Corriente Continua y fenómenos electromagnéticos. Repaso.

por Aurelio Gallardo

6 - Octubre - 2023

Índice General

1. Ley de Coulomb

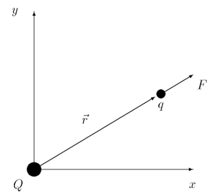


Figura 1: FUERZA ELÉCTRICA A UNA DISTANCIA $\vec{r}$

Dos partículas cargadas eléctricamente, **Q** y **q**, se ven sometidas a una fuerza cuya expresión es:

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2} \cdot \vec{u}_{qQ} \tag{1}$$

Esta fuerza será de atracción si las cargas tienen signos contrarios, y de repulsión si tienen igual signo, y su dirección viene determinada por la línea que une **q** y **Q**. La constante k vale $k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0}$ siendo en el aire o en el vacío $\varepsilon_r = 1$ entonces $k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \; \frac{N \cdot m^2}{C^2}$

Mini ejercicio: calcula el valor de ε_0

2. Campo eléctrico

Llamamos campo eléctrico de una carga **Q** a la región del espacio en el que se manifestará una fuerza eléctrica cuando coloquemos en dicho espacio una carga **q**. El campo sólo depende de la carga **Q** y de la distancia al punto del espacio $\tilde{\mathbf{r}}$.

Por lo tanto, $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \overrightarrow{u_r}$. El campo eléctrico se mide en N/C (Newtons por culombio) y es una magnitud vectorial (campo vectorial) que apunta siempre hacia «fuera de la carga» si la carga es positiva, y hacia «la carga» si la carga es negativa (figura (3).)

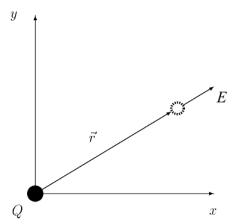


Figura 2: $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$

3. Energía potencial eléctrica y potencial eléctrico

Como sabemos $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$. El trabajo que realiza la fuerza eléctrica una carga **Q**, que provoca un campo **E**, cuando introducimos en el espacio una carga **q** es:

$$\Delta W = \int_A^B \vec{F} \cdot \vec{ds} = q \int_A^B \vec{E} \cdot \vec{ds} \tag{2}$$

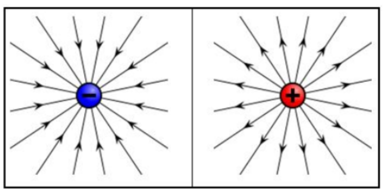


Figura 3: DIRECCIONES DEL CAMPO ELÉCTRICO

Pensemos un momento en el campo gravitatorio. Cuando llevamos un objeto a cierta altura, adquiere una energía potencial. Si lo soltamos, el campo gravitatorio actúa y lo atrae hacia sí. El trabajo que hace el campo y el trabajo que tenemos que hacer nosotros para oponernos a él, es de signo contrario aunque igual en módulo.

De la misma forma, la energía potencial eléctrica entre dos puntos es, formalmente, la opuesta al trabajo realizado por el campo eléctrico (figura 4). Por tanto:

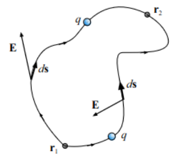


Figura 4: CIRCULACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO.

$$\Delta U = -\Delta W = -q\int_{r_1}^{r_2} \vec{E}\cdot\vec{ds} \tag{3}$$

Consideraciones importantes:

1. Sea cual sea el camino seguido desde $\vec{r}_1$hasta $\vec{r}_2$ el trabajo del campo eléctrico y la energía potencial eléctrica valen lo mismo. ***No depende del camino, sino de los puntos inicial y final***. Cuando esto sucede (en el campo eléctrico, en el campo gravitatorio) se dice que **el campo es conservativo**.
2. La integral $\oint \vec{E}\cdot\vec{ds}$ en un camino cerrado es cero (si parto de un punto A y vuelvo a ese mismo punto A).
3. Por lo tanto, la energía potencial eléctrica sólo depende de la distancia $\vec{r}$ desde la carga **Q** hasta el punto de cálculo.
4. Si el campo es **central** (apunta siempre hacia, o desde, la carga **Q**), el campo eléctrico será un vector que apunta hacia o desde dicho punto. Podríamos escribir $\vec{E} = E\cdot\vec{u}_r$, siendo $\vec{u}_r$ un vector unitario en la dirección normal o radial. Si en general los desplazamientos infinitesimales $\vec{ds}$ los descompongo en la suma de dos partes, una siguiendo la dirección radial y otra la dirección tangencial al radio $\vec{ds} = dr\cdot\vec{u}_r + d\tau\cdot\vec{u}_\tau$, puedo fácilmente deducir que $\vec{E}\cdot\vec{ds} = E\cdot dr$. Importante: sólo contribuye al aumento o disminución de la energía potencial eléctrica *los desplazamientos a lo largo de direcciones normales*.
5. Por lo tanto, si un punto A está a una distancia **r** de la carga Q, tendrá la misma energía potencial todos los puntos situados en una esfera a la distancia **r**. La esfera constituye una superficie **equipotencial**.

