en cada instante a la presión (P) del fluido, de modo que el trabajo intercambiado por el sistema en estos procesos se expresa como

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

De estas expresiones se infiere que la presión se comporta como una fuerza generalizada, en tanto que el volumen actúa como un desplazamiento generalizado; la presión y el volumen constituyen una pareja de variables conjugadas.

En el caso que la presión del sistema permanezca constante durante el proceso, el trabajo viene dado por:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

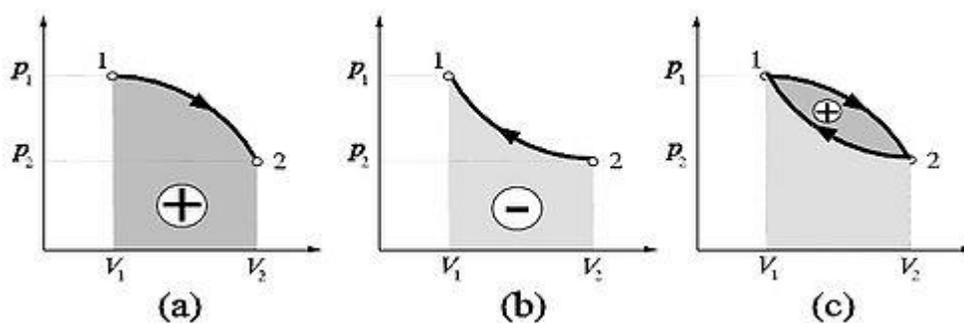


Figura 15. El trabajo en los diagramas de Clayperon.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moglt0502_El_trabajo_en_los_diagramas_de_Clayperon.jpg

ENERGÍA

El término **energía** (del griego ἐνέργεια/energeia, actividad, operación; ἐνεργός/energós = fuerza de acción o fuerza trabajando) tiene diversas acepciones y definiciones, relacionadas con la idea de una capacidad para obrar, transformar o poner en movimiento.

En física, «energía» se define como la capacidad para realizar un trabajo. En tecnología y economía, «energía» se refiere a un recurso natural (incluyendo a su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y darle un uso industrial o económico.

EL CONCEPTO DE ENERGÍA EN FÍSICA

En física clásica, la ley universal de conservación de la energía, que es el fundamento del primer principio de la termodinámica, indica que la energía ligada a un sistema aislado permanece constante en el tiempo. Eso significa que para multitud de sistemas físicos clásicos la suma de la energía mecánica, la energía calorífica, la energía electromagnética, y otros tipos de energía potencial es un número constante. Por ejemplo, la energía cinética se cuantifica en función del movimiento de la materia, la energía potencial según propiedades como el estado de deformación o a la posición de la materia en relación con las fuerzas que actúan sobre ella, la energía térmica según su capacidad calorífica, y la energía química según la composición química.

En teoría de la relatividad el principio de conservación de la energía se cumple, aunque debe redefinirse la medida de la energía para incorporar la energía asociada a la masa, ya que en mecánica relativista, si se considerara la energía definida al modo de la mecánica clásica entonces resultaría una cantidad que no conserva constante. Así pues, la teoría de la relatividad especial establece una equivalencia entre masa y energía por la cual todos los cuerpos, por el hecho de estar formados de materia, poseen una energía adicional equivalente a $E=mc^2$, y si se considera el principio de conservación de la energía esta energía debe ser tomada en cuenta para obtener una ley de conservación (naturalmente en contrapartida la masa no se conserva en relatividad, sino que la única posibilidad para una

ley de conservación es contabilizar juntas la energía asociada a la masa y el resto de formas de energía).

En mecánica cuántica el resultado de la medida de una magnitud en el caso general no da un resultado determinista, por lo que sólo puede hablarse del valor de la energía de una medida no de la energía del sistema. El valor de la energía en general es una variable aleatoria, aunque su distribución si puede ser calculada, si bien no el resultado particular de una medida. En mecánica cuántica el valor esperado de la energía de un sistema estacionario se mantiene constante. Sin embargo, existen estados que no son propios del hamiltoniano para los cuales la energía esperada del estado fluctúa, por lo que no es constante. La varianza de la energía medida además puede depender del intervalo de tiempo, de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg.

EXPRESIÓN MATEMÁTICA

La energía es una propiedad de los sistemas físicos, no es un estado físico real, ni una "sustancia intangible". En mecánica clásica se representa como una magnitud escalar. La energía es una abstracción matemática de una propiedad de los sistemas físicos. Por ejemplo, se puede decir que un sistema con energía cinética nula está en reposo. En problemas relativistas la energía de una partícula no puede ser representada por un escalar invariante, sino por la componente temporal de un cuadrivector energía-momento (cuadrimomento), ya que diferentes observadores no miden la misma energía si no se mueven a la misma velocidad con respecto a la partícula. Si se consideran distribuciones de materia continuas, la descripción resulta todavía más complicada y la correcta descripción de la cantidad de movimiento y la energía requiere el uso del tensor energía-impulso.

Se utiliza como una abstracción de los sistemas físicos por la facilidad para trabajar con magnitudes escalares, en comparación con las magnitudes vectoriales como la velocidad o la aceleración. Por ejemplo, en mecánica, se puede describir completamente la dinámica de un sistema en función de las energías cinética, potencial, que componen la energía

mecánica, que en la mecánica newtoniana tiene la propiedad de conservarse, es decir, ser invariante en el tiempo.

Matemáticamente, la conservación de la energía para un sistema es una consecuencia directa de que las ecuaciones de evolución de ese sistema sean independientes del instante de tiempo considerado, de acuerdo con el teorema de Noether.

ENERGÍA EN DIVERSOS TIPOS DE SISTEMAS FÍSICOS

La energía también es una magnitud física que se presenta bajo diversas formas, está involucrada en todos los procesos de cambio de estado físico, se transforma y se transmite, depende del sistema de referencia y fijado éste se conserva. Por lo tanto, todo cuerpo es capaz de poseer energía en función de su movimiento, posición, temperatura, masa, composición química, y otras propiedades. En las diversas disciplinas de la física y la ciencia, se dan varias definiciones de energía, todas coherentes y complementarias entre sí, y todas ellas siempre relacionadas con el concepto de trabajo.

FÍSICA CLÁSICA

En la mecánica se encuentran:

- Energía mecánica, que es la combinación o suma de los siguientes tipos:
- Energía cinética: relativa al movimiento.
- Energía potencial: la asociada a la posición dentro de un campo de fuerzas conservativo. Por ejemplo, está la *Energía potencial gravitatoria* y la *Energía potencial elástica* (o energía de deformación, llamada así debido a las deformaciones elásticas). Una onda también es capaz de transmitir energía al desplazarse por un medio elástico.

En electromagnetismo se tiene a la:

- Energía electromagnética, que se compone de:
 - Energía radiante: la energía que poseen las ondas electromagnéticas.

- Energía calórica: la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
- Energía potencial eléctrica (*véase potencial eléctrico*)
- Energía eléctrica: resultado de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos.

En la termodinámica están:

- Energía interna, que es la suma de la energía mecánica de las partículas constituyentes de un sistema.
- Energía térmica, que es la energía liberada en forma de calor.
- Potencial termodinámico, la energía relacionada con las variables de estado.

FÍSICA RELATIVISTA

En la relatividad están:

- Energía en reposo, que es la energía debida a la masa según la conocida fórmula de Einstein, $E=mc^2$, que establece la equivalencia entre masa y energía.
- Energía de desintegración, que es la diferencia de energía en reposo entre las partículas iniciales y finales de una desintegración.
- Al redefinir el concepto de masa, también se modifica el de energía cinética (*véase relación de energía-momento*).

FÍSICA CUÁNTICA

En física cuántica, la energía es una magnitud ligada al operador hamiltoniano. La energía total de un sistema no aislado de hecho puede no estar definida: en un instante dado la medida de la energía puede arrojar diferentes valores con probabilidades definidas. En cambio, para los sistemas aislados en los que el hamiltoniano no depende explícitamente del tiempo, los estados estacionarios sí tienen una energía bien definida. Además de la energía asociada a la materia ordinaria o campos de materia, en física cuántica aparece la:

- Energía del vacío: un tipo de energía existente en el espacio, incluso en ausencia de materia.

ENERGÍA POTENCIAL

Es la energía que se le puede asociar a un cuerpo o sistema conservativo en virtud de su posición o de su configuración. Si en una región del espacio existe un campo de fuerzas conservativo, la energía potencial del campo en el punto (A) se define como el trabajo requerido para mover una masa desde un punto de referencia (*nivel de tierra*) hasta el punto (A). Por definición el nivel de tierra tiene energía potencial nula.

Algunos tipos de energía potencial que aparecen en diversos contextos de la física son:

- La energía potencial gravitatoria asociada a la posición de un cuerpo en el campo gravitatorio (en el contexto de la mecánica clásica). La energía potencial gravitatoria de un cuerpo de masa m en un campo gravitatorio constante viene dada por: $E_p = mgh$ donde h es la altura del centro de masas respecto al cero convencional de energía potencial.
- La energía potencial electrostática V de un sistema se relaciona con el campo eléctrico mediante la relación:

$$\mathbf{E} = - \text{grad } V$$

siendo \mathbf{E} el valor del campo eléctrico.

- La energía potencial elástica asociada al campo de tensiones de un cuerpo deformable.

La energía potencial puede definirse solamente cuando existe un campo de fuerzas que es conservativa, es decir, que cumpla con alguna de las siguientes propiedades:

- El trabajo realizado por la fuerza entre dos puntos es independiente del camino recorrido.
- El trabajo realizado por la fuerza para cualquier camino cerrado es nulo.
- Cuando el rotor de F es cero (sobre cualquier dominio simplemente conexo).

Se puede demostrar que todas las propiedades son equivalentes (es decir que cualquiera de ellas implica la otra). En estas condiciones, la energía potencial en un punto arbitrario se define como la diferencia de energía que tiene una partícula en el punto arbitrario y otro punto fijo llamado "potencial cero".

ENERGÍA CINÉTICA DE UNA MASA PUNTUAL

La energía cinética es un concepto fundamental de la física que aparece tanto en mecánica clásica, como mecánica relativista y mecánica cuántica. La energía cinética es una magnitud escalar asociada al movimiento de cada una de las partículas del sistema. Su expresión varía ligeramente de una teoría física a otra. Esta energía se suele designar como K , T o E_c .

El límite clásico de la energía cinética de un cuerpo rígido que se desplaza a una velocidad v viene dada por la expresión:

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

Una propiedad interesante es que esta magnitud es extensiva por lo que la energía de un sistema puede expresarse como "suma" de las energías de partes disjuntas del sistema. Así por ejemplo puesto que los cuerpos están formados de partículas, se puede conocer su energía sumando las energías individuales de cada partícula del cuerpo.

TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA

Para la optimización de recursos y la adaptación a nuestros usos, necesitamos transformar unas formas de energía en otras. Todas ellas se pueden transformar en otra cumpliendo los siguientes principios termodinámicos:

“La energía no se crea ni se destruye; sólo se transforma”. De este modo, la cantidad de energía inicial es igual a la final.

“La energía se degrada continuamente hacia una forma de energía de menor calidad (energía térmica)”. Dicho de otro modo, ninguna transformación se realiza con un 100% de rendimiento, ya que siempre se producen unas pérdidas de energía térmica no recuperable. El rendimiento de un sistema energético es la relación entre la energía obtenida y la que suministramos al sistema.

UNIDADES DE MEDIDA DE ENERGÍA

La unidad de energía definida por el Sistema Internacional de Unidades es el julio, que se define como el trabajo realizado por una fuerza de un newton en un desplazamiento de un metro en la dirección de la fuerza, es decir, equivale a multiplicar un Newton por un metro. Existen muchas otras unidades de energía, algunas de ellas en desuso.

Nombre	Abreviatura	Equivalencia en julios
Caloría	cal	4,1855
Frigoría	fg	4185,5
Termia	th	4 185 500
Kilovatio hora	kWh	3 600 000
Caloría grande	Cal	4185,5
Tonelada equivalente de petróleo	Tep	41 840 000 000
Tonelada equivalente de carbón	Tec	29 300 000 000
Tonelada de refrigeración	TR	3,517/h

Electronvoltio	eV	$1,602176462 \times 10^{-19}$
British ThermalUnit	BTU o BTu	1055,05585
Caballo de vapor por hora ²	CVh	$3,777154675 \times 10^{-7}$
Ergio	erg	1×10^{-7}
Pie por libra (<i>Footpound</i>)	ft × lb	1,35581795
Foot-poundal ³	ft × pdl	$4,214011001 \times 10^{-11}$

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa>

ENERGÍA CINÉTICA

Los carros de una montaña rusa alcanzan su máxima energía cinética cuando están en el fondo de su trayectoria. Cuando comienzan a elevarse, la energía cinética comienza a ser convertida a energía potencial gravitacional, pero, si se asume una fricción insignificante y otros factores de retardo, la cantidad total de energía en el sistema sigue siendo constante.

En física, la energía cinética de un cuerpo es aquella energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa determinada desde el reposo hasta la velocidad indicada. Una vez conseguida esta energía durante la aceleración, el cuerpo mantiene su energía cinética salvo que cambie su velocidad. Para que el cuerpo regrese a su estado de reposo se requiere un trabajo negativo de la misma magnitud que su energía cinética. Suele abreviarse con letra E_c o E_k (a veces también T o K).

ENERGÍA CINÉTICA EN MECÁNICA CLÁSICA

ENERGÍA CINÉTICA EN DIFERENTES SISTEMAS DE REFERENCIA

En la mecánica clásica, la energía cinética de una masa puntual depende de su masa m y sus componentes del movimiento. Se expresa en julios (J). $1 \text{ J} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$.

Estos son descritos por la velocidad v de la masa puntual, así:
$$E_c = \frac{1}{2}mv^2.$$

En un sistema de coordenadas especial, esta expresión tiene las siguientes formas:

Coordenadas cartesianas (x, y, z):

$$E_c = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)$$

Coordenadas polares (r, ϕ):

$$E_c = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2)$$

Coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z):

$$E_c = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\phi}^2 + \dot{z}^2)$$

Coordenadas esféricas (r, ϕ, θ):

$$E_c = \frac{1}{2}m\left(r^2[\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2 \sin^2 \theta] + \dot{r}^2\right)$$

Con eso el significado de un punto en una coordenada y su cambio temporal se describe como la derivada temporal de su desplazamiento:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}x(t)$$

En un formalismo hamiltoniano no se trabaja con esas componentes del movimiento, o sea con su velocidad, sino con su impulso P (cambio en la cantidad de movimiento). En caso de usar componentes cartesianas obtenemos:

$$E_c = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m}$$

ENERGÍA POTENCIAL

Los carros de una montaña rusa alcanzan su máxima energía potencial gravitacional en la parte más alta del recorrido. Al descender, ésta es convertida en energía cinética, la que llega a ser máxima en el fondo de la trayectoria (y la energía potencial mínima). Luego, al volver a elevarse debido a la inercia del movimiento, el traspaso de energías se invierte. Si se asume una fricción insignificante, la energía total del sistema permanece constante.

En un sistema físico, la energía potencial es la energía que mide la capacidad que tiene dicho sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición o configuración. Puede pensarse como la *energía almacenada* en el sistema, o como una medida del trabajo que un sistema puede entregar. Suele abreviarse con la letra U o E_p .

La energía potencial puede presentarse como energía potencial gravitatoria, energía potencial electrostática, y energía potencial elástica. Más rigurosamente, la energía potencial es una magnitud escalar asociada a un campo de fuerzas (o como en elasticidad un campo tensorial de tensiones). Cuando la energía potencial está asociada a un campo de fuerzas, la diferencia entre los valores del campo en dos puntos A y B es igual al trabajo realizado por la fuerza para cualquier recorrido entre B y A.

ENERGÍA POTENCIAL ASOCIADA A CAMPOS DE FUERZAS

La energía potencial puede definirse solamente cuando la fuerza es conservativa. Si las fuerzas que actúan sobre un cuerpo son no conservativas, entonces no se puede definir la energía potencial, como se verá a continuación. Una fuerza es conservativa cuando se cumple alguna de las siguientes propiedades:

El trabajo realizado por la fuerza entre dos puntos es independiente del camino recorrido.

El trabajo realizado por la fuerza para cualquier camino cerrado es nulo.

Cuando el rotacional de la fuerza es cero.

Se puede demostrar que todas las propiedades son equivalentes (es decir, que cualquiera de ellas implica la otra). En estas condiciones, la energía potencial se define como:

$$U_B - U_A = - \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}.$$

Si las fuerzas no son conservativas no existirá en general una manera unívoca de definir la anterior integral. De la propiedad anterior se sigue que si la energía potencial es conocida, se puede obtener la fuerza a partir del gradiente de U:

$$\mathbf{F} = -\nabla U.$$

También puede recorrerse el camino inverso: suponer la existencia una función energía potencial y definir la fuerza correspondiente mediante la fórmula anterior. Se puede demostrar que toda fuerza así definida es conservativa.

La forma funcional de la energía potencial depende de la fuerza de que se trate; así, para el campo gravitatorio (o eléctrico), el resultado del producto de las masas (o cargas) por una constante dividido por la distancia entre las masas (cargas), por lo que va disminuyendo a medida que se incrementa dicha distancia.

ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA

La fuerza gravitatoria mantiene a los planetas en órbita en torno al sol. La energía potencial gravitatoria es la energía asociada con la fuerza gravitatoria. Esta dependerá de la altura relativa de un objeto a algún punto de referencia, la masa, y la fuerza de la gravedad. Por ejemplo, si un libro apoyado en una mesa es elevado, una fuerza externa estará actuando en contra de la fuerza gravitacional. Si el libro cae, el mismo trabajo que el empleado para levantarlo, será efectuado por la fuerza gravitacional. Por esto, un libro a un metro del piso tiene menos energía potencial que otro a dos metros, o un libro de mayor masa a la misma altura.

Si bien la fuerza gravitacional varía con la distancia (altura), en las proximidades de la superficie de la Tierra la diferencia es muy pequeña como para ser considerada, por lo que se considera a la aceleración de la gravedad como una constante ($9,8 \text{ m/s}^2$) en cualquier parte. En cambio en la Luna, cuya gravedad es muy inferior, se generaliza el valor de $1,66 \text{ m/s}^2$

Para estos casos en los que la variación de la gravedad es insignificante, se aplica la fórmula:

$$U = mgh$$

Donde U es la energía potencial, m la masa, g la aceleración de la gravedad, y h la altura.

Sin embargo, si la distancia (la variación de altitud) es importante, y por tanto la variación de la aceleración de la gravedad es considerable, se aplica la fórmula general:

$$U = -\frac{GMm}{r}$$

Donde U es la energía potencial, r es la distancia entre la partícula material y el centro de la Tierra, G la constante universal de la gravitación y M la masa de la Tierra. Esta última es la

fórmula que necesitamos emplear, por ejemplo, para estudiar el movimiento de satélites y misiles balísticos:

Cálculo simplificado

Cuando la distancia recorrida por un móvil, h , es pequeña, lo que sucede en la mayoría de las aplicaciones usuales (tiro parabólico, saltos de agua, etc.), podemos usar el desarrollo de Taylor a la anterior ecuación. Así si llamamos r a la distancia al centro de la Tierra, R al radio de la Tierra y h a la altura sobre la superficie de la Tierra, es decir, $r = R + h$ tenemos:

$$U_G(R + h) = -\frac{GMm}{(R + h)} \approx -\frac{GMm}{R} + \frac{GM}{R^2}mh = -\frac{GMm}{R} + mgh$$

Donde hemos introducido la aceleración sobre la superficie:

$$g = \frac{GM}{R^2} \approx 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Por tanto la variación de la energía potencial gravitatoria al desplazarse un cuerpo de masa m desde una altura h_1 hasta una altura h_2 es:

$$\Delta U_G \approx mg(h_2 - h_1)$$

Dado que la energía potencial se anula cuando la distancia es infinita, frecuentemente se asigna energía potencial cero a la altura correspondiente a la del suelo, ya que lo que es de interés no es el valor absoluto de U , sino su variación durante el movimiento.

Así, si la altura del suelo es $h_1 = 0$, entonces la energía potencial a una altura $h_2 = h$ será simplemente $U_G = mgh$.

ENERGÍA POTENCIAL ELECTROSTÁTICA

La energía potencial electrostática de un sistema formado por dos partículas de cargas q y Q situadas a una distancia r una de la otra es igual a:

$$U_E(r) = K \frac{Qq}{r}$$

Siendo K la constante de Coulomb, una constante universal cuyo valor aproximado es 9×10^9 (voltios·metro/culombio). $K = 1/(4\pi\epsilon)$ donde ϵ es la permitividad del medio. En el vacío $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ (culombio/voltio·metro).

Una definición de energía potencial eléctrica sería la siguiente: cantidad de trabajo que se necesita realizar para acercar una carga puntual de masa nula con velocidad constante desde el infinito hasta una distancia r de una carga del mismo signo, la cual utilizamos como referencia. En el infinito la carga de referencia ejerce una fuerza nula.

Es importante no confundir la energía potencial electrostática con el potencial eléctrico, que es el trabajo por unidad de carga:

$$V = \frac{U_E}{q}$$

ENERGÍA POTENCIAL ELÁSTICA

La energía elástica o energía de deformación es el aumento de energía interna acumulada en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación.

POTENCIAL ARMÓNICO

El Potencial armónico (caso unidimensional), dada una partícula en un campo de fuerzas que responda a la ley de Hooke, como el caso de un muelle se puede calcular estimando el trabajo necesario para mover la partícula una distancia x :

$$U_e = - \int \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

si es un muelle ideal cumpliría la ley de Hooke:

$$F = -kx$$

El trabajo desarrollado (y por tanto la energía potencial) que tendríamos sería:

$$U_e = - \int \vec{F} \cdot d\vec{x} = - \int -kx dx = \frac{1}{2}kx^2.$$

Las unidades están en julios. La k sería la constante elástica del muelle o del campo de fuerzas.

ENERGÍA DE DEFORMACIÓN

La energía de deformación (caso lineal): en este caso la función escalar que da el campo de tensiones es la energía libre de Helmholtz por unidad de volumen, f , que representa la energía de deformación. Para un sólido elástico lineal e isótropo, la energía potencial elástica en función de las deformaciones ϵ_{ij} y la temperatura la energía libre de un cuerpo deformado viene dada por:

(1)

$$\begin{cases} f(\epsilon_{ij}, T) = \lambda(T) \left(\sum_{i=1}^3 \epsilon_{ii} \right)^2 + 2\mu(T) \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon_{ij}^2 \\ f(\epsilon_{ij}, T) = \lambda(T) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz})^2 + 2\mu(T) (\epsilon_{xx} + \epsilon_{xy} + \dots + \epsilon_{zy} + \epsilon_{zz})^2 \end{cases}$$

Donde $\lambda(T), \mu(T)$ son constantes elásticas llamadas coeficientes de Lamé, que pueden depender de la temperatura, y están relacionadas con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson mediante las relaciones algebraicas:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

A partir de esta expresión (1) del potencial termodinámico de energía libre pueden obtenerse las tensiones a partir de las siguientes relaciones termodinámicas:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}} \right)_S = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \left(\sum_{k=1}^3 \epsilon_{kk} \right) + \frac{E}{(1 + \nu)} \epsilon_{ij}$$

Estas últimas ecuaciones se llaman ecuaciones de Lamé-Hooke y escritas más explícitamente en forma matricial tienen la forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{pmatrix} = \frac{E}{1 + \nu} \begin{pmatrix} 1 + \alpha & \alpha & \alpha & & & \\ \alpha & 1 + \alpha & \alpha & & & \\ \alpha & \alpha & 1 + \alpha & & & \\ & & & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ & & & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} \end{pmatrix}$$

Donde

$$\alpha := \frac{\nu}{1 - 2\nu}$$

ELECTRICIDAD

La electricidad (del griego ἤλεκτρον *elektron*, cuyo significado es ámbar) es el conjunto de fenómenos físicos relacionados con la presencia y flujo de cargas eléctricas. Se manifiesta en una gran variedad de fenómenos como los rayos, la electricidad estática, la inducción electromagnética o el flujo de corriente eléctrica.

Las cargas eléctricas producen campos electromagnéticos que interactúan con otras cargas.

La electricidad se manifiesta en varios fenómenos:

- Carga eléctrica: una propiedad de algunas partículas subatómicas, que determina su interacción electromagnética. La materia eléctricamente cargada produce y es influida por los campos electromagnéticos.
- Corriente eléctrica: un flujo o desplazamiento de partículas cargadas eléctricamente; se mide en amperios.
- Campo eléctrico: un tipo de campo electromagnético producido por una carga eléctrica incluso cuando no se está moviendo. El campo eléctrico produce una fuerza en toda otra carga, menor cuanto mayor sea la distancia que separa las dos cargas. Además las cargas en movimiento producen campos magnéticos.
- Potencial eléctrico: es la capacidad que tiene un campo eléctrico de realizar trabajo; se mide en voltios.
- Magnetismo: La corriente eléctrica produce campos magnéticos, y los campos magnéticos variables en el tiempo generan corriente eléctrica.

En ingeniería eléctrica, la electricidad se usa para generar:

- luz mediante lámparas
- calor, aprovechando el efecto Joule
- movimiento, mediante motores que transforman la energía eléctrica en energía mecánica
- señales mediante sistemas electrónicos, compuestos de circuitos eléctricos que incluyen componentes activos (tubos de vacío, transistores, diodos y circuitos integrados) y componentes pasivos como resistores, inductores y condensadores.

El fenómeno de la electricidad ha sido estudiado desde la antigüedad, pero su estudio científico sistemático comenzó en los siglos XVII y XVIII. A finales del siglo XIX los ingenieros lograron aprovecharla para uso residencial e industrial. La rápida expansión de la tecnología eléctrica en esta época transformó la industria y la sociedad. La electricidad es una forma de energía tan versátil que tiene variadas aplicaciones, por ejemplo: transporte, climatización, iluminación, computación entre otras.

CONCEPTOS

CARGA ELÉCTRICA

La carga eléctrica es una propiedad de la materia que produce una fuerza cuando tiene cerca otra materia cargada eléctricamente. La carga se origina en el átomo, el cual tiene portadores muy comunes que son el electrón y el protón. Es una cantidad conservadora, es decir, la carga neta de un sistema aislado se mantendrá constante, a menos que una carga externa se desplace a ese sistema. En el sistema, la carga puede transferirse entre los cuerpos por contacto directo, o al pasar por un material conductor, como un cable.[] El término electricidad estática hace referencia a la presencia de carga en un cuerpo, por lo general causado por que dos materiales distintos se frotan entre sí, transfiriéndose carga uno al otro.

La presencia de carga da lugar a la fuerza electromagnética: una carga ejerce una fuerza sobre las otras, un efecto que era conocido en la antigüedad, pero no comprendido. Una bola liviana, suspendida de un hilo, podía cargarse al contacto con una barra de vidrio cargada previamente por fricción con un tejido. Se encontró que si una bola similar se cargaba con la misma barra de vidrio, se repelían entre sí. Este fenómeno fue investigado a finales del siglo XVIII por Charles-Augustin de Coulomb, que dedujo que la carga se manifiesta de dos formas opuestas. Este descubrimiento trajo el conocido axioma "objetos con la misma polaridad se repelen y con diferente polaridad se atraen".

La fuerza actúa en las partículas cargadas entre sí, y además la carga tiene una tendencia a extenderse sobre una superficie conductora. La magnitud de la fuerza electromagnética, ya

sea atractiva o repulsiva, se expresa por la ley de Coulomb, que relaciona la fuerza con el producto de las cargas y tiene una relación inversa al cuadrado de la distancia entre ellas. La fuerza electromagnética es muy fuerte, la segunda después de la interacción nuclear fuerte, con la diferencia que esa fuerza opera sobre todas las distancias. En comparación con la débil fuerza gravitacional, la fuerza electromagnética que aleja a dos electrones es 10^{42} veces más grande que la atracción gravitatoria que los une.

Las cargas de los electrones y de los protones tienen signos contrarios, además una carga puede ser expresada como positiva o negativa. Por convención, la carga que tiene electrones se asume negativa y la de los protones positiva, una costumbre que empezó con el trabajo de Benjamin Franklin. La cantidad de carga está dada por el símbolo Q y se expresa en culombios. Los electrones tienen la misma carga de aproximadamente -1.6022×10^{-19} culombios. El protón tiene una carga que es igual y opuesta $+1.6022 \times 10^{-19}$ coulombios. La carga no sólo está presente en la materia, sino también por la antimateria, cada antipartícula tiene una carga igual y opuesta a su correspondiente partícula.

CORRIENTE ELÉCTRICA

Se conoce como corriente eléctrica al movimiento de cargas eléctricas. La corriente puede estar producida por cualquier partícula cargada eléctricamente en movimiento; lo más frecuente es que sean electrones, pero cualquier otra carga en movimiento produce una corriente. La intensidad de una corriente eléctrica se mide en amperios, cuyo símbolo es A. Históricamente, la corriente eléctrica se definió como un flujo de cargas positivas y se fijó como sentido convencional de circulación de la corriente el flujo de cargas desde el polo positivo al negativo. Más adelante se observó, que en los metales los portadores de carga son electrones, con carga negativa, y que se desplazan en sentido contrario al convencional. Lo cierto es que, dependiendo de las condiciones, una corriente eléctrica puede consistir de un flujo de partículas cargadas en una dirección, o incluso en ambas direcciones al mismo tiempo. La convención positivo-negativo es ampliamente usada para simplificar esta situación.

El proceso por el cual la corriente eléctrica circula por un material se llama conducción eléctrica, y su naturaleza varía dependiendo de las partículas cargadas y el material por el cual están circulando. Son ejemplos de corrientes eléctricas la conducción metálica, donde los electrones recorren un conductor eléctrico, como el metal, y la electrólisis, donde los iones (átomos cargados) fluyen a través de líquidos. Mientras que las partículas pueden moverse muy despacio, algunas veces con una velocidad media de deriva de sólo fracciones de milímetro por segundo, el campo eléctrico que las controla se propaga cerca a la velocidad de la luz, permitiendo que las señales eléctricas se transmitan rápidamente por los cables.

La corriente produce muchos efectos visibles, que han hecho que se reconozca su presencia a lo largo de la historia. En 1800, Nicholson y Carlisle descubrieron que el agua podía descomponerse por la corriente de una pila voltaica en un proceso que se conoce como electrólisis; trabajo que posteriormente fue ampliado por Michael Faraday en 1833. La corriente a través de una resistencia eléctrica produce un aumento de la temperatura, un efecto que James Prescott Joule estudió matemáticamente en 1840.

CAMPO ELÉCTRICO

El concepto de campo eléctrico fue introducido por Michael Faraday. Un campo eléctrico se crea por un cuerpo cargado en el espacio que lo rodea, y produce una fuerza que ejerce sobre otras cargas que están ubicadas en el campo. Un campo eléctrico actúa entre dos cargas de modo muy parecido al campo gravitacional que actúa sobre dos masas, y como tal, se extiende hasta el infinito y su valor es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Sin embargo, hay una diferencia importante: así como la gravedad siempre actúa como atracción, que el campo eléctrico puede producir atracción o repulsión. Si un cuerpo grande como un planeta no tiene carga neta, el campo eléctrico a una distancia determinada es cero. Por ello la gravedad es la fuerza dominante en el universo, a pesar de ser mucho más débil.

Un campo eléctrico varía en el espacio, y su fuerza en cualquier punto se define como la fuerza (por unidad de carga) que se necesita para que una carga esté inmóvil en ese punto. La carga de prueba debe de ser insignificante para evitar que su propio campo afecte el campo principal y también debe ser estacionaria para evitar el efecto de los campos magnéticos. Como el campo eléctrico se define en términos de fuerza, y una fuerza es un vector, entonces el campo eléctrico también es un vector, con magnitud y dirección. Específicamente, es un campo vectorial.

POTENCIAL ELÉCTRICO

El concepto de potencial eléctrico tiene mucha relación con el campo eléctrico. Una carga pequeña ubicada en un campo eléctrico experimenta una fuerza, y para haber llevado esa carga a ese punto en contra de la fuerza se necesitó trabajo. El potencial eléctrico en cualquier punto se define como la energía requerida para mover una carga de prueba ubicada en el infinito a ese punto. Por lo general se mide en voltios, donde un voltio es el potencial en el que un julio (unidad) de trabajo debe gastarse para traer una carga de un culombio del infinito. Esta definición formal de potencial tiene una aplicación práctica, aunque un concepto más útil es el de diferencia de potencial, y es la energía requerida para mover una carga entre dos puntos específicos. El campo eléctrico tiene la propiedad especial de ser conservativo, es decir que no importa la trayectoria realizada por la carga de prueba; todas las trayectorias de dos puntos específicos consumen la misma energía, y además con un único valor de diferencia de potencial.

ELECTROMAGNETISMO

Se denomina electromagnetismo a la teoría física que unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos son obra de Faraday, pero fueron formulados por primera vez de modo completo por Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales, conocidas como ecuaciones de Maxwell, que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales: densidad de carga eléctrica, corriente eléctrica, desplazamiento eléctrico y corriente de desplazamiento.

A principios del siglo XIX Ørsted encontró evidencia empírica de que los fenómenos magnéticos y eléctricos estaban relacionados. A partir de esa base Maxwell unificó en 1861 los trabajos de físicos como Ampère, Sturgeon, Henry, Ohm y Faraday, en un conjunto de ecuaciones que describían ambos fenómenos como uno solo, el fenómeno electromagnético.

Se trata de una teoría de campos; las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales y son dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los que intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre la materia.

Las ecuaciones de Maxwell describen los campos eléctricos y magnéticos como manifestaciones de un solo campo electromagnético. Además, explican la naturaleza ondulatoria de la luz como parte de una onda electromagnética. Al contar con una teoría unificada consistente que describiera estos dos fenómenos antes separados, se pudieron realizar varios experimentos novedosos e inventos muy útiles, como el generador de corriente alterna inventado por Tesla. El éxito predictivo de la teoría de Maxwell y la búsqueda de una interpretación coherente con el experimento de Michelson y Morley llevó a Einstein a formular la teoría de la relatividad, que se apoyaba en algunos resultados previos de Lorentz y Poincaré.

Ecuaciones de Maxwell, en su forma diferencial	
Nombre de la ley	Forma diferencial
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_f$
Ley de Gauss para el magnetismo o inexistencia del monopolo magnético	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Ecuación de Maxwell-Faraday (ley de Faraday)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

Ley de Ampère-Maxwell	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
-----------------------	--

CIRCUITOS

Un circuito eléctrico es una interconexión de componentes eléctricos tales que la carga eléctrica fluye en un camino cerrado, por lo general para ejecutar alguna tarea útil. Los componentes en un circuito eléctrico pueden ser muy variados, puede tener elementos como resistores, capacitores, interruptores, transformadores y electrónicos. Los circuitos electrónicos contienen componentes activos, normalmente semiconductores, exhibiendo un comportamiento no lineal, necesitando análisis complejos. Los componentes eléctricos más simples son los pasivos y lineales.

El comportamiento de los circuitos eléctricos que contienen solamente resistencias y fuentes electromotrices de corriente continua está gobernado por las Leyes de Kirchoff. Para estudiarlo, el circuito se descompone en mallas eléctricas, estableciendo un sistema de ecuaciones lineales cuya resolución brinda los valores de los voltajes y corrientes que circulan entre sus diferentes partes.

La resolución de circuitos de corriente alterna requiere la ampliación del concepto de resistencia eléctrica, ahora ampliado por el de impedancia para incluir los comportamientos de bobinas y condensadores. La resolución de estos circuitos puede hacerse con generalizaciones de las leyes de Kirchoff, pero requiere usualmente métodos matemáticos avanzados, como el de Transformada de Laplace, para describir los comportamientos transitorios y estacionarios de los mismos.

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES

ORIGEN MICROSCÓPICO

La posibilidad de transmitir corriente eléctrica en los materiales depende de la estructura e interacción de los átomos que los componen. Los átomos están constituidos por partículas cargadas positivamente (los protones), negativamente (los electrones) y neutras (los neutrones). La conducción eléctrica en los conductores, semiconductores, y aislantes, se debe a los electrones de la órbita exterior o portadores de carga, ya que tanto los electrones interiores como los protones de los núcleos atómicos no pueden desplazarse con facilidad. Los materiales conductores por excelencia son metales, como el cobre, que usualmente tienen un único electrón en la última capa electrónica. Estos electrones pueden pasar con facilidad a átomos contiguos, constituyendo los electrones libres responsables del flujo de corriente eléctrica.

En todos los materiales sometidos a campos eléctricos se modifican, en mayor o menor grado, las distribuciones espaciales relativas de las cargas negativas y positivas. Este fenómeno se denomina polarización eléctrica y es más notorio en los aislantes eléctricos debido a que gracias a este fenómeno se impide liberar carga, y por lo tal no conducir, característica principal de estos materiales.

CONDUCTIVIDAD Y RESISTIVIDAD

La conductividad eléctrica es la propiedad de los materiales que cuantifica la facilidad con que las cargas pueden moverse cuando un material es sometido a un campo eléctrico. La resistividad es una magnitud inversa a la conductividad, aludiendo al grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos, dando una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor. Generalmente la resistividad de los metales aumenta con la temperatura, mientras que la de los semiconductores disminuye ante el aumento de la temperatura.

Los materiales se clasifican según su conductividad eléctrica o resistividad en conductores, dieléctricos, semiconductores y superconductores.

Conductores eléctricos. Son los materiales que, puestos en contacto con un cuerpo cargado de electricidad, transmiten ésta a todos los puntos de su superficie. Los mejores conductores eléctricos son los metales y sus aleaciones. Existen otros materiales, no metálicos, que también poseen la propiedad de conducir la electricidad, como son el grafito, las soluciones salinas (por ejemplo, el agua de mar) y cualquier material en estado de plasma. Para el transporte de la energía eléctrica, así como para cualquier instalación de uso doméstico o industrial, el metal más empleado es el cobre en forma de cables de uno o varios hilos. Alternativamente se emplea el aluminio, metal que si bien tiene una conductividad eléctrica del orden del 60 % de la del cobre es, sin embargo, un material mucho menos denso, lo que favorece su empleo en líneas de transmisión de energía eléctrica en las redes de alta tensión. Para aplicaciones especiales se utiliza como conductor el oro.

Dieléctricos. Son los materiales que no conducen la electricidad, por lo que pueden ser utilizados como aislantes. Algunos ejemplos de este tipo de materiales son vidrio, cerámica, plásticos, goma, mica, cera, papel, madera seca, porcelana, algunas grasas para uso industrial y electrónico y la baquelita. Aunque no existen materiales absolutamente aislantes o conductores, sino mejores o peores conductores, son materiales muy utilizados para evitar cortocircuitos (forrando con ellos los conductores eléctricos, para mantener alejadas del usuario determinadas partes de los sistemas eléctricos que, de tocarse accidentalmente cuando se encuentran en tensión, pueden producir una descarga) y para confeccionar aisladores (elementos utilizados en las redes de distribución eléctrica para fijar los conductores a sus soportes sin que haya contacto eléctrico). Algunos materiales, como el aire o el agua, son aislantes bajo ciertas condiciones pero no para otras. El aire, por ejemplo, es aislante a temperatura ambiente pero, bajo condiciones de frecuencia de la señal y potencia relativamente bajas, puede convertirse en conductor.

La conductividad se designa por la letra griega sigma minúscula (σ) y se mide en siemens por metro, mientras que la resistividad se designa por la letra griega *rho* minúscula (ρ) y se mide en ohms por metro ($\Omega\cdot m$, a veces también en $\Omega\cdot mm^2/m$).

CARGA ELÉCTRICA

La carga eléctrica es una propiedad física intrínseca de algunas partículas subatómicas que se manifiesta mediante fuerzas de atracción y repulsión entre ellas. La materia cargada eléctricamente es influida por los campos electromagnéticos, siendo a su vez, generadora de ellos. La denominada interacción electromagnética entre carga y campo eléctrico es una de las cuatro interacciones fundamentales de la física. Desde el punto de vista del modelo estándar la carga eléctrica es una medida de la capacidad que posee una partícula para intercambiar fotones.

Una de las principales características de la carga eléctrica es que, en cualquier proceso físico, la carga total de un sistema aislado siempre se conserva. Es decir, la suma algebraica de las cargas positivas y negativas no varía en el tiempo. $Q_i = Q_f$

La carga eléctrica es de naturaleza discreta, fenómeno demostrado experimentalmente por Robert Millikan. Por razones históricas, a los electrones se les asignó carga negativa: -1 , también expresada $-e$. Los protones tienen carga positiva: $+1$ o $+e$. A los quarks se les asigna carga fraccionaria: $\pm 1/3$ o $\pm 2/3$, aunque no se los ha podido observar libres en la naturaleza.

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio o coulomb (símbolo C). Se define como la cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un conductor eléctrico en un segundo, cuando la corriente eléctrica es de un amperio, y se corresponde con la carga de $6,241\ 509 \times 10^{18}$ electrones aproximadamente.

NATURALEZA DE LA CARGA

La carga eléctrica es una propiedad intrínseca de la materia que se presenta en dos tipos. Éstas llevan ahora el nombre con las que Benjamin Franklin las denominó: cargas positivas y negativas. Cuando cargas del mismo tipo se encuentran se repelen y cuando son diferentes se atraen. Con el advenimiento de la teoría cuántica relativista, se pudo demostrar formalmente que las partículas, además de presentar carga eléctrica (sea nula o no), presentan un momento magnético intrínseco, denominado *espín*, que surge como consecuencia de aplicar la teoría de la relatividad especial a la mecánica cuántica.

CARGA ELÉCTRICA ELEMENTAL

Las investigaciones actuales de la física apuntan a que la carga eléctrica es una propiedad cuantizada. La unidad más elemental de carga se encontró que es la carga que tiene el electrón, es decir alrededor de $1,602\ 176\ 487(40) \times 10^{-19}$ culombios y es conocida como carga elemental. El valor de la carga eléctrica de un cuerpo, representada como q o Q , se mide según el número de electrones que posea en exceso o en defecto.

En el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga eléctrica se denomina culombio (símbolo C) y se define como *la cantidad de carga que a la distancia de 1 metro ejerce sobre otra cantidad de carga igual, la fuerza de 9×10^9 N.*

Un culombio corresponde a la carga de $6,241\ 509 \times 10^{18}$ electrones. El valor de la carga del electrón fue determinado entre 1910 y 1917 por Robert Andrews Millikan y en la actualidad su valor en el Sistema Internacional de acuerdo con la última lista de constantes del CODATA publicada es:

$$e = \frac{1C}{6,241509 \times 10^{18}} = 1,602176 \times 10^{-19}C$$

Como el culombio puede no ser manejable en algunas aplicaciones, por ser demasiado grande, se utilizan también sus submúltiplos:

$$1 \text{ miliculombio} = \frac{1C}{1.000} = 1mC$$

$$1 \text{ microculombio} = \frac{1C}{1.000.000} = 1\mu C$$

Frecuentemente se usa también el sistema CGS cuya unidad de carga eléctrica es el Franklin (Fr). El valor de la carga elemental es entonces de aproximadamente $4,803 \times 10^{-10}$ Fr.

PROPIEDADES DE LAS CARGAS

PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA CARGA

En concordancia con los resultados experimentales, el *principio de conservación de la carga* establece que no hay destrucción ni creación neta de carga eléctrica, y afirma que en todo proceso electromagnético la carga total de un sistema aislado se conserva.

En un proceso de electrización, el número total de protones y electrones no se altera, sólo existe una separación de las cargas eléctricas. Por tanto, no hay destrucción ni creación de carga eléctrica, es decir, la carga total se conserva. Pueden aparecer cargas eléctricas donde antes no había, pero siempre lo harán de modo que la carga total del sistema permanezca constante. Además esta conservación es local, ocurre en cualquier región del espacio por pequeña que sea.

Al igual que las otras leyes de conservación, la conservación de la carga eléctrica está asociada a una simetría del lagrangiano, llamada en física cuántica invariancia gauge. Así por el teorema de Noether a cada simetría del lagrangiano asociada a un grupo uniparamétrico de transformaciones que dejan el lagrangiano invariante le corresponde una magnitud conservada. La conservación de la carga implica, al igual que la conservación de la masa, que en cada punto del espacio se satisface una ecuación de continuidad que relaciona la derivada de la densidad de carga eléctrica con la divergencia del vector

densidad de corriente eléctrica, dicha ecuación expresa que el cambio neto en la densidad de carga ρ dentro de un volumen prefijado V es igual a la integral de la densidad de corriente eléctrica \mathbf{J} sobre la superficie S que encierra el volumen, que a su vez es igual a la intensidad de corriente eléctrica I :

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = I = -\frac{\partial Q}{\partial t}$$

Esta propiedad se conoce como *cuantización de la carga* y el valor fundamental corresponde al valor de carga eléctrica que posee el electrón y al cual se lo representa como e . Cualquier carga q que exista físicamente, puede escribirse como $N \times e$ siendo N un número entero, positivo o negativo.

Por convención se representa a la carga del electrón como $-e$, para el protón $+e$ y para el neutrón, 0 . La física de partículas postula que la carga de los quarks, partículas que componen a protones y neutrones toman valores fraccionarios de esta carga elemental. Sin embargo, nunca se han observado quarks libres y el valor de su carga en conjunto, en el caso del protón suma $+e$ y en el neutrón suma 0 .

Aunque no tenemos una explicación suficientemente completa de porqué la carga es una magnitud cuantizada, que sólo puede aparecer en múltiplos de la carga elemental, se han propuestos diversas ideas: Paul Dirac mostró que si existe un monopolio magnético la carga eléctrica debe estar cuantizada.

En el contexto de la teoría de Kaluza-Klein, Oskar Klein encontró que si se interpretaba el campo electromagnético como un efecto secundario de la curvatura de un espacio tiempo de topología $\mathcal{M} \times S^1$, entonces la compacidad de S^1 comportaría que el momento lineal según la quinta dimensión estaría cuantizado y de ahí se seguía la cuantización de la carga. La existencia de cargas fraccionarias en el modelo de quarks, complica el panorama, ya que el modelo estándar no aclara porqué las cargas fraccionarias no pueden ser libres. Y sólo pueden ser libres cargas que son múltiplos enteros de la carga elemental.

DENSIDAD DE CARGA ELÉCTRICA

Se llama densidad de carga eléctrica a la cantidad de carga eléctrica que se encuentra en una línea, superficie o volumen. Por lo tanto se distingue en estos tres tipos de densidad de carga.

Se representaría con las letras griegas lambda (λ) para densidad de carga lineal, sigma (σ) para densidad de carga superficial y rho (ρ) para densidad de carga volumétrica. Puede haber densidades de carga tanto positiva como negativa. No se debe confundir con la densidad de portadores de carga.

A pesar de que las cargas eléctricas son cuantizadas con q y, por ende, múltiplos de una carga elemental, en ocasiones las cargas eléctricas en un cuerpo están tan cercanas entre sí, que se puede suponer que están distribuidas de manera uniforme por el cuerpo del cual forman parte. La característica principal de estos cuerpos es que se los puede estudiar como si fueran continuos, lo que hace más fácil, sin perder generalidad, su tratamiento. Se distinguen tres tipos de densidad de carga eléctrica: lineal, superficial y volumétrica.

DENSIDAD DE CARGA LINEAL

Se usa en cuerpos lineales como, por ejemplo hilos.

$$\lambda = \frac{Q}{L}$$

Donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y L es la longitud. En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se mide en C/m (culombios por metro).

DENSIDAD DE CARGA SUPERFICIAL

Se emplea para superficies, por ejemplo una plancha metálica delgada como el *papel de aluminio*.

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y S es la superficie. En el SI se mide en C/m^2 (culombios por metro cuadrado).

DENSIDAD DE CARGA VOLUMÉTRICA

Se emplea para cuerpos que tienen volumen.

$$\rho = \frac{Q}{V}$$

donde Q es la carga encerrada en el cuerpo y V el volumen. En el SI se mide en C/m^3 (culombios por metro cúbico).

FORMAS PARA CAMBIAR LA CARGA ELÉCTRICA DE LOS CUERPOS

Se denomina electrización al efecto de ganar o perder cargas eléctricas, normalmente electrones, producido por un cuerpo eléctricamente neutro. Los tipos de electrificación son los siguientes:

- Electrización por contacto: Cuando ponemos un cuerpo cargado en contacto con un conductor se puede dar una transferencia de carga de un cuerpo al otro y así el conductor queda cargado, positivamente si cedió electrones o negativamente si los ganó.
- Electrización por fricción: Cuando frotamos un aislante con cierto tipo de materiales, algunos electrones son transferidos del aislante al otro material o

viceversa, de modo que cuando se separan ambos cuerpos quedan con cargas opuestas.

- Carga por inducción: Si acercamos un cuerpo cargado negativamente a un conductor aislado, la fuerza de repulsión entre el cuerpo cargado y los electrones de valencia en la superficie del conductor hace que estos se desplacen a la parte más alejada del conductor al cuerpo cargado, quedando la región más cercana con una carga positiva, lo que se nota al haber una atracción entre el cuerpo cargado y esta parte del conductor. Sin embargo, la carga neta del conductor sigue siendo cero (neutro).
- Carga por el Efecto Fotoeléctrico: Sucede cuando se liberan electrones en la superficie de un conductor al ser irradiado por luz u otra radiación electromagnética.
- Carga por Electrólisis: Descomposición química de una sustancia, producida por el paso de una corriente eléctrica continua.
- Carga por Efecto Termoeléctrico: Significa producir electricidad por la acción del calor.

CAMPO ELECTROSTÁTICO

Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para influir entre ellas y por ello las fuerzas eléctricas son consideradas *fuerzas de acción a distancia*. En virtud de ello se recurre al concepto de campo electrostático para facilitar la descripción, en términos físicos, de la influencia que una o más cargas ejercen sobre el espacio que las rodea.

Interacciones entre dos cargas Q y q

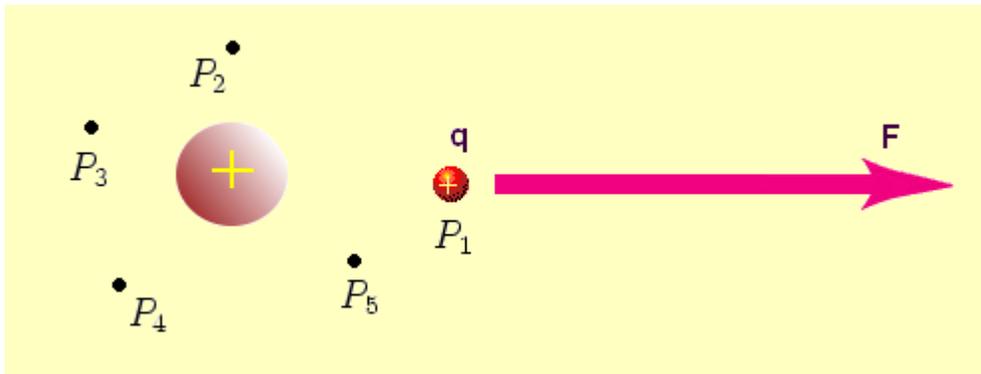


Figura 16. Interacciones entre Q y q . http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fuerza_el%C3%A9ctrica.PNG

Considérese una carga Q fija en una determinada posición (figura). Si se coloca otra carga q en un punto P_1 a cierta distancia de Q , aparecerá una fuerza eléctrica actuando sobre q .

Si la carga q se ubica en otros puntos cualesquiera, tales como P_2, P_3 , etc., en cada uno de ellos también estaría actuando sobre q una fuerza eléctrica producida por Q . Para describir este hecho, se dice que en cualquier punto del espacio en torno a Q existe un campo eléctrico originado por esta carga.

Obsérvese en la figura que el campo eléctrico en los puntos P_1, P_2, P_3 , etc., está originado por Q , la cual podrá ser tanto positiva (la de la figura) como negativa. La carga q que es trasladada de un punto a otro para verificar si en ellos existe o no un campo eléctrico, se denomina carga de prueba.

El campo eléctrico puede representarse, en cada punto del espacio, por un vector, usualmente simbolizado por \vec{E} y que se denomina vector campo eléctrico.

El módulo del vector en un punto dado se denomina intensidad del campo eléctrico en ese punto. Para definir este módulo, considérese la carga Q de la figura, generando un campo eléctrico en el espacio que la rodea. Colocando una carga de prueba q en un punto P_1 , se verá que sobre ella actúa una fuerza eléctrica. La intensidad del campo eléctrico en P_1 estará dada, por definición, por la expresión:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

La expresión anterior permite determinar la intensidad del campo eléctrico en cualquier otro punto, tales como P_2, P_3 , etc. El valor de E será diferente para cada uno de ellos.

De $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ obtenemos $\vec{F} = \vec{E}q$, lo cual significa que si se conoce la intensidad del campo eléctrico en un punto, es posible calcular, usando la expresión anterior, el módulo de la fuerza que actúa sobre una carga cualquiera ubicada en aquel punto.

Campo eléctrico creado por una carga puntual

El campo que crea una carga puntual Q se deduce a partir de la ley de Coulomb.

Consideremos una carga de prueba Q_0 , colocada a una distancia r de una carga punto Q .

La fuerza entre ambas cargas, medida por un observador en reposo respecto a la carga Q estará dada por:

$$\vec{F} = \frac{Q_0 Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r$$

La intensidad del campo eléctrico en el sitio en que se coloca la carga de prueba está dada por:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$$

y por lo tanto resulta:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{u}_r = K \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

donde \vec{u}_r es un vector unitario en la dirección radial, $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2 / Nm^2$ es la llamada permitividad del vacío y K es la constante de Coulomb cuyo valor es $8,98 \times 10^9 Nm^2 / C^2$. Donde se tienen las equivalencias $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K}$ respectivamente. La unidad de intensidad de campo eléctrico es $[N/C]$ (Newton por Culombio) o $[V/m]$ (Voltio por Metro).

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

La influencia del campo producido por una carga aislada se puede generalizar al caso de un sistema formado por más de una carga y luego extenderse al estudio de un cuerpo cargado. Experimentalmente se verifica que las influencias de las cargas aisladas que constituyen un sistema son aditivas, o en otras palabras, se suman o superponen vectorialmente. Así, la intensidad de campo E en un punto cualquiera del espacio que rodea a varias cargas será la suma vectorial de las intensidades de los campos debidos a cada una de las cargas individualmente consideradas. Matemáticamente se puede considerar la siguiente ecuación:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = K \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\|\vec{r}^i\|^2} \hat{r}^i$$

Donde K es la constante arbitraria; n es la cantidad de cargas tenidas en cuenta; $\|\vec{r}^i\|$ es la magnitud del vector distancia entre el punto donde se quiere hallar el campo eléctrico total y la carga i ; y \hat{r}^i es el vector unitario formado de la misma manera.

Representación gráfica del campo eléctrico

Una forma muy útil de esquematizar gráficamente un campo es trazar líneas que vayan en la misma dirección que dicho campo en varios puntos. Esto se realiza a través de las *líneas de campo eléctrico*, que son unas líneas imaginarias que describen, si los hubiere, los cambios en dirección del campo eléctrico al pasar de un punto a otro, de tal modo que dichas líneas son tangentes, en cada punto del espacio donde está definido el campo eléctrico, a la dirección del campo eléctrico en ese punto.

Según la primera ley de Newton, la fuerza que actúa sobre una partícula produce un cambio en su velocidad; por lo tanto, el movimiento de una partícula cargada en una región dependerá de las fuerzas que actúen sobre ella en cada punto de dicha región.

Ahora considérese una carga q , situada en un punto sobre la que actúa una fuerza \vec{F} que es tangente a la línea de campo eléctrico en dicho punto. En vista de que las líneas del campo eléctrico varían en su densidad (están más o menos juntas) y dirección, podemos concluir

que la fuerza que experimenta una carga tiende a apartarla de la línea de campo eléctrico sobre la que se encuentra en cada instante.

En otras palabras, una carga bajo los efectos de un campo eléctrico no seguirá el camino de la línea de fuerza sobre la que se encontraba originalmente.

La relación entre las líneas de campo eléctrico (imaginarias) y el vector intensidad de campo, es la siguiente:

La tangente a una línea de fuerza en un punto cualquiera da la dirección de E en ese punto. El número de líneas de campo eléctrico por unidad de área de sección transversal es proporcional a la magnitud de E . Cuanto más cercanas estén las líneas, mayor será la magnitud de E .

No es obvio que sea posible dibujar un conjunto continuo de líneas que cumplan estos requisitos. De hecho, se encuentra que si la ley de Coulomb no fuera cierta, no sería posible hacerlo.

Si un elemento de superficie de área ΔA_n es atravesado por ΔN líneas y si la intensidad del campo eléctrico en el centro del elemento de superficie es E , se tiene que:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A_n} \propto E$$

El subíndice n indica que ΔA_n es normal a E . Para convertir esta proporcionalidad en ecuación se elige ϵ_0 como constante de proporcionalidad. Así, se espacian arbitrariamente las líneas de campo eléctrico de modo que, en cualquier punto, el número de líneas por unidad de superficie y la intensidad del campo eléctrico esté ligado por la relación:

$$\frac{\Delta N}{\Delta A_n} = \epsilon_0 E$$

Considérense, ahora, las líneas de campo eléctrico que salen de una carga puntual positiva q y una esfera de radio r arbitrario rodeando la carga y de modo que ésta se encuentre en el centro. La intensidad del campo eléctrico en todos los puntos de la superficie de esta esfera es:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

En consecuencia, el número de líneas por unidad de superficie es el mismo en todos los puntos de la superficie y está dado por:

$$\epsilon_0 E = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}$$

Las líneas de campo eléctrico atraviesan la superficie perpendicularmente puesto que E tiene una dirección radial. El área de la esfera es $4\pi r^2$, lo que implica que el número de líneas que atraviesan la superficie es:

$$N = \epsilon_0 A E = q$$

Esto demuestra que si el valor del exponente de r , en la ley de Coulomb, no fuera 2, el número de líneas de campo eléctrico no solo no estaría dado por el valor de q , también sería inversamente proporcional a alguna potencia de r y por ello sería imposible dibujar un conjunto continuo de líneas que cumplan los requisitos indicados más arriba.

Para la construcción de líneas de campo eléctrico se debe tener en cuenta lo siguiente:

A.- Por convención, las líneas deben partir de cargas positivas y terminar en cargas negativas y en ausencia de unas u otras deben partir o terminar en el infinito.

Una carga puntual positiva dará lugar a un mapa de líneas de campo eléctrico radiales, pues las fuerzas eléctricas actúan siempre en la dirección de la línea que une a las cargas interactuantes, y dirigidas hacia fuera porque una carga de prueba positiva se desplazaría en esa dirección. En el caso del campo debido a una carga puntual negativa el mapa de líneas de campo eléctrico sería análogo, pero dirigidas hacia ella ya que ése sería la dirección en que se desplazaría la carga positiva de prueba. Como consecuencia de lo anterior, en el caso

de los campos debidos a varias cargas, las líneas de campo eléctrico nacen siempre de las cargas positivas y por ello son denominadas manantiales y mueren en las negativas por lo que se les llama sumideros.

B.- Las líneas de campo eléctrico jamás pueden cruzarse.

Las líneas de campo eléctrico o de campo salen de una carga positiva o entran a una negativa. De lo anterior se desprende que de cada punto de la superficie de una esfera, suponiendo forma esférica para una carga, puede salir o entrar solo una línea de fuerza, en consecuencia entre dos cargas que interactúan solo puede relacionarse un punto de su superficie con solo un punto de la otra superficie, y ello es a través de una línea, y esa línea es la línea de fuerza.

Si se admitiera que dos líneas de campo eléctrico se intersequen, entonces se podría extender la superficie de la otra carga hacia el lugar donde se intersecan ambas líneas y se podría concluir que dos líneas entran o salen de una superficie de una carga eléctrica. Con esto se está contradiciendo lo postulado inicialmente. En consecuencia, es imposible que dos líneas de campo eléctrico se intersequen.

Por otra parte, si las líneas de campo eléctrico se cortaran, significaría que en dicho punto E poseería dos direcciones distintas, lo que contradice la definición de que a cada punto sólo le corresponde un valor único de intensidad de campo.

C.- El número de líneas de campo eléctrico que parten de una carga positiva o llegan a una carga negativa es proporcional a la cantidad de carga respectiva.

D.- Las líneas de campo eléctrico deben ser perpendiculares a las superficies de los objetos en los lugares donde conectan con ellas.

Esto se debe a que en las superficies de cualquier objeto, sin importar la forma, nunca se encuentran componentes de la fuerza eléctrica que sean paralelas a la superficie del mismo. Si fuera de otra manera, cualquier exceso de carga residente en la superficie comenzaría a

acelerar. Esto conduciría a la aparición de un flujo de carga en el objeto, lo cual nunca se observa en la electricidad estática.

Ya sea que las cargas ostenten el mismo signo o signo opuesto, las líneas de campo eléctrico se verán distorsionadas respecto de la forma radial que tendrían si las cargas estuvieran aisladas, de forma tal, que la distorsión es máxima en la zona central, o sea, en la región más cercana a ambas. Si las cargas tienen la misma magnitud, la representación resulta simétrica respecto de la línea media que las separa. En el caso opuesto, predominará la influencia de una de ellas dando lugar a una distribución asimétrica de líneas de campo eléctrico.

ECUACIÓN DE LAS LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO

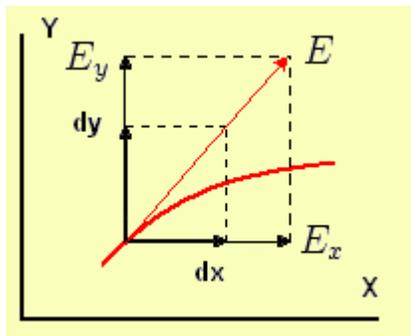


Figura 17. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ecuacion.PNG>

Siendo el campo tangente a las líneas de campo eléctrico, se cumple:

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z}$$

Ejemplo. Si tenemos una sola carga puntual, todas las líneas de campo son rectas que parten radialmente de la carga en las tres direcciones del espacio. Si nos limitamos a las líneas de campo contenidas en el plano cartesiano XY, el problema se simplifica y nos

queda la razón entre $\frac{E_y}{E_x}$ es $\frac{y}{x}$, de modo que:

$$\frac{dy}{y} = \frac{dx}{x} \Rightarrow \ln(y) = \ln(x) + C$$

siendo C la constante de integración. Este resultado se puede escribir como:

$$y = C'x \quad (C' = \exp(C))$$

que es la ecuación de una recta que pasa por el origen, como era de esperar.

COMPORTAMIENTO DE UNA CARGA PUNTO EN UN CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

Un campo eléctrico ejerce sobre una partícula cargada una fuerza $\vec{F} = \vec{E}q$

Esta fuerza produce una aceleración $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ siendo m la masa de la partícula.

PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PARALELAMENTE AL CAMPO

Considérese una partícula de masa m y carga q que se suelta a partir del reposo en un campo entre dos placas paralelas cargadas.

El movimiento es similar al de un cuerpo que cae en el campo gravitacional terrestre.

La aceleración está dada por $a = \frac{F}{m}$

Como $F = qE$, se cumple que $a = \frac{qE}{m}$

Aplicando las ecuaciones del movimiento uniformemente acelerado, como $v_0 = 0$, se tiene que:

$$v = at = \frac{qEt}{m}$$

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qEt^2}{2m}$$

$$v^2 = 2ay = \frac{2qEy}{m}$$

La energía cinética adquirida luego de recorrer una distancia y será;

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \left(\frac{2qEy}{m} \right) = qEy$$

PARTÍCULA MOVIÉNDOSE PERPENDICULARMENTE AL CAMPO

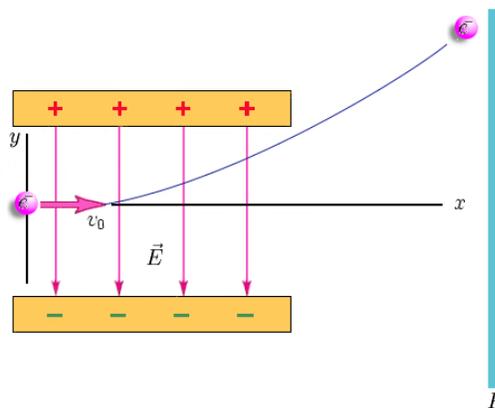


Figura 18. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trayectoria.png>

La figura muestra un electrón de masa m y carga e que es disparado con una velocidad u_0 perpendicularmente a un campo uniforme \vec{E} .

El movimiento es similar al de un proyectil disparado horizontalmente en el campo gravitacional terrestre. En consecuencia el movimiento horizontal x y el vertical y están dados por las expresiones:

$$x = v_0 t$$

$$y = y_0 + \frac{1}{2}at^2 = y_0 + \frac{eE}{2m}t^2$$

Sustituyendo a t se obtiene:

$$y = y_0 + \frac{eE}{2mv_0^2}x^2$$

que es la ecuación de la trayectoria.

Cuando el electrón sale de entre las placas, lo hace en una trayectoria recta tangente a la parábola en el punto de salida y puede hacerse llegar a una pantalla fluorescente P colocada a cierta distancia más allá de las placas.

ELECTROSCOPIO

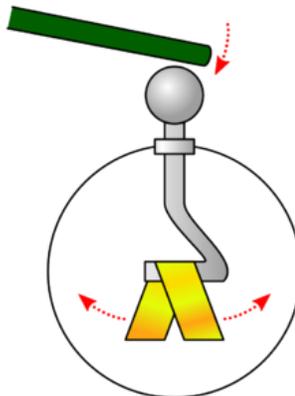


Figura 19. Esquema del funcionamiento del electroscopio.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electroscope.png>

El electroscopio es un instrumento que se utiliza para saber si un cuerpo está electrizado y el signo de su carga.

El electroscopio consiste en una varilla metálica vertical que tiene una esfera en la parte superior y en el extremo opuesto dos láminas de oro o de aluminio muy delgadas. La varilla

está sostenida en la parte superior de una caja de vidrio transparente con un armazón de cobre en contacto con tierra. Al acercar un objeto electrizado a la esfera, la varilla se electriza y las laminillas cargadas con igual signo de electricidad se repelen, separándose, siendo su divergencia una medida de la cantidad de carga que han recibido. La fuerza de repulsión electrostática se equilibra con el peso de las hojas. Si se aleja el objeto de la esfera, las láminas, al perder la polarización, vuelven a su posición normal.

Cuando un electroscopio se carga con un signo conocido, puede determinarse el tipo de carga eléctrica de un objeto aproximándolo a la esfera. Si las laminillas se separan significa que el objeto está cargado con el mismo tipo de carga que el electroscopio. De lo contrario, si se juntan, el objeto y el electroscopio tienen signos opuestos.

Un electroscopio pierde gradualmente su carga debido a la conductividad eléctrica del aire producida por su contenido en iones. Por ello la velocidad con la que se carga un electroscopio en presencia de un campo eléctrico o se descarga puede ser utilizada para medir la densidad de iones en el aire ambiente. Por este motivo, el electroscopio se puede utilizar para medir la radiación de fondo en presencia de materiales radiactivos. El electroscopio de hojuelas de oro fue inventado por William Gilbert en 1600.

Explicación de su funcionamiento

Un electroscopio es un dispositivo que permite detectar la carga de un objeto cargado aprovechando el fenómeno de separación de cargas por inducción.

Si acercamos un cuerpo desnudo cargado con carga positiva, por ejemplo un bolígrafo que ha sido frotado con un paño, las cargas negativas del conductor experimentan una fuerza atractiva hacia el bolígrafo. Por esta razón se acumulan en la parte más cercana a éste. Por el contrario las cargas positivas del conductor experimentan una fuerza de repulsión y por esto se acumulan en la parte más lejana al bolígrafo.

Lo que ha ocurrido es que las cargas se han desplazado, pero la suma de cargas positivas es igual a la suma de cargas negativas. Por lo tanto la carga neta del conductor sigue siendo nula.

Consideremos ahora que pasa en el electroscopio. Recordemos que un electroscopio está formado esencialmente por un par de hojas metálicas unidas en un extremo. Por ejemplo una tira larga de papel de aluminio doblada al medio.

Si acercamos el bolígrafo cargado al electroscopio, como se indica en la figura, la carga negativa será atraída hacia el extremo más cercano del bolígrafo, mientras que la carga positiva se acumulará en el otro extremo, es decir que se distribuirá entre las dos hojas del electroscopio.

La situación se muestra en la figura: los dos extremos libres del electroscopio quedaron cargados positivamente y como las cargas de un mismo signo se rechazan las hojas del electroscopio se separan.

Si ahora alejamos el bolígrafo, las cargas positivas y negativas del electroscopio vuelven a redistribuirse, la fuerza de repulsión entre las hojas desaparece y se juntan nuevamente.

¿Qué pasa si tocamos con un dedo el extremo del electroscopio mientras esta cerca del bolígrafo cargado? La carga negativa acumulada en ese extremo "pasará" a la mano y por lo tanto el electroscopio queda cargado positivamente. Debido a esto las hojas no se juntan cuando alejamos el bolígrafo.

LEY DE COULOMB

La ley de Coulomb puede expresarse como:

La magnitud de cada una de las fuerzas eléctricas con que interactúan dos cargas puntuales en reposo es directamente proporcional al producto de la magnitud de ambas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa y tiene la dirección de la línea que las une. La fuerza es de repulsión si las cargas son de igual signo, y de atracción si son de signo contrario.

DESARROLLO DE LA LEY

Charles-Augustin de Coulomb desarrolló la balanza de torsión con la que determinó las propiedades de la fuerza electrostática. Este instrumento consiste en una barra que cuelga de una fibra capaz de torcerse. Si la barra gira, la fibra tiende a hacerla regresar a su posición original, con lo que conociendo la fuerza de torsión que la fibra ejerce sobre la barra, se puede determinar la fuerza ejercida en un punto de la barra. La ley de Coulomb también conocida como ley de cargas tiene que ver con las cargas eléctricas de un material, es decir, depende de si sus cargas son negativas o positivas.

En la barra de la balanza, Coulomb colocó una pequeña esfera cargada y a continuación, a diferentes distancias, posicionó otra esfera también cargada. Luego midió la fuerza entre ellas observando el ángulo que giraba la barra.

Dichas mediciones permitieron determinar que:

La fuerza de interacción entre dos cargas q_1 y q_2 duplica su magnitud si alguna de las cargas dobla su valor, la triplica si alguna de las cargas aumenta su valor en un factor de tres, y así sucesivamente. Concluyó entonces que el valor de la fuerza era proporcional al producto de las cargas:

$$F \propto q_1 \quad \text{y} \quad F \propto q_2$$

en consecuencia:

$$F \propto q_1 q_2$$

Si la distancia entre las cargas es r , al duplicarla, la fuerza de interacción disminuye en un factor de 4 (2^2); al triplicarla, disminuye en un factor de 9 (3^2) y al cuadruplicar r , la fuerza entre cargas disminuye en un factor de 16 (4^2). En consecuencia, la fuerza de interacción entre dos cargas puntuales, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Asociando ambas relaciones:

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Finalmente, se introduce una constante de proporcionalidad para transformar la relación anterior en una igualdad:

$$F = \kappa \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

ENUNCIADO DE LA LEY

La ley de Coulomb es válida sólo en condiciones estacionarias, es decir, cuando no hay movimiento de las cargas o, como aproximación cuando el movimiento se realiza a velocidades bajas y en trayectorias rectilíneas uniformes. Es por ello que es llamada *fuerza electrostática*.

En términos matemáticos, la magnitud F de la fuerza que cada una de las dos cargas puntuales q_1 y q_2 ejerce sobre la otra separadas por una distancia d se expresa como:

$$F = \kappa \frac{|q_1 q_2|}{d^2}$$

Dadas dos cargas puntuales q_1 y q_2 separadas una distancia d en el vacío, se atraen o repelen entre sí con una fuerza cuya magnitud está dada por:

$$F = \kappa \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

La Ley de Coulomb se expresa mejor con magnitudes vectoriales:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2}{d^2} \mathbf{u}_d = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 q_2 (\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1)}{\|\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1\|^3}$$

donde \mathbf{u}_d es un vector unitario, siendo su dirección desde la carga que produce la fuerza hacia la carga que la experimenta.

Al aplicar esta fórmula en un ejercicio, se debe colocar el signo de las cargas q_1 o q_2 , según sean éstas positivas o negativas.

El exponente (de la distancia: d) de la Ley de Coulomb es, hasta donde se sabe hoy en día, exactamente 2. Experimentalmente se sabe que, si el exponente fuera de la forma $(2 + \delta)$, entonces $|\delta| < 10^{-16}$.

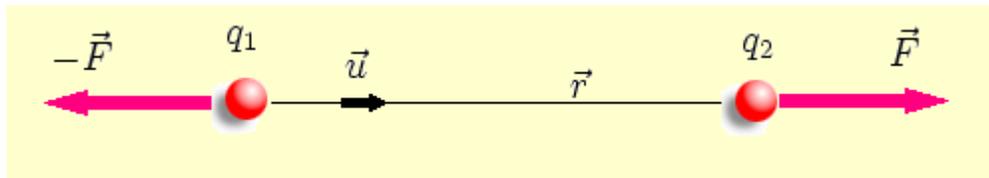


Figura 20. Representación gráfica de la Ley de Coulomb para dos cargas del mismo signo. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ley_de_Coulomb.PNG

Obsérvese que esto satisface la tercera de la ley de Newton debido a que implica que fuerzas de igual magnitud actúan sobre q_1 y q_2 . La ley de Coulomb es una ecuación vectorial e incluye el hecho de que la fuerza actúa a lo largo de la línea de unión entre las cargas.

CONSTANTE DE COULOMB

La constante κ es la Constante de Coulomb y su valor para unidades SI es $\frac{1}{4\pi\epsilon}$ Nm²/C².

A su vez la constante $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ donde ϵ_r es la permitividad relativa, $\epsilon_r \geq 1$, y $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m es la permitividad del medio en el vacío.

Cuando el medio que rodea a las cargas no es el vacío hay que tener en cuenta la constante dieléctrica y la permitividad del material.

La ecuación de la ley de Coulomb queda finalmente expresada de la siguiente manera:

$$F = \kappa \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

La constante, si las unidades de las cargas se encuentran en Coulomb es la siguiente $K = 9 * 10^9 N * m^2 / C^2$ y su resultado será en sistema MKS (N/C). En cambio, si la unidad de las cargas están en UES (q), la constante se expresa de la siguiente forma $K = dyn * cm^2 / ues^2(q)$ y su resultado estará en las unidades CGS (D/UES(q)).

POTENCIAL DE COULOMB

La ley de Coulomb establece que la presencia de una carga puntual general induce en todo el espacio la aparición de un campo de fuerzas que decae según la ley de la inversa del cuadrado. Para modelizar el campo debido a varias cargas eléctricas puntuales estáticas puede usarse el principio de superposición dada la aditividad de las fuerzas sobre una partícula. Sin embargo, matemáticamente el manejo de expresiones vectoriales de ese tipo puede llegar a ser complicado, por lo que frecuentemente resulta más sencillo definir un potencial eléctrico. Para ello a una carga puntual q_1 se le asigna una función escalar o potencial de Coulomb ϕ_1 tal que la fuerza dada por la ley de Coulomb sea expresable como:

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \nabla \phi_1$$

De la ley de Coulomb se deduce que la función escalar que satisface la anterior ecuación es:

$$\phi_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_{q_1}\|}$$

Donde:

\mathbf{r} , es el vector posición genérico de un punto donde se pretende definir el potencial de Coulomb y \mathbf{r}_{q_1} , es el vector de posición de la carga eléctrica q_1 cuyo campo pretende caracterizarse por medio del potencial.

POTENCIAL ELÉCTRICO

El potencial eléctrico o potencial electrostático en un punto, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva q desde dicho punto hasta el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba. Dicho de otra forma, es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para traer una carga positiva unitaria q desde el punto de referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica a velocidad constante. Matemáticamente se expresa por:

$$V = \frac{W}{q}$$

El potencial eléctrico sólo se puede definir para un campo estático producido por cargas que ocupan una región finita del espacio. Para cargas en movimiento debe recurrirse a los potenciales de Liénard-Wiechert para representar un campo electromagnético que además incorpore el efecto de retardo, ya que las perturbaciones del campo eléctrico no se pueden propagar más rápido que la velocidad de la luz. Si se considera que las cargas están fuera de dicho campo, la carga no cuenta con energía y el potencial eléctrico equivale al trabajo necesario para llevar la carga desde el exterior del campo hasta el punto considerado. La unidad del Sistema Internacional es el voltio (V). Todos los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo potencial forman una superficie equipotencial. Una forma alternativa de ver al potencial eléctrico es que a diferencia de la energía potencial eléctrica o electrostática, él caracteriza sólo una región del espacio sin tomar en cuenta la carga que se coloca allí.

TRABAJO ELÉCTRICO Y ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Considérese una carga eléctrica puntual q en presencia de un campo eléctrico \vec{E} . La carga experimentará una fuerza eléctrica:

$$(1) \quad \vec{F} = q\vec{E}$$

Esta fuerza realizará un trabajo para trasladar la carga de un punto A a otro B, de tal forma que para producir un pequeño desplazamiento $d\vec{l}$ la fuerza eléctrica hará un trabajo diferencial dW expresado como:

$$(2) \quad dW = \vec{F} \cdot d\vec{l} = q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Por lo tanto, integrando la expresión (1) se obtiene el trabajo total realizado por el campo eléctrico:

$$(3) \quad W = \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

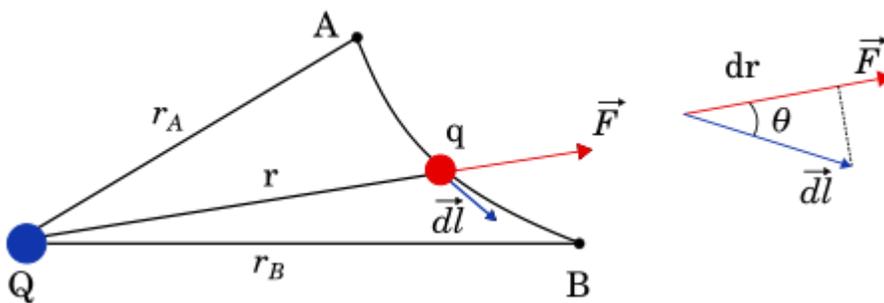


Figura 21. Trabajo eléctrico. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trabajoelectrico.svg>

Un caso particular de la fórmula anterior, es el de un campo eléctrico definido creado por una carga puntual estática Q . Sea una carga puntual q que recorre una determinada trayectoria A - B en las inmediaciones de una carga Q tal y como muestra la figura. Siendo

dr el desplazamiento infinitesimal de la carga q en la dirección radial, el trabajo diferencial dW se puede expresar así:

$$(4) \quad W = \int \vec{F} \cdot d\vec{l} = \int F dl \cos(\theta) = \int F dr$$

Para calcular el trabajo total, se integra entre la posición inicial A, distante r_A de la carga Q y la posición final B, distante r_B de la carga Q :

$$(5) \quad W = \int_{r_A}^{r_B} F dr = \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} dr = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

De la expresión (5) se concluye que el trabajo W no depende de la trayectoria seguida por la partícula, sólo depende de la posición inicial y final, lo cual implica que la fuerza eléctrica \vec{F} es una fuerza conservativa. Por lo tanto se puede definir una energía potencial que permite calcular el trabajo más fácilmente:

$$(6) \quad E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}$$

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica para desplazar una partícula entre A y B será:

$$(7) \quad W = -\Delta E_p = E_{pA} - E_{pB}$$

Usualmente, el nivel cero de energía potencial se suele establecer en el infinito, es decir, si y sólo si

$r = \infty \rightarrow E_p = 0$ (esto tiene que ver con la elección de la constante de integración en la fórmula del potencial).

DIFERENCIA DE POTENCIAL ELÉCTRICO

Considérese una carga de prueba positiva q_0 en presencia de un campo eléctrico y que se traslada desde el punto A al punto B conservándose siempre en equilibrio. Si se mide el trabajo que debe hacer el agente que mueve la carga, la *diferencia de potencial eléctrico* se define como:

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0}$$

El trabajo W_{AB} puede ser positivo, negativo o nulo. En estos casos el potencial eléctrico en B será respectivamente mayor, menor o igual que el potencial eléctrico en A. La unidad en el SI para la diferencia de potencial que se deduce de la ecuación anterior es Joule/Coulomb y se representa mediante una nueva unidad, el voltio, esto es: 1 voltio = 1 joule/coulomb.

Un electronvoltio (eV) es la energía adquirida para un electrón al moverse a través de una diferencia de potencial de 1 V, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Algunas veces se necesitan unidades mayores de energía, y se usan los kiloelectronvoltios (keV), megaelectronvoltios (MeV) y los gigaelectronvoltios (GeV). ($1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$, y $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$).

Aplicando esta definición a la teoría de circuitos y desde un punto de vista más intuitivo, se puede decir que el potencial eléctrico en un punto de un circuito representa la energía que posee cada unidad de carga al paso por dicho punto. Así, si dicha unidad de carga recorre un circuito constituyéndose en corriente eléctrica, ésta irá perdiendo su energía (potencial o voltaje) a medida que atraviesa los diferentes componentes del mismo. Obviamente, la energía perdida por cada unidad de carga se manifestará como trabajo realizado en dicho circuito (calentamiento en una resistencia, luz en una lámpara, movimiento en un motor, etc.). Por el contrario, esta energía perdida se recupera al paso por fuentes generadoras de tensión. Es conveniente distinguir entre potencial eléctrico en un punto (energía por unidad de carga situada en ese punto) y corriente eléctrica (número de cargas que atraviesan dicho punto por segundo).

Usualmente se escoge el punto A a una gran distancia (en rigor el infinito) de toda carga y el potencial eléctrico V_A a esta distancia infinita recibe arbitrariamente el valor cero. Esto

permite definir el potencial eléctrico en un punto poniendo $V_A = 0$ y eliminando los índices:

$$V = \frac{W}{q_0}$$

siendo W el trabajo que debe hacer un agente exterior para mover la carga de prueba q_0 desde el infinito al punto en cuestión.

Obsérvese que la igualdad planteada depende de que se da arbitrariamente el valor cero al potencial V_A en la posición de referencia (el infinito) el cual hubiera podido escogerse de cualquier otro valor así como también se hubiera podido seleccionar cualquier otro punto de referencia.

También es de hacer notar que según la expresión que define el potencial eléctrico en un punto, el potencial en un punto cercano a una carga positiva aislada es positivo porque debe hacerse trabajo positivo mediante un agente exterior para llevar al punto una carga de prueba (positiva) desde el infinito. Similarmente, el potencial cerca de una carga negativa aislada es negativo porque un agente exterior debe ejercer una fuerza (trabajo negativo en este caso) para sostener a la carga de prueba (positiva) cuando esta (la carga positiva) viene desde el infinito.

Por último, el potencial eléctrico queda definido como un escalar porque W y q_0 son escalares.

Tanto W_{AB} como $V_B - V_A$ son independientes de la trayectoria que se siga al mover la carga de prueba desde el punto A hasta el punto B. Si no fuera así, el punto B no tendría un potencial eléctrico único con respecto al punto A y el concepto de potencial sería de utilidad restringida.

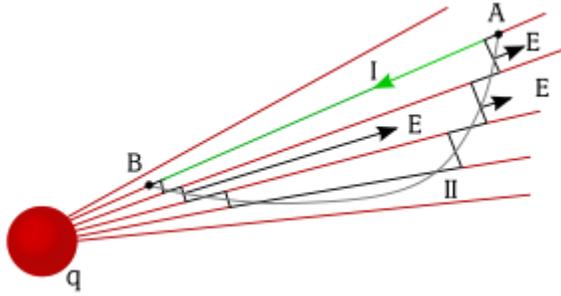


Figura 22. Una carga de prueba se mueve desde A hasta B en el campo de carga q siguiendo una de dos trayectorias. Las flechas muestran a E en tres puntos de la trayectoria II. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trabajo2.svg>

Es posible demostrar que las diferencias de potencial son independientes de la trayectoria para el caso especial representado en la figura. Para mayor simplicidad se han escogido los puntos A y B en una recta radial.

Una carga de prueba puede trasladarse desde A hacia B siguiendo la trayectoria I sobre una recta radial o la trayectoria II completamente arbitraria.

La trayectoria II puede considerarse equivalente a una trayectoria quebrada formada por secciones de arco y secciones radiales alternadas. Puesto que estas secciones se pueden hacer tan pequeñas como se desee, la trayectoria quebrada puede aproximarse a la trayectoria II tanto como se quiera. En la trayectoria II el agente externo hace trabajo solamente *a lo largo de las secciones radiales*, porque a lo largo de los arcos, la fuerza \vec{F} y el corrimiento $d\vec{l}$ son perpendiculares y en tales casos $\vec{F} \cdot d\vec{l}$ es nulo. La suma del trabajo hecho en los segmentos radiales que constituyen la trayectoria II es el mismo que el trabajo efectuado en la trayectoria I, porque cada trayectoria está compuesta del mismo conjunto de segmentos radiales. Como la trayectoria II es arbitraria, se ha demostrado que el trabajo realizado es el mismo para todas las trayectorias que unen A con B.

Aun cuando esta prueba sólo es válida para el caso especial ilustrado en la figura, la diferencia de potencial es independiente de la trayectoria para dos puntos cualesquiera en cualquier campo eléctrico. Se desprende de ello el carácter conservativo de la interacción electrostática el cual está asociado a la naturaleza central de las fuerzas electrostáticas.

Para un par de placas paralelas en las cuales se cumple que $V = Ed$, donde d es la distancia entre las placas paralelas y E es el campo eléctrico constante en la región entre las placas.

CAMPO ELÉCTRICO UNIFORME

Sean A y B dos puntos situados en un campo eléctrico uniforme, estando A a una distancia d de B en la dirección del campo, tal como muestra la figura.

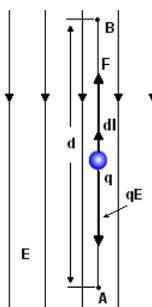


Figura 23. Campo eléctrico uniforme. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Potcamp.PNG>

Una carga de prueba q se mueve de A hacia B en un campo eléctrico uniforme E mediante un agente exterior que ejerce sobre ella una fuerza F .

Considérese una carga de prueba positiva q moviéndose sin aceleración, por efecto de algún agente externo, siguiendo la recta que une A con B.

La fuerza eléctrica sobre la carga será qE y apunta hacia abajo. Para mover la carga en la forma descrita arriba, se debe contrarrestar esa fuerza aplicando una fuerza externa F de la misma magnitud pero dirigida hacia arriba. El trabajo W realizado por el agente que proporciona esta fuerza es:

$$W_{AB} = Fd = qEd$$

Teniendo en cuenta que:

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q}$$

sustituyendo se obtiene:

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q} = Ed$$

Esta ecuación muestra la relación entre la diferencia de potencial y la intensidad de campo en un caso sencillo especial.

El punto B tiene un potencial más elevado que el A. Esto es razonable porque un agente exterior tendría que hacer trabajo positivo para mover la carga de prueba de A hacia B.

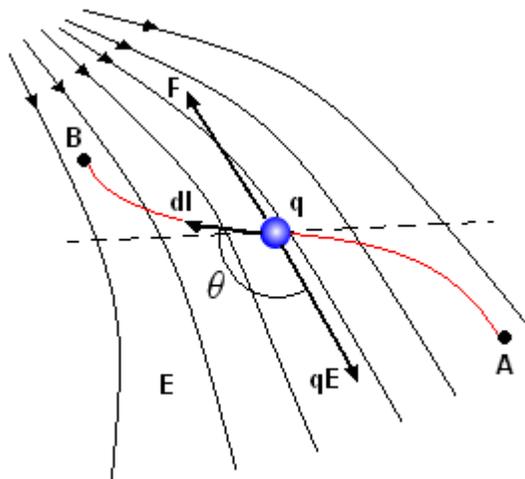


Figura 24. Una carga de prueba q se mueve de A hacia B en un campo eléctrico no uniforme E mediante un agente exterior que ejerce sobre ella una fuerza F.

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Camponounif.PNG>

CAMPO ELÉCTRICO NO UNIFORME

En el caso más general de un campo eléctrico no uniforme, este ejerce una fuerza $q\vec{E}$ sobre la carga de prueba, tal como se ve en la figura. Para evitar que la carga acelere, debe aplicarse una fuerza \vec{F} que sea exactamente igual a $-q\vec{E}$ para todas las posiciones del cuerpo de prueba.

Si el agente externo hace que el cuerpo de prueba se mueva siguiendo un corrimiento $d\vec{l}$ a lo largo de la trayectoria de A a B, el elemento de trabajo desarrollado por el agente externo es $\vec{F} \cdot d\vec{l}$. Para obtener el trabajo total W_{AB} hecho por el agente externo al mover la carga de A a B, se suman las contribuciones al trabajo de todos los segmentos infinitesimales en que se ha dividido la trayectoria. Así se obtiene:

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l} = -q \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Como $V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q}$, al sustituir en esta expresión, se obtiene que

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Si se toma el punto A infinitamente alejado, y si el potencial V_A al infinito toma el valor de cero, esta ecuación da el potencial en el punto B, o bien, eliminando el subíndice B,

$$V = - \int_{\infty}^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Estas dos ecuaciones permiten calcular la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera si se conoce \vec{E} .

EXPRESIÓN GENERAL

El potencial eléctrico suele definirse a través del campo eléctrico a partir del teorema del trabajo de la física.

$$\Delta V_{f,i} = \int_{\mathbf{r}_i}^{\mathbf{r}_f} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r}$$

donde \mathbf{E} es el campo eléctrico vectorial generado por una distribución de carga eléctrica. Esta definición muestra que estrictamente el potencial eléctrico no está definido sino tan sólo sus variaciones entre puntos del espacio. Por lo tanto, en condiciones de campo eléctrico nulo el potencial asociado es constante. Suele considerarse sin embargo que el potencial eléctrico en un punto infinitamente alejado de las cargas eléctricas es cero por lo que la ecuación anterior puede escribirse:

$$V(\mathbf{r}) = \int_{\mathbf{r}}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r}$$

En términos de energía potencial el potencial en un punto r es igual a la energía potencial entre la carga Q :

$$V(\mathbf{r}) = \frac{U(\mathbf{r})}{Q}$$

El potencial eléctrico según Coulomb, también puede calcularse a partir de la definición de energía potencial de una distribución de cargas en reposo:

$$V(\mathbf{r}) = \int_{Vol} \frac{\rho(\mathbf{r}')}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\|} d^3\mathbf{r}'$$

donde Vol es un volumen que contiene la región del espacio que contiene las cargas (se asume que dicha región es acotada en el espacio).

CORRIENTE ELÉCTRICA

La corriente eléctrica o intensidad eléctrica es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas (normalmente electrones) en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en C/s (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio. Una corriente eléctrica, puesto que se trata de un movimiento de cargas, produce un campo magnético, un fenómeno que puede aprovecharse en el electroimán.

El instrumento usado para medir la intensidad de la corriente eléctrica es el galvanómetro que, calibrado en amperios, se llama amperímetro, colocado en serie con el conductor cuya intensidad se desea medir.

Conducción eléctrica

Un material conductor posee gran cantidad de electrones libres, por lo que es posible el paso de la electricidad a través del mismo. Los electrones libres, aunque existen en el material, no se puede decir que pertenezcan a algún átomo determinado.

Una corriente de electricidad existe en un lugar cuando una carga neta se transporta desde ese lugar a otro en dicha región. Supongamos que la carga se mueve a través de un alambre. Si la carga q se transporta a través de una sección transversal dada del alambre, en un tiempo t , entonces la intensidad de corriente I , a través del alambre es:

$$I = \frac{q}{t}$$

Aquí q está dada en culombios, t en segundos, e I en amperios. Por lo cual, la equivalencia es:

$$1A = 1 \frac{C}{s}$$

Una característica de los electrones libres es que, incluso sin aplicarles un campo eléctrico desde afuera, se mueven a través del objeto de forma aleatoria debido a la energía calórica. En el caso de que no hayan aplicado ningún campo eléctrico, cumplen con la regla de que la media de estos movimientos aleatorios dentro del objeto es igual a cero. Esto es: dado un plano irreal trazado a través del objeto, si sumamos las cargas (electrones) que atraviesan dicho plano en un sentido, y sustraemos las cargas que lo recorren en sentido inverso, estas cantidades se anulan.

Cuando se aplica una fuente de tensión externa (como, por ejemplo, una batería) a los extremos de un material conductor, se está aplicando un campo eléctrico sobre los electrones libres. Este campo provoca el movimiento de los mismos en dirección al terminal positivo del material (los electrones son atraídos [tomados] por el terminal positivo y rechazados [inyectados] por el negativo). Es decir, los electrones libres son los portadores de la corriente eléctrica en los materiales conductores.

Si la intensidad es constante en el tiempo, se dice que la corriente es continua; en caso contrario, se llama variable. Si no se produce almacenamiento ni disminución de carga en ningún punto del conductor, la corriente es estacionaria.

Para obtener una corriente de 1 amperio, es necesario que 1 culombio de carga eléctrica por segundo esté atravesando un plano imaginario trazado en el material conductor.

El valor I de la intensidad instantánea será:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Si la intensidad permanece constante, en cuyo caso se denota I_m , utilizando incrementos finitos de tiempo se puede definir como:

$$I_m = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Si la intensidad es variable la fórmula anterior da el valor medio de la intensidad en el intervalo de tiempo considerado.

Según la ley de Ohm, la intensidad de la corriente es igual a la tensión (o voltaje) dividido por la resistencia que oponen los cuerpos:

$$I = \frac{V}{R}$$

Haciendo referencia a la potencia, la intensidad equivale a la raíz cuadrada de la potencia dividida por la resistencia. En un circuito que contenga varios generadores y receptores, la intensidad es igual a:

$$I = \frac{\sum \mathcal{E} - \sum \mathcal{E}'}{\sum R + \sum r + \sum r'}$$

donde $\sum \mathcal{E}$ es el sumatorio de las fuerzas electromotrices del circuito, $\sum \mathcal{E}'$ es la suma de todas las fuerzas contraelectromotrices, $\sum R$ es la resistencia equivalente del circuito, $\sum r$ es la suma de las resistencias internas de los generadores y $\sum r'$ es el sumatorio de las resistencias internas de los receptores.

Intensidad de corriente en un elemento de volumen: $dI = n \cdot q \cdot dS \cdot v$, donde encontramos n como el número de cargas portadoras por unidad de volumen dV ; q refiriéndose a la carga del portador; v la velocidad del portador y finalmente dS como el área de la sección del elemento de volumen de conductor.

Definición por medio del magnetismo

La corriente eléctrica es el flujo de portadores de carga eléctrica, normalmente a través de un cable metálico o cualquier otro conductor eléctrico, debido a la diferencia de potencial creada por un generador de corriente. La ecuación que la describe en electromagnetismo es:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \int_S \vec{J} \cdot \vec{n} dS$$

Donde \vec{J} es la densidad de corriente de conducción, $d\vec{S}$ es el vector perpendicular al diferencial de superficie, \vec{n} es el vector unitario normal a la superficie, y dS es el diferencial de superficie.

La carga eléctrica puede desplazarse cuando esté en un objeto y éste es movido, como el electróforo. Un objeto se carga o se descarga eléctricamente cuando hay movimiento de carga en su interior.

Corriente continua

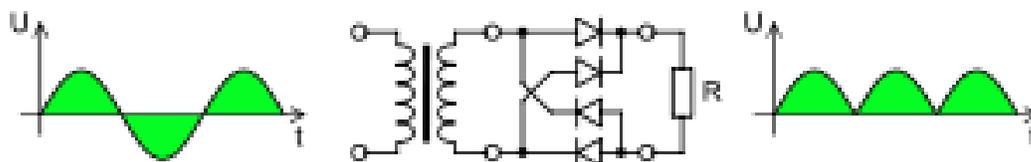


Figura 25. Rectificador de corriente alterna en continua, con puente de Gratz. Se emplea cuando la tensión de salida tiene un valor distinto de la tensión de entrada.

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gratz.rectifier.en.png>

Se denomina corriente continua o corriente directa (CC en español, en inglés DC, de *Direct Current*) al flujo de cargas eléctricas que no cambia de sentido con el tiempo. La corriente eléctrica a través de un material se establece entre dos puntos de distinto potencial. Cuando hay corriente continua, los terminales de mayor y menor potencial no se intercambian entre sí. Es errónea la identificación de la corriente continua con la corriente constante (ninguna lo es, ni siquiera la suministrada por una batería). Es continua toda

corriente cuyo sentido de circulación es siempre el mismo, independientemente de su valor absoluto.

Su descubrimiento se remonta a la invención de la primera pila voltaica por parte del conde y científico italiano Alessandro Volta. No fue hasta los trabajos de Edison sobre la generación de electricidad, en las postrimerías del siglo XIX, cuando la corriente continua comenzó a emplearse para la transmisión de la energía eléctrica. Ya en el siglo XX este uso decayó en favor de la corriente alterna, que presenta menores pérdidas en la transmisión a largas distancias, si bien se conserva en la conexión de redes eléctricas de diferentes frecuencias y en la transmisión a través de cables submarinos.

Desde 2008 se está extendiendo el uso de generadores de corriente continua a partir de células fotoeléctricas que permiten aprovechar la energía solar.

Cuando es necesario disponer de corriente continua para el funcionamiento de aparatos electrónicos, se puede transformar la corriente alterna de la red de suministro eléctrico mediante un proceso, denominado rectificación, que se realiza con unos dispositivos llamados rectificadores, basados en el empleo de diodos semiconductores o tiristores (antiguamente, también de tubos de vacío).

Corriente alterna

Se denomina corriente alterna (simbolizada CA en español y AC en inglés, de *Alternating Current*) a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la de una onda sinusoidal. En el uso coloquial, "corriente alterna" se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a los hogares y a las empresas.

El sistema usado hoy en día fue ideado fundamentalmente por Nikola Tesla, y la distribución de la corriente alterna fue comercializada por George Westinghouse. Otros que contribuyeron al desarrollo y mejora de este sistema fueron Lucien Gaulard, John Gibbs y Oliver Challenger entre los años 1881 y 1889. La corriente alterna superó las limitaciones

que aparecían al emplear la corriente continua (CC), la cual constituye un sistema ineficiente para la distribución de energía a gran escala debido a problemas en la transmisión de potencia.

La razón del amplio uso de la corriente alterna, que minimiza los problemas de transmisión de potencia, viene determinada por su facilidad de transformación, cualidad de la que carece la corriente continua. La energía eléctrica transmitida viene dada por el producto de la tensión, la intensidad y el tiempo. Dado que la sección de los conductores de las líneas de transporte de energía eléctrica depende de la intensidad, se puede, mediante un transformador, modificar el voltaje hasta altos valores (alta tensión), disminuyendo en igual proporción la intensidad de corriente. Esto permite que los conductores sean de menor sección y, por tanto, de menor costo; además, minimiza las pérdidas por efecto Joule, que dependen del cuadrado de la intensidad. Una vez en el punto de consumo o en sus cercanías, el voltaje puede ser de nuevo reducido para permitir su uso industrial o doméstico de forma cómoda y segura.

Las frecuencias empleadas en las redes de distribución son 50 y 60 Hz. El valor depende del país.

Corriente trifásica

Se denomina corriente trifásica al conjunto de tres corrientes alternas de igual frecuencia, amplitud y valor eficaz que presentan una diferencia de fase entre ellas de 120° , y están dadas en un orden determinado. Cada una de las corrientes que forman el sistema se designa con el nombre de fase.

La generación trifásica de energía eléctrica es más común que la monofásica y proporciona un uso más eficiente de los conductores. La utilización de electricidad en forma trifásica es mayoritaria para transportar y distribuir energía eléctrica y para su utilización industrial, incluyendo el accionamiento de motores. Las corrientes trifásicas se generan mediante alternadores dotados de tres bobinas o grupos de bobinas, arrolladas en un sistema de tres electroimanes equidistantes angularmente entre sí.

Los conductores de los tres electroimanes pueden conectarse en estrella o en triángulo. En la disposición en estrella cada bobina se conecta a una fase en un extremo y a un conductor común en el otro, denominado *neutro*. Si el sistema está equilibrado, la suma de las corrientes de línea es nula, con lo que el transporte puede ser efectuado usando solamente tres cables. En la disposición en triángulo o delta cada bobina se conecta entre dos hilos de fase, de forma que un extremo de cada bobina está conectado con otro extremo de otra bobina.

El sistema trifásico presenta una serie de ventajas tales como la economía de sus líneas de transporte de energía (hilos más finos que en una línea monofásica equivalente) y de los transformadores utilizados, así como su elevado rendimiento de los receptores, especialmente motores, a los que la línea trifásica alimenta con potencia constante y no pulsada, como en el caso de la línea monofásica.

Tesla fue el inventor que descubrió el principio del campo magnético rotatorio en 1882, el cual es la base de la maquinaria de corriente alterna. Él inventó el sistema de motores y generadores de corriente alterna polifásica que da energía al planeta.

Corriente monofásica

Se denomina corriente monofásica a la que se obtiene de tomar una fase de la corriente trifásica y un cable neutro. En España y demás países que utilizan valores similares para la generación y transmisión de energía eléctrica, este tipo de corriente facilita una tensión de 230 voltios, lo que la hace apropiada para que puedan funcionar adecuadamente la mayoría de electrodomésticos y luminarias que hay en las viviendas.

Desde el centro de transformación más cercano hasta las viviendas se disponen cuatro hilos: un neutro (N) y tres fases (R, S y T). Si la tensión entre dos fases cualesquiera (tensión de línea) es de 400 voltios, entre una fase y el neutro es de 230 voltios. En cada vivienda entra el neutro y una de las fases, conectándose varias viviendas a cada una de las fases y al neutro; esto se llama corriente monofásica. Si en una vivienda hay instalados

aparatos de potencia eléctrica alta (aire acondicionado, motores, etc., o si es un taller o una empresa industrial) habitualmente se les suministra directamente corriente trifásica que ofrece una tensión de 400 voltios.

Ley de Ohm

La ley de Ohm establece que la intensidad de la corriente que circula entre dos puntos de un circuito eléctrico es proporcional a la tensión eléctrica entre dichos puntos. Esta constante es la conductancia eléctrica, que es el inverso de la resistencia eléctrica.

La intensidad de corriente que circula por un circuito dado es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo. Cabe recordar que esta ley es una propiedad específica de ciertos materiales y no es una ley general del electromagnetismo como la ley de Gauss, por ejemplo.

La ecuación matemática que describe esta relación es:

$$I = GV = \frac{V}{R}$$

Donde, I es la corriente que pasa a través del objeto en amperios, V es la diferencia de potencial de las terminales del objeto en voltios, G es la conductancia en siemens y R es la resistencia en ohmios (Ω). Específicamente, la ley de Ohm dice que R en esta relación es constante, independientemente de la corriente. Esta ley tiene el nombre del físico alemán Georg Ohm, que en un tratado publicado en 1827, halló valores de tensión y corriente que pasaba a través de unos circuitos eléctricos simples que contenían una gran cantidad de cables. Él presentó una ecuación un poco más compleja que la mencionada anteriormente para explicar sus resultados experimentales. La ecuación de arriba es la forma moderna de la ley de Ohm.

Esta ley se cumple para circuitos y tramos de circuitos pasivos que, o bien no tienen cargas inductivas ni capacitivas (únicamente tiene cargas resistivas), o bien han alcanzado un régimen permanente (véase también «Circuito RLC» y «Régimen transitorio

(electrónica)»). También debe tenerse en cuenta que el valor de la resistencia de un conductor puede ser influido por la temperatura.

La ley de Ohm es una ley empírica, válida para muchos materiales en cierto rango de diferencias de potenciales. Empíricamente se ha observado que la ley de Ohm es válida en un amplio rango de escalas de longitud. A principios del siglo XX, se pensaba que la ley de Ohm debía fallar a escala atómica, pero los experimentos no han confirmado esta sospecha. En 2012, por ejemplo varios investigadores mostraron que la ley de Ohm es aplicable a cables de silicio formado por sólo un puñado de cuatro átomos de ancho.

Sin embargo, no todos los materiales la obedecen, los materiales no óhmicos no la siguen, y eventualmente cualquier material sufre disrupción eléctrica para un campo eléctrico suficientemente grande, y en ese régimen la ley de Ohm no se cumple. Los materiales no óhmicos que no siguen la ley de Ohm tienen interés tecnológico para ciertas aplicaciones de ingeniería electrónica.

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material que deja pasar la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material, los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles y esto permite su movimiento. La conductividad también depende de otros factores físicos del propio material y de la temperatura.

La conductividad es la inversa de la resistividad, por tanto $\sigma=1/\rho$, y su unidad es el S/m (siemens por metro) o $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$. Usualmente la magnitud de la conductividad (σ) es la proporcionalidad entre el campo eléctrico \mathbf{E} y la densidad de corriente de conducción \mathbf{J} :

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

Conductividad en diferentes medios

Los mecanismos de conductividad difieren entre los tres estados de la materia. Por ejemplo en los sólidos los átomos como tal no son libres de moverse y la conductividad se debe a los electrones. En los metales existen electrones cuasi-libres que se pueden mover muy libremente por todo el volumen, en cambio en los aislantes, muchos de ellos son sólidos iónicos.

La conductividad electrolítica en medios líquidos (Disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores *iónicos* se denominan electrolitos o conductores electrolíticos.

Las determinaciones de la conductividad reciben el nombre de determinaciones conductométricas y tienen muchas aplicaciones como, por ejemplo:

- En la electrólisis, ya que el consumo de energía eléctrica en este proceso depende en gran medida de ella.
- En los estudios de laboratorio para determinar el contenido de sales de varias soluciones durante la evaporación del agua (por ejemplo en el agua de calderas o en la producción de leche condensada).
- En el estudio de las basicidades de los ácidos, puesto que pueden ser determinadas por mediciones de la conductividad.
- Para determinar las solubilidades de electrolitos escasamente solubles y para hallar concentraciones de electrolitos en soluciones por titulación.

La base de las determinaciones de la solubilidad es que las soluciones saturadas de electrolitos escasamente solubles pueden ser consideradas como infinitamente diluidas. Midiendo la conductividad específica de semejante solución y calculando la conductividad equivalente según ella, se halla la concentración del electrolito, es decir, su solubilidad.

Un método práctico sumamente importante es el de la titulación conductométrica, o sea la determinación de la concentración de un electrolito en solución por la medición de su conductividad durante la titulación. Este método resulta especialmente valioso para las

soluciones turbias o fuertemente coloreadas que con frecuencia no pueden ser tituladas con el empleo de indicadores.

La conductividad eléctrica se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) de suelos y substratos de cultivo, ya que se disuelven éstos en agua y se mide la conductividad del medio líquido resultante. Suele estar referenciada a 25°C y el valor obtenido debe corregirse en función de la temperatura. Coexisten muchas unidades de expresión de la conductividad para este fin, aunque las más utilizadas son dS/m (deciSiemens por metro), mmhos/cm (milimhos por centímetro) y según los organismos de normalización europeos mS/m (miliSiemens por metro). El contenido de sales de un suelo o substrato también se puede expresar por la resistividad (se solía expresar así en Francia antes de la aplicación de las normas INEN).

Conductividad en medios sólidos

Según la teoría de bandas de energía en sólidos cristalinos, son materiales conductores aquellos en los que las bandas de valencia y conducción se superponen, formándose una *nube* de electrones libres causante de la corriente al someter al material a un campo eléctrico. Estos medios conductores se denominan conductores eléctricos.

La Comisión Electrotécnica Internacional definió como patrón de la conductividad eléctrica:

Un hilo de cobre de 1 metro de longitud y un gramo de masa, que da una resistencia de 0,15388 Ω a 20 °C al que asignó una conductividad eléctrica de 100% IACS (International Annealed Cooper Standard, Estándar Internacional de Cobre Recocido). A toda aleación de cobre con una conductividad mayor que 100% IACS se le denomina de alta conductividad (H.C. por sus siglas inglesas).

Resistencia eléctrica

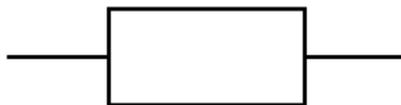


Figura 25. Símbolo de la resistencia eléctrica en un circuito.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Symbole_r%C3%A9sistance.svg

Se le llama resistencia eléctrica a la igualdad de oposición que tienen los electrones para desplazarse a través de un conductor. La unidad de resistencia en el Sistema Internacional es el ohmio, que se representa con la letra griega omega (Ω), en honor al físico alemán George Ohm, quien descubrió el principio que ahora lleva su nombre. La resistencia está dada por la siguiente fórmula:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

En donde ρ es el coeficiente de proporcionalidad o la resistividad del material.

La resistencia de un material depende directamente de dicho coeficiente, además es directamente proporcional a su longitud (aumenta conforme es mayor su longitud) y es inversamente proporcional a su sección transversal (disminuye conforme aumenta su grosor o sección transversal).

Descubierta por Georg Ohm en 1827, la resistencia eléctrica tiene un parecido conceptual a la fricción en la física mecánica. La unidad de la resistencia en el Sistema Internacional de Unidades es el ohmio (Ω). Para su medición, en la práctica existen diversos métodos, entre los que se encuentra el uso de un ohmnímetro. Además, su cantidad recíproca es la conductancia, medida en Siemens.

Además, de acuerdo con la ley de Ohm la resistencia de un material puede definirse como la razón entre la diferencia de potencial eléctrico y la corriente en que atraviesa dicha resistencia, así:

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde R es la resistencia en ohmios, V es la diferencia de potencial en voltios e I es la intensidad de corriente en amperios.

También puede decirse que "la intensidad de la corriente que pasa por un conductor es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional a su resistencia".

Según sea la magnitud de esta medida, los materiales se pueden clasificar en conductores, aislantes y semiconductor. Existen además ciertos materiales en los que, en determinadas condiciones de temperatura, aparece un fenómeno denominado superconductividad, en el que el valor de la resistencia es prácticamente nulo.

Comportamientos ideales y reales

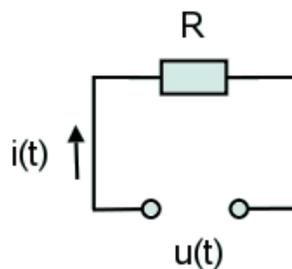


Figura 26. Circuito con resistencia. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resistencia.png>

Una resistencia ideal es un elemento pasivo que disipa energía en forma de calor según la ley de Joule. También establece una relación de proporcionalidad entre la intensidad de corriente que la atraviesa y la tensión medible entre sus extremos, relación conocida como ley de Ohm:

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

donde $i(t)$ es la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de valor R y $u(t)$ es la diferencia de potencial que se origina. En general, una resistencia real podrá tener diferente comportamiento en función del tipo de corriente que circule por ella.

Comportamiento en corriente continua

Una resistencia real en corriente continua (CC) se comporta prácticamente de la misma forma que si fuera ideal, esto es, transformando la energía eléctrica en calor por efecto Joule. La ley de Ohm para corriente continua establece que:

$$R = \frac{V}{I}$$

donde R es la resistencia en ohmios, V es la diferencia de potencial en voltios e I es la intensidad de corriente en amperios.

Comportamiento en corriente alterna

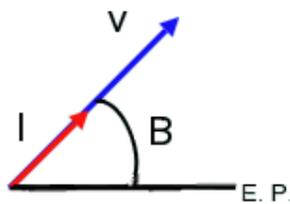


Figura 27. Diagrama fasorial. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FasorialR.png>

Como se ha comentado anteriormente, una resistencia real muestra un comportamiento diferente del que se observaría en una resistencia ideal si la intensidad que la atraviesa no es continua. En el caso de que la señal aplicada sea senoidal, corriente alterna (CA), a bajas frecuencias se observa que una resistencia real se comportará de forma muy similar a como lo haría en CC, siendo despreciables las diferencias. En altas frecuencias el comportamiento es diferente, aumentando en la medida en la que aumenta la frecuencia aplicada, lo que se explica fundamentalmente por los efectos inductivos que producen los materiales que conforman la resistencia real.

Por ejemplo, en una resistencia de carbón los efectos inductivos solo provienen de los propios terminales de conexión del dispositivo mientras que en una resistencia de tipo

bobinado estos efectos se incrementan por el devanado de hilo resistivo alrededor del soporte cerámico, además de aparecer una cierta componente capacitiva si la frecuencia es especialmente elevada. En estos casos, para analizar los circuitos, la resistencia real se sustituye por una asociación serie formada por una resistencia ideal y por una bobina también ideal, aunque a veces también se les puede añadir un pequeño condensador ideal en paralelo con dicha asociación serie. En los conductores, además, aparecen otros efectos entre los que cabe destacar el efecto pelicular.

Asociación de resistencias

Resistencia equivalente

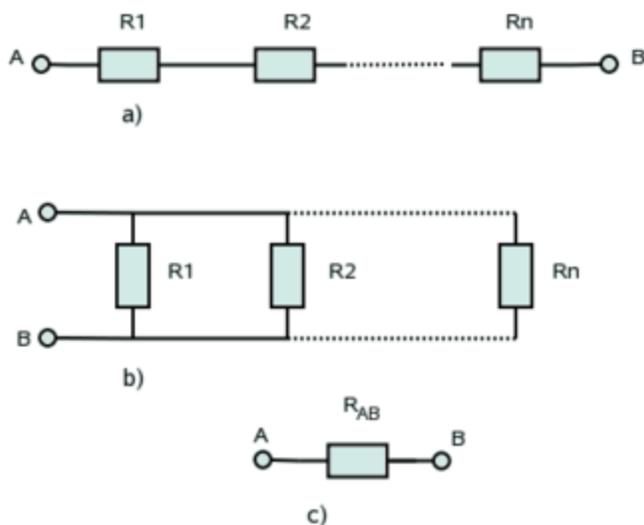


Figura 28. Asociaciones generales de resistencias: a) Serie y b) Paralelo. c) Resistencia equivalente. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AsociacionSerieParalelo.png>

Se denomina resistencia equivalente de una asociación respecto de dos puntos A y B, a aquella que conectada a la misma diferencia de potencial, U_{AB} , demanda la misma intensidad, I (ver figura 28). Esto significa que ante las mismas condiciones, la asociación y su resistencia equivalente disipan la misma potencia.

Asociación en serie

Dos o más resistencias se encuentran conectadas en serie cuando al aplicar al conjunto una diferencia de potencial, todas ellas son recorridas por la misma corriente.

Para determinar la resistencia equivalente de una asociación serie imaginaremos que ambas, figuras 28a) y 28c), están conectadas a la misma diferencia de potencial, U_{AB} . Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a la asociación en serie tendremos:

$$U_{AB} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Aplicando la ley de Ohm:

$$U_{AB} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

En la resistencia equivalente:

$$U_{AB} = IR_{AB}$$

Finalmente, igualando ambas ecuaciones se obtiene que:

$$IR_{AB} = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n)$$

Y eliminando la intensidad:

$$R_{AB} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k$$

Por lo tanto, la resistencia equivalente a **n** resistencias montadas en serie es igual a la sumatoria de dichas resistencias.

Asociación en paralelo

Dos o más resistencias se encuentran en paralelo cuando tienen dos terminales comunes de modo que al aplicar al conjunto una diferencia de potencial, U_{AB} , todas las resistencias tienen la misma caída de tensión, U_{AB} .

Para determinar la resistencia equivalente de una asociación en paralelo imaginaremos que ambas, figuras 28b) y 28c), están conectadas a la misma diferencia de potencial mencionada, U_{AB} , lo que originará una misma demanda de corriente eléctrica, I . Esta

corriente se repartirá en la asociación por cada una de sus resistencias de acuerdo con la primera ley de Kirchhoff:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{AB}}{R_2} + \dots + \frac{U_{AB}}{R_n} = U_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

En la resistencia equivalente se cumple:

$$I = U_{AB}/R_{AB}$$

Igualando ambas ecuaciones y eliminando la tensión U_{AB} :

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

De donde:

$$R_{AB} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$

Por lo que la resistencia equivalente de una asociación en paralelo es igual a la inversa de la suma de las inversas de cada una de las resistencias.

Existen dos casos particulares que suelen darse en una asociación en paralelo:

1. Dos resistencias: en este caso se puede comprobar que la resistencia equivalente es igual al producto dividido por la suma de sus valores, esto es:

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

2. k resistencias iguales: su equivalente resulta ser: el material que ofrece poca resistencia

movimiento de carga eléctrica: $R_{AB} = \frac{R}{k}$

Asociación mixta

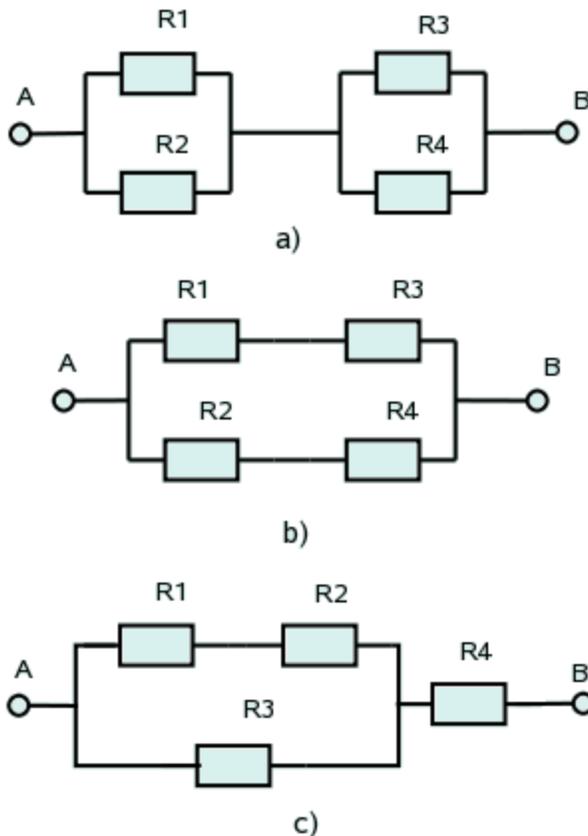


Figura 29 Asociaciones mixtas de cuatro resistencias: a) Serie de paralelos, b) Paralelo de series y c) Ejemplo de una de las otras posibles conexiones. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:AsociacionesMixtas.png>

En una asociación mixta podemos encontrarnos conjuntos de resistencias en serie con conjuntos de resistencias en paralelo. En la figura 29 pueden observarse tres ejemplos de asociaciones mixtas con cuatro resistencias.

A veces una asociación mixta es necesaria ponerla en modo texto. Para ello se utilizan los símbolos "+" y "/" para designar las asociaciones serie y paralelo respectivamente. Así con

$(R1 + R2)$ se indica que R1 y R2 están en serie mientras que con $(R1//R2)$ que están en paralelo. De acuerdo con ello, las asociaciones de la figura 29 se pondrían del siguiente modo:

a) $(R1//R2)+(R3//R4)$

b) $(R1+R3)//(R2+R4)$

c) $((R1+R2)//R3)+R4$

Para determinar la resistencia equivalente de una asociación mixta se van simplificando las resistencias que están en serie y las que están en paralelo de modo que el conjunto vaya resultando cada vez más sencillo, hasta terminar con un conjunto en serie o en paralelo. Como ejemplo se determinarán las resistencias equivalentes de cada una de las asociaciones de la figura 29:

a)

$$R1//R2 = R_{1//2}$$

$$R3//R4 = R_{3//4}$$

$$\mathbf{R_{AB}} = R_{1//2} + R_{3//4}$$

b)

$$R1+R3 = R_{1+3}$$

$$R2+R4 = R_{2+4}$$

$$\mathbf{R_{AB}} = R_{1+3} // R_{2+4}$$

c)

$$R1+R2 = R_{1+2}$$

$$R_{1+2} // R3 = R_{1+2//3}$$

$$\mathbf{R_{AB}} = R_{1+2//3} + R4$$

Desarrollando se obtiene:

a)

$$R_{AB} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} + \frac{R3 \cdot R4}{R3 + R4}$$

b)

$$R_{AB} = \frac{(R1 + R3) \cdot (R2 + R4)}{(R1 + R3) + (R2 + R4)}$$

c)

$$R_{AB} = \frac{(R1 + R2) \cdot R3}{(R1 + R2) + R3} + R4$$

Resistencia de un conductor

El conductor es el encargado de unir eléctricamente cada uno de los componentes de un circuito. Dado que tiene resistencia óhmica, puede ser considerado como otro componente más con características similares a las de la resistencia eléctrica.

De este modo, la resistencia de un conductor eléctrico es la medida de la oposición que presenta al movimiento de los electrones en su seno, es decir la oposición que presenta al paso de la corriente eléctrica. Generalmente su valor es muy pequeño y por ello se suele despreciar, esto es, se considera que su resistencia es nula (conductor ideal), pero habrá casos particulares en los que se deberá tener en cuenta su resistencia (conductor real).

La resistencia de un conductor depende de la longitud del mismo (ℓ) en m, de su sección (S) en m², del tipo de material y de la temperatura. Si consideramos la temperatura constante (20°C), la resistencia viene dada por la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

en la que ρ es la resistividad (una característica propia de cada material).

Ejemplos de Resistividad de algunos materiales a 20 °C.

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_el%C3%A9ctrica

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Plata	$1,55 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,70 \times 10^{-8}$
Oro	$2,22 \times 10^{-8}$
Aluminio	$2,82 \times 10^{-8}$
Wolframio	$5,65 \times 10^{-8}$
Níquel	$6,40 \times 10^{-8}$
Hierro	$8,90 \times 10^{-8}$
Platino	$10,60 \times 10^{-8}$
Estaño	$11,50 \times 10^{-8}$
Acero inoxidable 301	$72,00 \times 10^{-8}$
Grafito	$60,00 \times 10^{-8}$

Influencia de la temperatura

La variación de la temperatura produce una variación en la resistencia. En la mayoría de los metales aumenta su resistencia al aumentar la temperatura, por el contrario, en otros elementos, como el carbono o el germanio la resistencia disminuye.

Como ya se comentó, en algunos materiales la resistencia llega a desaparecer cuando la temperatura baja lo suficiente. En este caso se habla de superconductores.

Experimentalmente se comprueba que para temperaturas no muy elevadas, la resistencia a cierta temperatura (R_T), viene dada por la expresión:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0))$$

donde

- R_0 = Resistencia de referencia a la temperatura T_0 .
- α = Coeficiente de temperatura. Para el cobre $\alpha = 0,00393$.
- T_0 = Temperatura de referencia en la cual se conoce R_0 .

Fuerza electromotriz

La fuerza electromotriz (FEM) es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico.

Con carácter general puede explicarse por la existencia de un campo electromotor ξ cuya circulación, $\int_S \xi ds$, define la fuerza electromotriz del generador.

Se define como el trabajo que el generador realiza para pasar por su interior la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo, dividido por el valor en Culombios de dicha carga.

Esto se justifica en el hecho de que cuando circula esta unidad de carga por el circuito exterior al generador, desde el polo positivo al negativo, es necesario realizar un trabajo o consumo de energía (mecánica, química, etcétera) para transportarla por el interior desde un punto de menor potencial (el polo negativo al cual llega) a otro de mayor potencial (el polo positivo por el cual sale).

La FEM se mide en voltios, al igual que el potencial eléctrico.

Por lo que queda que:

$$P = \frac{R}{A}$$

Se relaciona con la diferencia de potencial V entre los bornes y la resistencia interna r del generador mediante la fórmula $E = V + Ir$ (el producto Ir es la caída de potencial que se produce en el interior del generador a causa de la resistencia óhmica que ofrece al paso de la corriente). La FEM de un generador coincide con la diferencia de potencial en circuito abierto.

La fuerza electromotriz de inducción (o inducida) en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción ϕ del campo magnético que lo atraviesa en la unidad de tiempo, lo que se expresa por la fórmula $\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ (Ley de Faraday). El signo (Ley de Lenz) indica que el sentido de la FEM inducida es tal que se opone al descrito por la ley de Faraday ($\xi = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$).

Circuito en serie

Un circuito en serie es una configuración de conexión en la que los bornes o terminales de los dispositivos (generadores, resistencias, condensadores, interruptores, entre otros) se conectan secuencialmente. La terminal de salida de un dispositivo se conecta a la terminal de entrada del dispositivo siguiente.

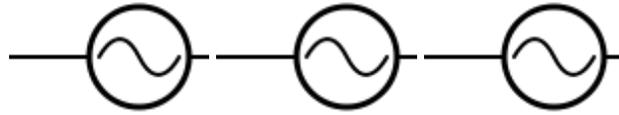
Siguiendo un símil hidráulico, dos depósitos de agua se conectarán en serie si la salida del primero se conecta a la entrada del segundo. Una batería eléctrica suele estar formada por varias pilas eléctricas conectadas en serie, para alcanzar así el voltaje que se precise.

En función de los dispositivos conectados en serie, el valor total o equivalente se obtiene con las siguientes expresiones:

- Para Generadores (pilas)

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$



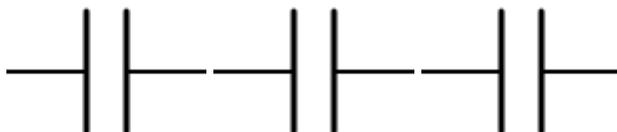
- Para Resistencias

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



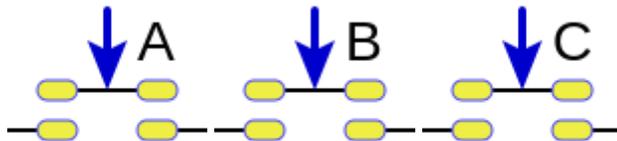
- Para Condensadores

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$



- Para Interruptores

Interruptor A	Interruptor B	Interruptor C	Salida
Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Abierto	Abierto	Cerrado	Abierto
Abierto	Cerrado	Abierto	Abierto
Abierto	Cerrado	Cerrado	Abierto
Cerrado	Abierto	Abierto	Abierto
Cerrado	Abierto	Cerrado	Abierto
Cerrado	Cerrado	Abierto	Abierto
Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_en_serie

Otra configuración posible, para la disposición de componentes eléctricos, es el circuito en paralelo. En el cual, los valores equivalentes se calculan de forma inversa al circuito en serie. Es importante conocer que para realizar la suma de las magnitudes, solo en corriente alterna, se debe hacer en forma fasorial (vectorial), para ser sumadas en forma de módulo, cada rama debe tener como máximo un elemento.

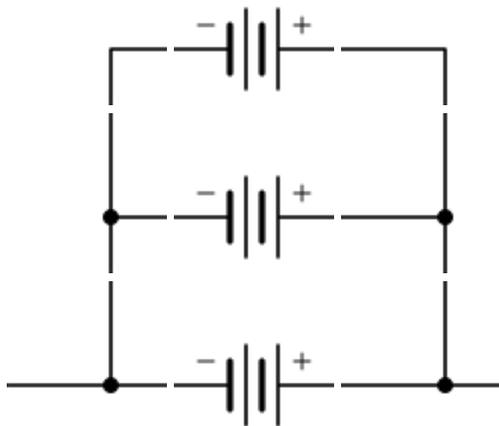
Circuito en paralelo

El circuito eléctrico en paralelo es una conexión donde los puertos de entrada de todos los dispositivos (generadores, resistencias, condensadores, etc.) conectados coincidan entre sí, lo mismo que sus terminales de salida.

Siguiendo un símil hidráulico, dos tinacos de agua conectados en paralelo tendrán una entrada común que alimentará simultáneamente a ambos, así como una salida común que drenará a ambos a la vez. Las bombillas de iluminación de una casa forman un circuito en paralelo, gastando así menos energía.

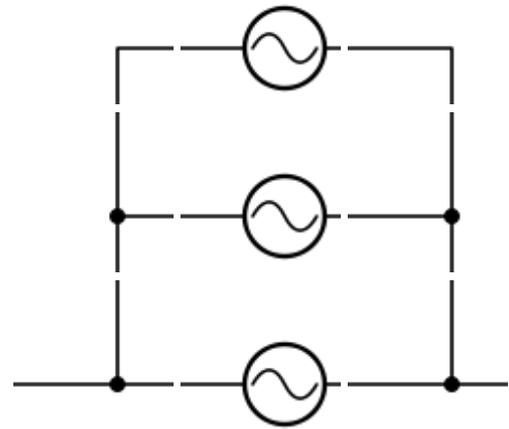
En función de los dispositivos conectados en paralelo, el valor total o equivalente se obtiene con las siguientes expresiones

- Para generadores



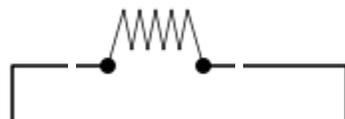
$$V_T = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

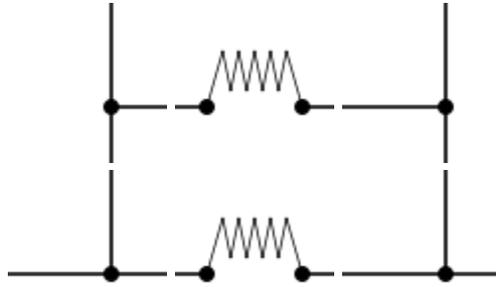
$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$



- Para Resistencias

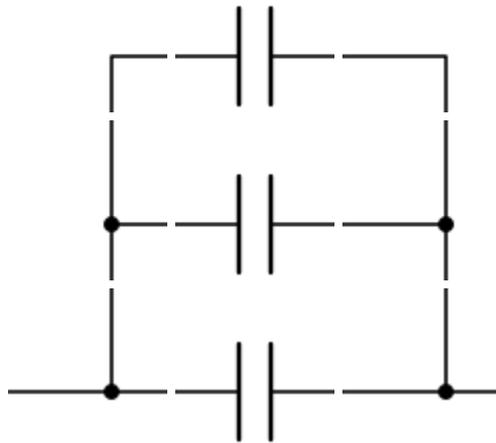
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$





- Para Condensadores

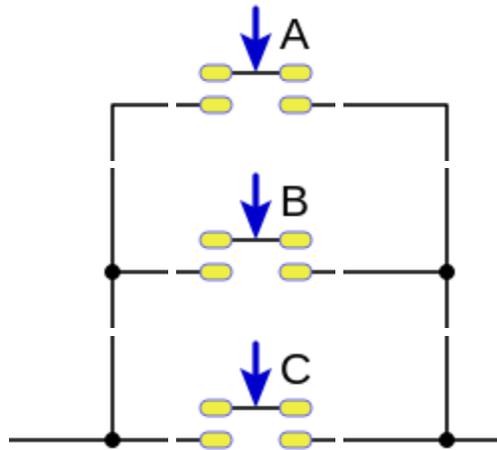
$$C_T = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$



- Para Interruptores

Interruptor A	Interruptor B	Interruptor C	Salida
Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Abierto	Abierto	Cerrado	Cerrado
Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado

Abierto	Cerrado	Cerrado	Cerrado
Cerrado	Abierto	Abierto	Cerrado
Cerrado	Abierto	Cerrado	Cerrado
Cerrado	Cerrado	Abierto	Cerrado
Cerrado	Cerrado	Cerrado	Cerrado



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_en_paralelo

Leyes de Kirchhoff

Las leyes de Kirchhoff son dos igualdades que se basan en la conservación de la energía y la carga en los circuitos eléctricos. Fueron descritas por primera vez en 1845 por Gustav Kirchhoff.

Ambas leyes de circuitos pueden derivarse directamente de las ecuaciones de Maxwell, pero Kirchhoff precedió a Maxwell y gracias a Georg Ohm su trabajo fue generalizado. Estas leyes son muy utilizadas en ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica para hallar corrientes y tensiones en cualquier punto de un circuito eléctrico.

Ley de corrientes de Kirchhoff

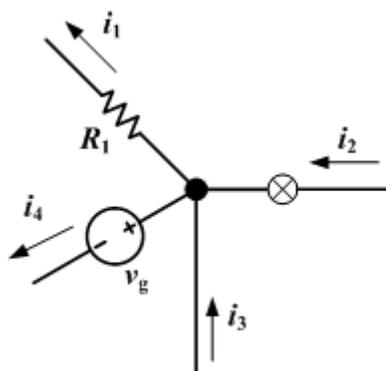


Figura 30. La corriente que pasa por un nodo es igual a la corriente que sale del mismo. $i_1 + i_4 = i_2 + i_3$. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:KCL.png>

Esta ley también es llamada ley de nodos o primera ley de Kirchhoff y es común que se use la sigla LCK para referirse a esta ley. La ley de corrientes de Kirchhoff menciona que: En cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen. De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nodo es igual a cero

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n = 0$$

Esta fórmula es válida también para circuitos complejos:

$$\sum_{k=1}^n \tilde{I}_k = 0$$

La ley se basa en el principio de la conservación de la carga donde la carga en coulombs es el producto de la corriente en amperios y el tiempo en segundos.

Densidad de carga variante

La LCK sólo es válida si la densidad de carga se mantiene constante en el punto en el que se aplica. Considere la corriente entrando en una lámina de un capacitor. Si uno se imagina una superficie cerrada alrededor de esa lámina, la corriente entra a través del dispositivo, pero no sale, violando la LCK. Además, la corriente a través de una superficie cerrada

alrededor de todo el capacitor cumplirá la LCK entrante por una lámina sea balanceada por la corriente que sale de la otra lámina, que es lo que se hace en análisis de circuitos, aunque cabe resaltar que hay un problema al considerar una sola lámina. Otro ejemplo muy común es la corriente en una antena donde la corriente entra del alimentador del transmisor pero no hay corriente que salga del otro lado.

Maxwell introdujo el concepto de corriente de desplazamiento para describir estas situaciones. La corriente que fluye en la lámina de un capacitor es igual al aumento de la acumulación de la carga y además es igual a la tasa de cambio del flujo eléctrico debido a la carga (el flujo eléctrico también se mide en Coulombs, como una carga eléctrica en el SIU). Esta tasa de cambio del flujo ψ , es lo que Maxwell llamó corriente de desplazamiento I_D :

$$I_D = \frac{d\psi}{dt}$$

Cuando la corriente de desplazamiento se incluye, la ley de Kirchhoff se cumple de nuevo. Las corrientes de desplazamiento no son corrientes reales debido a que no constan de cargas en movimiento, deberían verse más como un factor de corrección para hacer que la LCK se cumpla. En el caso de la lámina del capacitor, la corriente entrante de la lámina es cancelada por una corriente de desplazamiento que sale de la lámina y entra por la otra lámina.

Esto también puede expresarse en términos del vector campo al tomar la Ley de Ampere de la divergencia con la corrección de Maxwell y combinando la ley de Gauss, obteniendo:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\nabla \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Esto es simplemente la ecuación de la conservación de la carga (en forma integral, dice que la corriente que fluye a través de una superficie cerrada es igual a la tasa de pérdida de carga del volumen encerrado (Teorema de Divergencia). La ley de Kirchhoff es equivalente

a decir que la divergencia de la corriente es cero, para un tiempo invariante p , o siempre verdad si la corriente de desplazamiento está incluida en \mathbf{J} .

Ley de tensiones de Kirchhoff

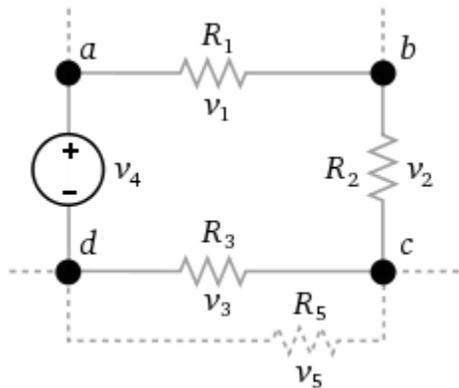


Figura 31. Ley de tensiones de Kirchhoff, en este caso $v_4 = v_1 + v_2 + v_3$. No se tiene en cuenta a v_5 porque no forma parte de la malla que se está analizando. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kirchhoff_voltage_law.svg

Esta ley es llamada también Segunda ley de Kirchhoff, ley de lazos de Kirchhoff o ley de mallas de Kirchhoff y es común que se use la sigla **LVK** para referirse a esta ley.

En un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero.

$$\sum_{k=1}^n V_k = V_1 + V_2 + V_3 \dots + V_n = 0$$

De igual manera que con la corriente, los voltajes también pueden ser complejos, así:

$$\sum_{k=1}^n \tilde{V}_k = 0$$

Esta ley se basa en la conservación de un campo potencial de energía. Dado una diferencia de potencial, una carga que ha completado un lazo cerrado no gana o pierde energía al regresar al potencial inicial.

Esta ley es cierta incluso cuando hay resistencia en el circuito. La validez de esta ley puede explicarse al considerar que una carga no regresa a su punto de partida, debido a la disipación de energía. Una carga simplemente terminará en el terminal negativo, en vez del positivo. Esto significa que toda la energía dada por la diferencia de potencial ha sido completamente consumida por la resistencia, la cual la transformará en calor. Teóricamente, y, dado que las tensiones tienen un signo, esto se traduce con un signo positivo al recorrer un circuito desde un mayor potencial a otro menor, y al revés: con un signo negativo al recorrer un circuito desde un menor potencial a otro mayor.

En resumen, la ley de tensión de Kirchhoff no tiene nada que ver con la ganancia o pérdida de energía de los componentes electrónicos (Resistores, capacitores, etc.), es una ley que está relacionada con el campo potencial generado por fuentes de tensión. En este campo potencial, sin importar que componentes electrónicos estén presentes, la ganancia o pérdida de la energía dada por el campo potencial debe ser cero cuando una carga completa un lazo.

Campo eléctrico y potencial eléctrico

La ley de tensión de Kirchhoff puede verse como una consecuencia del principio de la conservación de la energía. Considerando ese potencial eléctrico se define como una integral de línea, sobre un campo eléctrico, la ley de tensión de Kirchhoff puede expresarse como:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0,$$

Que dice que la integral de línea del campo eléctrico alrededor de un lazo cerrado es cero. Para regresar a una forma más especial, esta integral puede "partirse" para conseguir el voltaje de un componente en específico.

Efecto Joule

Se conoce como efecto Joule al fenómeno irreversible por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. El nombre es en honor a su descubridor, el físico británico James Prescott Joule.

El movimiento de los electrones en un cable es desordenado, esto provoca continuos choques entre ellos y como consecuencia un aumento de la temperatura en el propio cable.

Este efecto es utilizado para calcular la energía disipada en un conductor atravesado por una corriente eléctrica de la siguiente manera:

$$\left. \begin{array}{l} P = V \cdot I \\ E = P \cdot t \end{array} \right\} \longrightarrow E = V \cdot I \cdot t$$

La potencia **P** disipada en un conductor es igual a la diferencia de potencial **V** a la que está sometido multiplicada por la intensidad de corriente **I** que lo atraviesa. La energía desarrollada **E** es el producto de la potencia **P** por el tiempo **t** transcurrido, luego la energía **E** es el producto de la tensión **V** por la intensidad **I** y por el tiempo **t**.

Si a esta expresión añadimos la Ley de Ohm tendremos:

$$\left. \begin{array}{l} E = V \cdot I \cdot t \\ I = \frac{V}{R} \end{array} \right\} \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} E = I^2 \cdot R \cdot t \\ E = \frac{V^2}{R} \cdot t \end{array} \right.$$

La energía desarrollada es igual al cuadrado de la intensidad por la resistencia y por el tiempo, o lo que es lo mismo, el cuadrado de la tensión dividido por la resistencia y por el tiempo.

Microscópicamente el efecto Joule se calcula a través de la integral de volumen del campo eléctrico \vec{E} por la densidad de corriente \vec{J} :

$$P = \iiint_V \vec{J} \cdot \vec{E} dV$$

La resistencia es el componente que transforma la energía eléctrica en calor, (por ejemplo un hornillo eléctrico, una estufa eléctrica, una plancha etc.).

Magnetismo

El magnetismo o energía magnética es un fenómeno físico por el cual los objetos ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. Hay algunos materiales conocidos que han presentado propiedades magnéticas detectables fácilmente como el níquel, hierro, cobalto y sus aleaciones que comúnmente se llaman imanes. Sin embargo todos los materiales son influidos, de mayor o menor forma, por la presencia de un campo magnético.

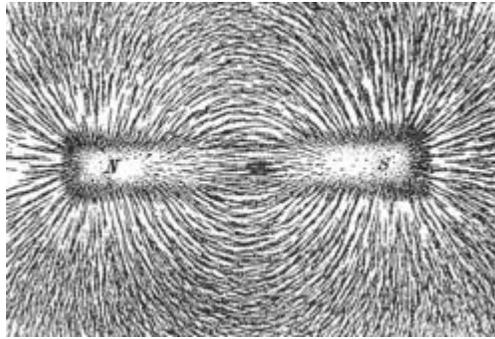


Figura 32. El magnetismo se da particularmente en los cables de electromatización. Líneas de fuerza magnéticas de un imán de barra, producidas por limaduras de hierro sobre papel. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnet0873.png>

El magnetismo también tiene otras manifestaciones en física, particularmente como uno de los 2 componentes de la radiación electromagnética, como por ejemplo, la luz.

Breve explicación del magnetismo

Cada electrón es, por su naturaleza, un pequeño imán. Comúnmente, innumerables electrones de un material están orientados aleatoriamente en diferentes direcciones, pero en un imán casi todos los electrones tienden a orientarse en la misma dirección, creando una fuerza magnética grande o pequeña dependiendo del número de electrones que estén orientados.

Además del campo magnético intrínseco del electrón, algunas veces hay que contar también con el campo magnético debido al movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo. Este efecto es análogo al campo generado por una corriente eléctrica que circula por una bobina. De nuevo, en general el movimiento de los electrones no da lugar a un campo magnético en el material, pero en ciertas condiciones los movimientos pueden alinearse y producir un campo magnético total medible.

El comportamiento magnético de un material depende de la estructura del material y, particularmente, de la configuración electrónica.

La física del magnetismo

Campos y fuerzas magnéticas

El fenómeno del magnetismo es ejercido por un campo magnético, por ejemplo, una corriente eléctrica o un dipolo magnético crea un campo magnético, éste al girar imparte una fuerza magnética a otras partículas que están en el campo.

Para una aproximación excelente (pero ignorando algunos efectos cuánticos), las ecuaciones de Maxwell (que simplifican la ley de Biot-Savart en el caso de corriente constante) describen el origen y el comportamiento de los campos que gobiernan esas fuerzas. Por lo tanto el magnetismo se observa siempre que partículas cargadas eléctricamente están en movimiento. Por ejemplo, del movimiento de electrones en una corriente eléctrica o en casos del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo atómico. Estas también aparecen de un dipolo magnético intrínseco que aparece de los efectos cuánticos, por ejemplo del spin de la mecánica cuántica.

La misma situación que crea campos magnéticos (carga en movimiento en una corriente o en un átomo y dipolos magnéticos intrínsecos) son también situaciones en que el campo magnético causa sus efectos creando una fuerza. Cuando una partícula cargada se mueve a través de un campo magnético B , se ejerce una fuerza F dado por el producto cruz:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

donde q es la carga eléctrica de la partícula, \vec{v} es el vector velocidad de la partícula y \vec{B} es el campo magnético. Debido a que esto es un producto cruz, la fuerza es perpendicular al movimiento de la partícula y al campo magnético.

La fuerza magnética no realiza trabajo mecánico en la partícula, cambia la dirección del movimiento de ésta, pero esto no causa su aumento o disminución de la velocidad. La magnitud de la fuerza es: $F = qvB \sin \theta$ donde θ es el ángulo entre los vectores \vec{v} y \vec{B} .

Una herramienta para determinar la dirección del vector velocidad de una carga en movimiento, es siguiendo la ley de la mano derecha.

El físico alemán Heinrich Lenz formuló lo que ahora se denomina la ley de Lenz, ésta da una dirección de la fuerza electromotriz (fem) y la corriente resultante de una inducción electromagnética.

Dipolos magnéticos

Se puede ver una fuente muy común de campo magnético en la naturaleza, un dipolo. Éste tiene un "polo sur" y un "polo norte", sus nombres se deben a que antes se usaban los magnetos como brújulas, que interactuaban con el campo magnético terrestre para indicar el norte y el sur del globo.

Un campo magnético contiene energía y sistemas físicos que se estabilizan con configuraciones de menor energía. Por lo tanto, cuando se encuentra en un campo magnético, un dipolo magnético tiende a alinearse solo con una polaridad diferente a la del campo, lo que cancela al campo lo máximo posible y disminuye la energía recolectada en el campo al mínimo. Por ejemplo, dos barras magnéticas idénticas pueden estar una a lado de otra normalmente alineadas de norte a sur, resultando en un campo magnético más pequeño y resiste cualquier intento de reorientar todos sus puntos en una misma dirección. La energía requerida para reorientarlos en esa configuración es entonces recolectada en el campo magnético resultante, que es el doble de la magnitud del campo de un magneto individual (esto es porque un magneto usado como brújula interactúa con el campo magnético terrestre para indicar Norte y Sur).

Una alternativa formulada, equivalente, que es fácil de aplicar pero ofrece una menor visión, es que un dipolo magnético en un campo magnético experimenta un momento de un par de fuerzas y una fuerza que pueda ser expresada en términos de un campo y de la magnitud del dipolo (por ejemplo sería el momento magnético dipolar).

Dipolos magnéticos atómicos

La causa física del magnetismo en los cuerpos, distinto a la corriente eléctrica, es por los dipolos atómicos magnéticos. Dipolos magnéticos o momentos magnéticos, en escala atómica, resultan de dos tipos diferentes del movimiento de electrones. El primero es el

movimiento orbital del electrón sobre su núcleo atómico; este movimiento puede ser considerado como una corriente de bucles, resultando en el momento dipolar magnético del orbital. La segunda, más fuerte, fuente de momento electrónico magnético, es debido a las propiedades cuánticas llamadas momento de *spin* del dipolo magnético (aunque la teoría mecánica cuántica actual dice que los electrones no giran físicamente, ni orbitan el núcleo).

El momento magnético general de un átomo es la suma neta de todos los momentos magnéticos de los electrones individuales. Por la tendencia de los dipolos magnéticos a oponerse entre ellos se reduce la energía neta. En un átomo los momentos magnéticos opuestos de algunos pares de electrones se cancelan entre ellos, ambos en un movimiento orbital y en momentos magnéticos de espín. Así, en el caso de un átomo con orbitales electrónicos o suborbitales electrónicos completamente llenos, el momento magnético normalmente se cancela completamente y solo los átomos con orbitales electrónicos semilenos tienen un momento magnético. Su fuerza depende del número de electrones impares.

La diferencia en la configuración de los electrones en varios elementos determina la naturaleza y magnitud de los momentos atómicos magnéticos, lo que a su vez determina la diferencia entre las propiedades magnéticas de varios materiales. Existen muchas formas de comportamiento magnético o tipos de magnetismo: el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo; esto se debe precisamente a las propiedades magnéticas de los materiales, por eso se ha estipulado una clasificación respectiva de estos, según su comportamiento ante un campo magnético inducido, como sigue:

Clasificación de los materiales magnéticos (Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetismo>)

Tipo de material	Características
No magnético	No afecta el paso de las líneas de campo magnético. Ejemplo: el vacío.
Diamagnético	Material débilmente magnético. Si se sitúa una barra magnética cerca de él, ésta lo repele.

	Ejemplo: bismuto (Bi), plata (Ag), plomo (Pb), agua.
Paramagnético	Presenta un magnetismo significativo. Atraído por la barra magnética. Ejemplo: aire, aluminio (Al), paladio (Pd), magneto molecular.
Ferromagnético	Magnético por excelencia o fuertemente magnético. Atraído por la barra magnética. Paramagnético por encima de la temperatura de Curie (La temperatura de Curie del hierro metálico es aproximadamente unos 770 °C). Ejemplo: hierro (Fe), cobalto (Co), níquel (Ni), acero suave.
Antiferromagnético	No magnético aún bajo acción de un campo magnético inducido. Ejemplo: óxido de manganeso (MnO ₂).
Ferrimagnético	Menor grado magnético que los materiales ferromagnéticos. Ejemplo: ferrita de hierro.
Superparamagnético	Materiales ferromagnéticos suspendidos en una matriz dieléctrica. Ejemplo: materiales utilizados en cintas de audio y video.
Ferritas	Ferromagnético de baja conductividad eléctrica. Ejemplo: utilizado como núcleo inductores para aplicaciones de corriente alterna.

Monopolos magnéticos

Puesto que un imán de barra obtiene su ferromagnetismo de los electrones magnéticos microscópicos distribuidos uniformemente a través del imán, cuando un imán es partido a la mitad cada una de las piezas resultantes es un imán más pequeño. Aunque se dice que un imán tiene un polo norte y un polo sur, estos dos polos no pueden separarse el uno del otro. Un monopolos sería una nueva clase fundamentalmente diferente de objeto magnético. Actuaría como un polo norte aislado, no atado a un polo sur, o viceversa. Los monopolos llevarían "carga magnética" análoga a la carga eléctrica. A pesar de búsquedas sistemáticas a partir de 1931 (como la de 2006), nunca han sido observadas, y muy bien podrían no existir.

Tipos de materiales magnéticos

Existen diversos tipos de comportamiento de los materiales magnéticos, siendo los principales el ferromagnetismo, el diamagnetismo y el paramagnetismo.

En los materiales diamagnéticos, la disposición de los electrones de cada átomo es tal, que se produce una anulación global de los efectos magnéticos. Sin embargo, si el material se introduce en un campo inducido, la sustancia adquiere una imantación débil y en el sentido opuesto al campo inductor. Si se sitúa una barra de material diamagnético en el interior de un campo magnético uniforme e intenso, ésta se dispone transversalmente respecto de aquel.

Los materiales paramagnéticos no presentan la anulación global de efectos magnéticos, por lo que cada átomo que los constituye actúa como un pequeño imán. Sin embargo, la orientación de dichos imanes es, en general, arbitraria, y el efecto global se anula. Asimismo, si el material paramagnético se somete a la acción de un campo magnético inductor, el campo magnético inducido en dicha sustancia se orienta en el sentido del campo magnético inductor. Esto hace que una barra de material paramagnético suspendida libremente en el seno de un campo inductor se alinee con este.

El magnetismo inducido, aunque débil, es suficiente intenso como para imponer al efecto magnético. Para comparar los tres tipos de magnetismo se emplea la razón entre el campo magnético inducido y el inductor.

La rama de la química que estudia las sustancias de propiedades magnéticas interesantes es la magnetoquímica.

Electromagnetos

Un electroimán es un imán hecho de alambre eléctrico bobinado en torno a un material magnético como el hierro. Este tipo de imán es útil en los casos en que un imán debe estar encendido o apagado, por ejemplo, las grandes grúas para levantar chatarra de automóviles. Para el caso de corriente eléctrica se desplazan a través de un cable, el campo resultante se dirige de acuerdo con la regla de la mano derecha. Si la mano derecha se utiliza como un

modelo, y el pulgar de la mano derecha a lo largo del cable de positivo hacia el lado negativo ("convencional actual", a la inversa de la dirección del movimiento real de los electrones), entonces el campo magnético hace una recapitulación de todo el cable en la dirección indicada por los dedos de la mano derecha. Como puede observarse geoméricamente, en caso de un bucle o hélice de cable, está formado de tal manera que el actual es viajar en un círculo, a continuación, todas las líneas de campo en el centro del bucle se dirigen a la misma dirección, lo que arroja un "magnética dipolo" cuya fuerza depende de la actual en todo el bucle, o el actual en la hélice multiplicado por el número de vueltas de alambre. En el caso de ese bucle, si los dedos de la mano derecha se dirigen en la dirección del flujo de corriente convencional (es decir, el positivo y el negativo, la dirección opuesta al flujo real de los electrones), el pulgar apuntará en la dirección correspondiente al polo norte del dipolo.

Magnetos temporales y permanentes

Un imán permanente conserva su magnetismo sin un campo magnético exterior, mientras que un imán temporal solo es magnético, siempre que esté situado en otro campo magnético. Inducir el magnetismo del acero en los resultados en un imán de hierro, pierde su magnetismo cuando la inducción de campo se retira. Un imán temporal como el hierro es un material adecuado para los electroimanes. Un imán permanente puede perder su magnetismo al ser sometido al calor, a fuertes golpes, o colocarlo dentro de un solenoide se suministra con una reducción de corriente alterna.

Unidades

Unidades del SI relacionadas con el magnetismo

- Tesla [T] = unidad de campo magnético.
- Weber [Wb] = unidad de flujo magnético.
- Ampere [A] = unidad de corriente eléctrica, que genera campos magnéticos.

Otras unidades

- gauss, abreviado como G, es la unidad CGS de inducción magnética (B).
- Oersted, es la unidad CGS de campo magnético.

- Maxwell, es la unidad CGS de flujo magnético.

Campo magnético

Un campo magnético es una descripción matemática de la influencia magnética de las corrientes eléctricas y de los materiales magnéticos. El campo magnético en cualquier punto está especificado por dos valores, la *dirección* y la *magnitud*; de tal forma que es un campo vectorial. Específicamente, el campo magnético es un vector axial, como lo son los momentos mecánicos y los campos rotacionales. El campo magnético es más comúnmente definido en términos de la fuerza de Lorentz ejercida en cargas eléctricas. *Campo magnético* puede referirse a dos separados pero muy relacionados símbolos B y H.

Los campos magnéticos son producidos por cualquier carga eléctrica en movimiento y el momento magnético intrínseco de las partículas elementales asociadas con una propiedad cuántica fundamental, su espín. En la relatividad especial, campos eléctricos y magnéticos son dos aspectos interrelacionados de un objeto, llamado el tensor electromagnético. Las fuerzas magnéticas dan información sobre la carga que lleva un material a través del efecto Hall. La interacción de los campos magnéticos en dispositivos eléctricos tales como transformadores es estudiada en la disciplina de circuitos magnéticos.

Fuerza de Lorentz

Entre las definiciones de campo magnético se encuentra la dada por la fuerza de Lorentz. Esto sería el efecto generado por una corriente eléctrica o un imán, sobre una región del espacio en la que una carga eléctrica puntual de valor (q), que se desplaza a una velocidad (v), experimenta los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad (v) como al campo (B). Así, dicha carga percibirá una fuerza descrita con la siguiente ecuación.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

donde **F** es la fuerza magnética, **v** es la velocidad y **B** el campo magnético, también llamado inducción magnética y densidad de flujo magnético. (Nótese que tanto **F** como **v** y **B** son

magnitudes vectoriales y el *producto vectorial* tiene como resultante un vector perpendicular tanto a v como a B). El módulo de la fuerza resultante será:

$$|\mathbf{F}| = |q||\mathbf{v}||\mathbf{B}| \cdot \text{sen}(\theta)$$

La existencia de un campo magnético se pone de relieve gracias a la propiedad (la cual la podemos localizar en el espacio) de orientar un magnetómetro (laminilla de acero imantado que puede girar libremente). La aguja de una brújula, que evidencia la existencia del campo magnético terrestre puede ser considerada un magnetómetro.

El nombre de campo magnético o intensidad del campo magnético se aplica a dos magnitudes:

- La **excitación magnética** o **campo H** es la primera de ellas, desde el punto de vista histórico, y se representa con **H**.
- La **inducción magnética** o **campo B**, que en la actualidad se considera el auténtico campo magnético, y se representa con **B**.

Desde un punto de vista físico, ambos son equivalentes en el vacío, salvo en una constante de proporcionalidad (permeabilidad) que depende del sistema de unidades: en el sistema de Gauss, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{NA}^{-2}$ en el SI. Solo se diferencian en medios materiales con el fenómeno de la magnetización.

El campo **H** se ha considerado tradicionalmente el campo principal o intensidad de campo magnético, ya que se puede relacionar con unas *cargas, masas o polos magnéticos* por medio de una ley similar a la de Coulomb para la electricidad. Maxwell, por ejemplo, utilizó este enfoque, aunque aclarando que esas cargas eran ficticias. Con ello, no solo se parte de leyes similares en los campos eléctricos y magnéticos (incluyendo la posibilidad de definir un potencial escalar magnético), sino que en medios materiales, con la equiparación matemática de **H** con **E**, por un lado, y de **B** con **D**, por otro, se pueden establecer paralelismos útiles en las condiciones de contorno y las relaciones termodinámicas; las fórmulas correspondientes en el sistema electromagnético de Gauss son:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{B} = \mu\mathbf{H} & \mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi\mathbf{M} \\ \mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E} & \mathbf{E} = \mathbf{D} - 4\pi\mathbf{P} \end{array}$$

En electrotecnia no es raro que se conserve este punto de vista porque resulta práctico.

Con la llegada de las teorías del electrón de Lorentz y Poincaré, y de la relatividad de Einstein, quedó claro que estos paralelismos no se corresponden con la realidad física de los fenómenos, por lo que hoy es frecuente, sobre todo en física, que el nombre de *campo magnético* se aplique a \mathbf{B} . En la formulación relativista del electromagnetismo, \mathbf{E} no se agrupa con \mathbf{H} para el tensor de intensidades, sino con \mathbf{B} .

En 1944, F. Rasetti preparó un experimento para dilucidar cuál de los dos campos era el fundamental, es decir, aquel que actúa sobre una carga en movimiento, y el resultado fue que el campo magnético real era \mathbf{B} y no \mathbf{H} .

Para caracterizar \mathbf{H} y \mathbf{B} se ha recurrido a varias distinciones. Así, \mathbf{H} describe cuan intenso es el campo magnético en la región que afecta, mientras que \mathbf{B} es la cantidad de flujo magnético por unidad de área que aparece en esa misma región. Otra distinción que se hace en ocasiones es que \mathbf{H} se refiere al campo en función de sus fuentes (las corrientes eléctricas) y \mathbf{B} al campo en función de sus efectos (fuerzas sobre las cargas).

Fuentes del campo magnético

Un campo magnético tiene dos fuentes que lo originan. Una de ellas es una corriente eléctrica de conducción, que da lugar a un campo magnético estático, si es constante. Por otro lado una corriente de desplazamiento origina un campo magnético variante en el tiempo, incluso aunque aquella sea estacionaria.

La relación entre el campo magnético y una corriente eléctrica está dada por la ley de Ampère. El caso más general, que incluye a la corriente de desplazamiento, lo da la ley de Ampère-Maxwell.

Campo magnético producido por una carga puntual

El campo magnético generado por una única carga en movimiento (no por una corriente eléctrica) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(q\mathbf{v}) \times \hat{\mathbf{u}}_r}{r^2}$$

Donde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$. Esta última expresión define un campo vectorial solenoidal, para distribuciones de cargas en movimiento la expresión es diferente, pero puede probarse que el campo magnético sigue siendo un campo solenoidal.

Campo magnético producido por una distribución de cargas

La inexistencia de cargas magnéticas lleva a que el campo magnético es un campo solenoidal lo que lleva a que localmente puede ser derivado de un potencial vector \mathbf{A} , es decir:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

A su vez este potencial vector puede ser relacionado con el vector densidad de corriente mediante la relación:

$$\Delta \mathbf{A} = \mu_0 \mathbf{j}$$

La ecuación anterior planteada sobre \mathbb{R}^3 , con una distribución de cargas contenida en un conjunto compacto, la solución es expresable en forma de integral. Y el campo magnético de una distribución de carga viene dado por:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_1} \frac{\mathbf{j}_1 \times \hat{\mathbf{u}}_r}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1\|^2} dV_1$$

Inexistencia de cargas magnéticas aisladas

Cabe destacar que, a diferencia del campo eléctrico, en el campo magnético no se ha comprobado la existencia de monopolos magnéticos, solo dipolos magnéticos, lo que

significa que las líneas de campo magnético son cerradas, esto es, el número neto de líneas de campo que entran en una superficie es igual al número de líneas de campo que salen de la misma superficie. Un claro ejemplo de esta propiedad viene representado por las líneas de campo de un imán, donde se puede ver que el mismo número de líneas de campo que salen del polo norte vuelve a entrar por el polo sur, desde donde vuelven por el interior del imán hasta el norte.

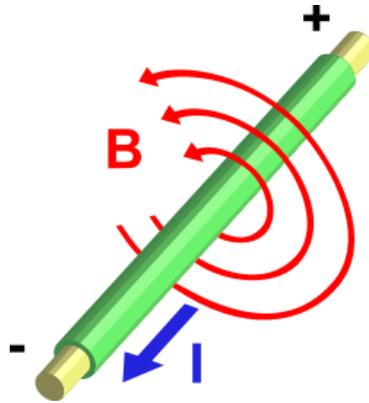


Figura 33. Ilustración de un campo magnético alrededor de un alambre a través del cual fluye corriente eléctrica. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetism.svg>

Energía almacenada en campos magnéticos

La energía es necesaria para generar un campo magnético, para trabajar contra el campo eléctrico que un campo magnético crea y para cambiar la magnetización de cualquier material dentro del campo magnético. Para los materiales no-dispersivos, se libera esta misma energía tanto cuando se destruye el campo magnético para poder modelar esta energía, como siendo almacenado en el campo magnético.

Para materiales lineales y no dispersivos (tales que $B=\mu H$ donde μ es independiente de la frecuencia), la densidad de energía es:

$$\mathcal{E}_M = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{\mu H^2}{2}$$

Si no hay materiales magnéticos alrededor, entonces el μ se puede substituir por μ_0 . La ecuación antedicha no se puede utilizar para los materiales no lineales, se utiliza una expresión más general.

Generalmente la cantidad incremental de trabajo por el δW del volumen de unidad necesitado para causar un cambio pequeño del δB del campo magnético es: $\delta W = H \cdot \delta B$. Una vez que la relación entre H y B se obtenga, esta ecuación se utiliza para determinar el trabajo necesitado para alcanzar un estado magnético dado. Para los materiales como los ferromagnéticos y superconductores el trabajo necesitado también dependerá de cómo se crea el campo magnético.

Determinación del campo de inducción magnética B

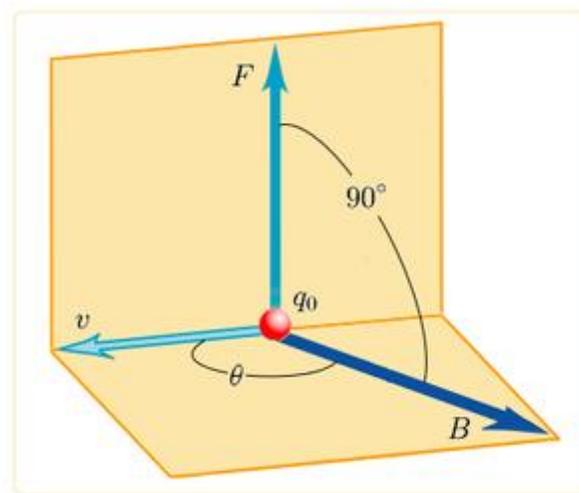


Figura 34. Relaciones entre los vectores. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Campo_magnetico.png

1. La figura muestra las relaciones entre los vectores. Donde se observa que:
 - *(a) la fuerza magnética se anula cuando $v \rightarrow 0$,
 - *(b) la fuerza magnética se anula si \mathbf{v} es paralela o antiparalela a la dirección de \mathbf{B} (en estos casos $\theta = 0^\circ$ o bien $\theta = 180^\circ$ y $\vec{v} \times \vec{B} = 0$)
 - *(c) si \mathbf{v} es perpendicular a \mathbf{B} ($\theta = 90^\circ$) la fuerza desviadora tiene su máximo valor, dado por: $F_{\perp} = q_0 v B$

El campo magnético para cargas que se mueven a velocidades pequeñas comparadas con velocidad de la luz, puede representarse por un campo vectorial. Sea una carga eléctrica de prueba q_0 en un punto P de una región del espacio moviéndose a una cierta velocidad arbitraria \mathbf{v} respecto a un cierto observador que no detecte campo eléctrico. Si el observador detecta una deflexión de la trayectoria de la partícula entonces en esa región existe un campo magnético. El valor o intensidad de dicho campo magnético puede medirse mediante el llamado vector de inducción magnética \mathbf{B} , a veces llamado simplemente "campo magnético", que estará relacionado con la fuerza \mathbf{F} y la velocidad \mathbf{v} medida por dicho observador en el punto P: Si se varía la dirección de \mathbf{v} por P, sin cambiar su magnitud, se encuentra, en general, que la magnitud de \mathbf{F} varía, si bien se conserva perpendicular a \mathbf{v} . A partir de la observación de una pequeña carga eléctrica de prueba puede determinarse la dirección y módulo de dicho vector del siguiente modo:

- La dirección del "campo magnético" se define operacionalmente del siguiente modo. Para una cierta dirección de \mathbf{v} , la fuerza \mathbf{F} se anula. Se define esta dirección como la de \mathbf{B} .
- Una vez encontrada esta dirección el módulo del "campo magnético" puede encontrarse fácilmente ya que es posible orientar a \mathbf{v} de tal manera que la carga de prueba se desplace perpendicularmente a \mathbf{B} . Se encuentra, entonces, que la \mathbf{F} es máxima y se define la magnitud de \mathbf{B} determinando el valor de esa fuerza máxima:

$$B = \frac{F_{\perp}}{q_0 v}$$

En consecuencia: Si una carga de prueba positiva q_0 se dispara con una velocidad v por un punto P y si obra una fuerza lateral F sobre la carga que se mueve, hay una inducción magnética B en el punto P siendo B el vector que satisface la relación:

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

La magnitud de \mathbf{F} , de acuerdo a las reglas del producto vectorial, está dada por la expresión:

$$F = q_0 v B \sin(\theta)$$

Expresión en la que θ es el ángulo entre \mathbf{v} y \mathbf{B} .

El hecho de que la fuerza magnética sea siempre perpendicular a la dirección del movimiento implica que el trabajo realizado por la misma sobre la carga, es cero. En efecto, para un elemento de longitud dl de la trayectoria de la partícula, el trabajo dW es $\vec{F}_B \cdot dl$ que vale cero por ser F y dl perpendiculares. Así pues, un campo magnético estático no puede cambiar la energía cinética de una carga en movimiento.

Si una partícula cargada se mueve a través de una región en la que coexisten un campo eléctrico y uno magnético la fuerza resultante está dada por:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E} + q_0 \vec{v} \times \vec{B}$$

Esta fórmula es conocida como Relación de Lorentz

Campo magnético en relatividad

Campo medido por dos observadores

La teoría de la relatividad especial probó que de la misma manera que espacio y tiempo no son conceptos absolutos, la parte eléctrica y magnética de un campo electromagnético dependen del observador. Eso significa que dados dos observadores O y \bar{O} en movimiento relativo uno respecto a otro, el campo magnético y eléctrico medido por cada uno de ellos no será el mismo. En el contexto de la relatividad especial si los dos observadores se

mueven uno respecto a otro con velocidad uniforme v dirigida según el eje X, las componentes de los campos eléctricos medidas por uno y otro observador vendrán relacionadas por:

$$\bar{E}_x = E_x, \quad \bar{E}_y = \frac{E_y - vB_z}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \bar{E}_z = \frac{E_z + vB_y}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Y para los campos magnéticos se tendrá:

$$\bar{B}_x = B_x, \quad \bar{B}_y = \frac{B_y + vE_z/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \bar{B}_z = \frac{B_z - vE_y/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Nótese que en particular un observador en reposo respecto a una carga eléctrica detectará solo campo eléctrico, mientras que los observadores que se mueven respecto a las cargas detectarán una parte eléctrica y magnética.

Campo creado por una carga en movimiento

El campo magnético creado por una carga en movimiento puede probarse por la relación general:

$$\mathbf{B} = \mathbf{v} \times \mathbf{E}/c^2$$

que es válida tanto en mecánica newtoniana como en mecánica relativista. Esto lleva a que una carga puntual moviéndose a una velocidad v proporciona un campo magnético dado por:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^2} \frac{1 - v^2/c^2}{[1 - (v^2/c^2) \sin^2 \theta]^{3/2}} \mathbf{v} \times \mathbf{u}_r$$

Unidades y magnitudes típicas

La unidad de B en el SI es el tesla, que equivale a wéber por metro cuadrado (Wb/m^2) o a voltio segundo por metro cuadrado (V s/m^2); en unidades básicas es $\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$. Su unidad en sistema de Gauss es el gauss (G); en unidades básicas es $\text{cm}^{-1/2} \text{g}^{1/2} \text{s}^{-1}$.

La unidad de H en el SI es el amperio por metro (A/m) (a veces llamado amperivuelta por metro, (Av/m)). Su unidad en el sistema de Gauss es el oérsted (Oe), que es dimensionalmente igual al Gauss.

La magnitud del campo magnético terrestre en la superficie de la Tierra es de alrededor de 0.5G. Los imanes permanentes comunes, de hierro, generan campos de unos pocos cientos de Gauss, esto es a corto alcance la influencia sobre una brújula es alrededor de mil veces más intensa que la del campo magnético terrestre; como la intensidad se reduce con el cubo de la distancia, a distancias relativamente cortas el campo terrestre vuelve a dominar. Los imanes comerciales más potentes, basados en combinaciones de metales de transición y tierras raras generan campos hasta diez veces más intensos, de hasta 3000-4000 G, esto es, 0.3-0.4 T. El límite teórico para imanes permanentes es alrededor de diez veces más alto, unos 3 Tesla. Los centros de investigación especializados obtienen de forma rutinaria campos hasta diez veces más intensos, unos 30T, mediante electroimanes; se puede doblar este límite mediante campos pulsados, que permiten enfriarse al conductor entre pulsos. En circunstancias extraordinarias, es posible obtener campos incluso de 150T o superiores, mediante explosiones que comprimen las líneas de campo; naturalmente en estos casos el campo dura solo unos microsegundos. Por otro lado, los campos generados de forma natural en la superficie de un púlsar se estiman en el orden de los cientos de millones de Tesla.

En el mundo microscópico, atendiendo a los valores del momento dipolar de iones magnéticos típicos y a la ecuación que rige la propagación del campo generado por un dipolo magnético, se verifica que a un nanómetro de distancia, el campo magnético generado por un electrón aislado es del orden de 3 G, el de una molécula imán típica, del orden de 30 G y el de un ion magnético típico puede tener un valor intermedio, de 5 a 15 G. A un Angstrom, que es un valor corriente para un radio atómico y por tanto el valor

mínimo para el que puede tener sentido referirse al momento magnético de un ion, los valores son mil veces más elevados, esto es, del orden de magnitud del Tesla.

Electromagnetismo



Figura 35. Ferrofluido que se agrupa cerca de los polos de un magneto poderoso.
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferrofluid_poles.jpg

El electromagnetismo es una rama de la física que estudia y unifica los fenómenos eléctricos y magnéticos en una sola teoría, cuyos fundamentos fueron sentados por Michael

Faraday y formulados por primera vez de modo completo por James Clerk Maxwell. La formulación consiste en cuatro ecuaciones diferenciales vectoriales que relacionan el campo eléctrico, el campo magnético y sus respectivas fuentes materiales (corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética), conocidas como ecuaciones de Maxwell.

El electromagnetismo es una teoría de campos; es decir, las explicaciones y predicciones que provee se basan en magnitudes físicas vectoriales o tensoriales dependientes de la posición en el espacio y del tiempo. El electromagnetismo describe los fenómenos físicos macroscópicos en los cuales intervienen cargas eléctricas en reposo y en movimiento, usando para ello campos eléctricos y magnéticos y sus efectos sobre las sustancias sólidas, líquidas y gaseosas. Por ser una teoría macroscópica, es decir, aplicable solo a un número muy grande de partículas y a distancias grandes respecto de las dimensiones de éstas, el electromagnetismo no describe los fenómenos atómicos y moleculares, para los que es necesario usar la mecánica cuántica. El electromagnetismo considerado como fuerza es una de las cuatro fuerzas fundamentales del universo actualmente conocido.

Electrostática

La electrostática se refiere a los fenómenos que ocurren debido a una propiedad intrínseca y discreta de la materia, la carga, cuando es estacionaria o no depende del tiempo. La unidad de carga elemental, es decir, la más pequeña observable, es la carga que tiene el electrón. Se dice que un cuerpo está cargado eléctricamente cuando tiene exceso o falta de electrones en los átomos que lo componen. Por definición el defecto de electrones se la denomina carga positiva y al exceso carga negativa. La relación entre los dos tipos de carga es de atracción cuando son diferentes y de repulsión cuando son iguales.

La carga elemental es una unidad muy pequeña para cálculos prácticos, es por eso que en el sistema internacional a la unidad de carga eléctrica, el culombio, se le define como la cantidad de carga de $6,25 \times 10^{18}$ electrones. El movimiento de electrones por un conductor se denomina corriente eléctrica y la cantidad de carga eléctrica que pasa por unidad de tiempo se la define como intensidad de corriente. Se pueden introducir más conceptos

como el de diferencia de potencial o el de resistencia, que nos conduciría ineludiblemente al área de circuitos eléctricos, y todo eso se puede ver con más detalle en el artículo principal.

El nombre de la unidad de carga se debe a Coulomb quien en 1785 llegó a una relación matemática de la fuerza eléctrica entre cargas puntuales, que ahora se la conoce como ley de Coulomb:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_r$$

Entre dos cargas puntuales q_1 y q_2 existe una fuerza de atracción o repulsión \vec{F} que varía de acuerdo al cuadrado de la distancia r^2 entre ellas y de dirección radial \vec{e}_r ; y ϵ_0 es una constante conocida como permitividad eléctrica.

Las cargas elementales al no encontrarse solas se las debe tratar como una distribución de ellas. Es por eso que debe implementarse el concepto de campo, definido como una región del espacio donde existe una magnitud escalar o vectorial dependiente o independiente del tiempo. Así el campo eléctrico \vec{E} está definido como la región del espacio donde actúan las fuerzas eléctricas. Su intensidad se define como el límite al que tiende la fuerza de una distribución de carga sobre una carga positiva que tiende a cero, así:

$$\vec{E} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}_{\Delta q}}{\Delta q}$$

Y así finalmente llegamos a la expresión matemática que define el campo eléctrico:

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r$$

Es importante conocer el alcance de este concepto de campo eléctrico, éste nos brinda la oportunidad de conocer cuál es su intensidad y qué ocurre con una carga en cualquier parte de dicho campo sin importar el desconocimiento de qué lo provoca.

Una forma de obtener qué cantidad de fuerza eléctrica pasa por cierto punto o superficie del campo eléctrico es que se ideó el concepto de flujo eléctrico. Este flujo eléctrico Φ se define como la suma de la cantidad de *campo* que atraviesa un área determinada, así:

$$\Phi = \sum \vec{E} \cdot \Delta\vec{S} = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

El matemático y físico, Carl Friedrich Gauss, demostró que la cantidad de flujo eléctrico en un campo es igual al cociente de la carga encerrada por la superficie en la que se calcula el flujo, q_{enc} , y la permitividad eléctrica, ϵ_0 . Esta relación se conoce como ley de Gauss:

(1)

$$\Phi = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

Magnetostática

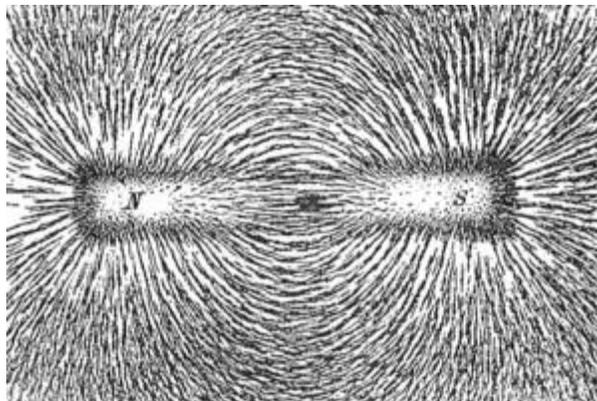


Figura 36. Líneas de fuerza de una barra magnética.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnet0873.png>

En el año 1820, Hans Christian Ørsted descubrió que el fenómeno magnético estaba ligado al eléctrico, que se obtuvo una teoría científica para el magnetismo. La presencia de una

corriente eléctrica, o sea, de un flujo de carga debido a una diferencia de potencial, genera una fuerza magnética que no varía en el tiempo. Si tenemos una carga a una velocidad \vec{v} , ésta generará un campo magnético \vec{B} que es perpendicular a la fuerza magnética inducida por el movimiento en esta corriente, así:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Para determinar el valor de ese campo magnético, Jean Baptiste Biot en 1820,[1] dedujo una relación para corrientes estacionarias, ahora conocida como ley de Biot-Savart:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_c \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Donde μ_0 es un coeficiente de proporcionalidad conocido como permeabilidad magnética, I es la intensidad de corriente, el $d\vec{l}$ es el diferencial de longitud de la corriente y \vec{r} es la dirección de la corriente. De manera más estricta, \vec{B} es la inducción magnética, dicho en otras palabras, es el flujo magnético por unidad de área. Experimentalmente se llegó a la conclusión que las líneas de fuerza de campos magnéticos eran cerradas, eliminando la posibilidad de un monopolo magnético. La relación matemática se la conoce como ley de Gauss para el campo magnético:

(2)

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Además en la magnetostática existe una ley comparable a la de Gauss en la electrostática, la ley de Ampère. Ésta ley dice que la circulación en un campo magnético es igual a la densidad de corriente que exista en una superficie cerrada:

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

Cabe indicar que esta ley de Gauss es una generalización de la ley de Biot-Savart. Además que las fórmulas expresadas aquí son para cargas en el vacío.

Electrodinámica clásica

Hasta el momento se han estudiado los campos eléctricos y magnéticos que no varían con el tiempo. Pero los físicos a finales del siglo XIX descubrieron que ambos campos estaban ligados y así un campo eléctrico en movimiento, una corriente eléctrica que varíe, genera un campo magnético y un campo magnético de por sí implica la presencia de un campo eléctrico. Entonces, lo primero que debemos definir es la fuerza que tendría una partícula cargada que se mueva en un campo magnético y así llegamos a la unión de las dos fuerzas anteriores, lo que hoy conocemos como la fuerza de Lorentz:

(3)

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Entre 1890 y 1900 Liénard y Wiechert calcularon el campo electromagnético asociado a cargas en movimiento arbitrario, resultado que se conoce hoy como potenciales de Liénard-Wiechert.

Por otro lado, para generar una corriente eléctrica en un circuito cerrado debe existir una diferencia de potencial entre dos puntos del circuito, a ésta diferencia de potencial se la conoce como fuerza electromotriz o fem. Esta fuerza electromotriz es proporcional a la rapidez con que el flujo magnético varía en el tiempo, esta ley fue encontrada por Michael Faraday y es la interpretación de la inducción electromagnética, así un campo magnético que varía en el tiempo induce a un campo eléctrico, a una fuerza electromotriz. Matemáticamente se representada como:

(4)

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

En un trabajo del físico James Clerk Maxwell de 1861 reunió las tres ecuaciones anteriormente citadas (1), (2) y (4) e introdujo el concepto de una corriente de desplazamiento como una densidad de corriente efectiva y llegó a la última de las

ecuaciones, la ley de Ampère generalizada (5), ahora conocidas como ecuaciones de Maxwell:

(5)

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Las cuatro ecuaciones, tanto en su forma diferencial como en la integral aquí descritas, fueron las revisiones hechas por Oliver Heaviside. Pero el verdadero poder de éstas ecuaciones, más la fuerza de Lorentz (3), se centra en que juntas son capaces de describir cualquier fenómeno electromagnético, además de las consecuencias físicas que posteriormente se describirán.

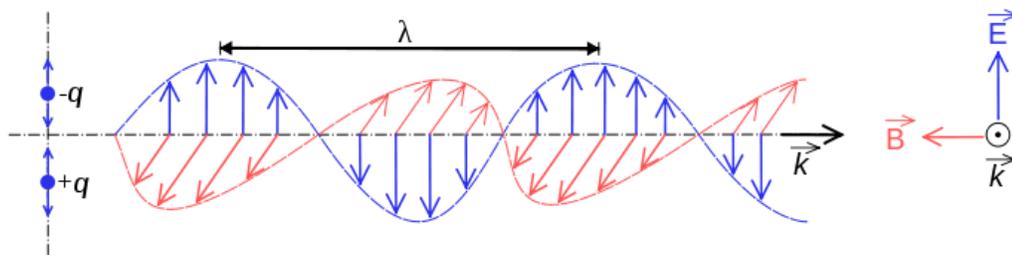


Figura 37. Esquema de una onda electromagnética.
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg

La genialidad del trabajo de Maxwell es que sus ecuaciones describen un campo eléctrico que va ligado inequívocamente a un campo magnético perpendicular a éste y a la dirección de su propagación, éste campo es ahora llamado campo electromagnético. Además la solución de éstas ecuaciones permitía la existencia de una onda que se propagaba a la velocidad de la luz, con lo que además de unificar los fenómenos eléctricos y magnéticos la teoría formulada por Maxwell predecía con absoluta certeza los fenómenos ópticos.

Así la teoría predecía a una onda que, contraria a las ideas de la época, no necesitaba un medio de propagación; la onda electromagnética se podía propagar en el vacío debido a la generación mutua de los campos magnéticos y eléctricos. Esta onda a pesar de tener una velocidad constante, la velocidad de la luz c , puede tener diferente longitud de onda y consecuentemente dicha onda transporta energía. La radiación electromagnética recibe

diferentes nombres al variar su longitud de onda, como rayos gamma, rayos X, espectro visible, etc.; pero en su conjunto recibe el nombre de espectro electromagnético.

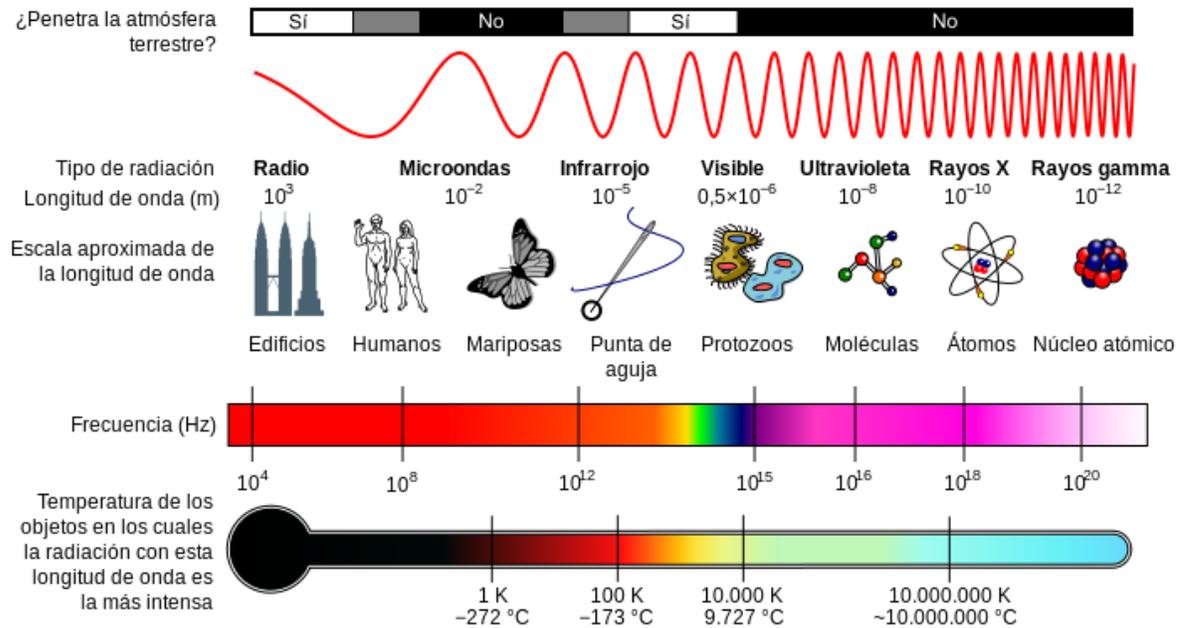


Figura 38. Espectro electromagnético.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) http://es.wikipedia.org/wiki/Factor_de_conversi%C3%B3n
- 2) <http://fisicaelemental2awikis.wikispaces.com/aaaaaa>
- 3) <http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/ocw/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=229>
- 4) http://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_el%C3%A9ctrica
- 5) http://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_el%C3%A9ctrica
- 6) http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_en_serie
- 7) http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Joule
- 8) <http://es.wikipedia.org/wiki/Magnetismo>
- 9) <http://es.wikipedia.org/wiki/Electromagnetismo>

10) <http://es.wikipedia.org/wiki/Electrodin%C3%A1mica>

11) <http://es.wikipedia.org/wiki/Vector>

12) <http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa>

13) <http://magnetismoyelectricidad.wikispaces.com/Electrost%C3%A1tica>