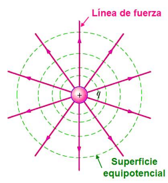


Figura 5: SUPERFICIE EQUIPOTENCIAL

6. El campo **energía potencial eléctrica** es un campo **escalar**.

3.1. Potencial eléctrico

Definimos pues el **potencial eléctrico** como la energía potencial eléctrica por unidad de carga. Para una carga puntual **Q**, el potencial eléctrico quedaría definido como:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -\int_{r_1}^{r_2} \vec{E}\cdot\vec{ds} \tag{4}$$

1. Se mide en **Voltios (V).** Un **Voltio** es un **Julio** entre un **Culombio**. $1 \cdot V = \frac{1 \cdot J}{1 \cdot C}$
2. El potencial eléctrico cero se toma como referencia en el infinito.
3. Por tanto: $V(r) - V(\infty) = -\int_{\infty}^{r} \vec{E} \cdot \vec{ds} = -\int_{\infty}^{r} E \cdot dr = -\int_{\infty}^{r} k \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot dr = -k \cdot Q \cdot \left(\frac{-1}{r}\right) \Big|_{\infty}^{r} = k \cdot \frac{Q}{r}$, como $V(\infty) = 0 \cdot V$ nos queda que $\mathbf{V(r) = k \cdot \frac{Q}{r}}$
4. La energía potencial eléctrica que una carga **q** posee en un campo producido por una carga **Q** es $\Delta U = q \cdot \Delta V$

Cuando tenemos varias cargas fijas en el espacio; por ejemplo, Q_1,Q_2 y Q_3, el campo eléctrico en un punto del espacio P provocado por las cargas es la suma vectorial de los campos eléctricos provocados por cada una de dichas cargas en dicho punto. Este campo también puede calcularse sumando escalarmente los potenciales eléctricos provocados por cada carga y aplicar:

$$E_x = \frac{\partial V}{\partial x} \quad , \quad E_y = \frac{\partial V}{\partial x}, \quad E_z = \frac{\partial V}{\partial z} \quad \vec{E} = \nabla V \tag{5}$$

Siendo ∇V el gradiente de V. $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ operador nabla, que convierte un campo escalar en uno vectorial.

Nota: ver más en https://www2.tntech.edu/leap/murdock/books/v4chap4.pdf

4. La corriente eléctrica

Si hay cargas afectadas por un campo eléctrico, estas cargas estarán en movimiento. A este movimiento se le denomina ***corriente eléctrica***.

Se denomina corriente eléctrica a la cantidad de cargas (usualmente electrones) que pasan por unidad de tiempo por un punto y en una dirección determinada. Cuando por la sección transversal del cable circula la carga de 1C durante un segundo, **decimos que tenemos un amperio 1A**[1]**.**

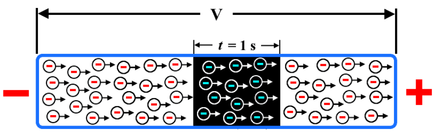


Figura 6: Definición de Amperio

El amperio en el S.I. de unidades es una unidad fundamental. Todas las unidades de otras magnitudes eléctricas derivan de ella en este sistema.

Si el flujo de cargas es constante, puede escribirse la intensidad como $I = \frac{Q}{t}$. Si no lo es, hay que usar una expresión diferencial ($i = \frac{dq}{dt}$) que podrá determinarse si se conoce la cantidad de carga **q** a lo largo del tiempo, $q(t)$.

4.1. Potencia

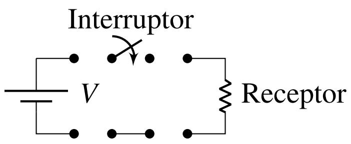
Cuando en un circuito circulan cargas entre dos puntos cuya diferencia de potencial es **V** ,sabemos que se ha producido un trabajo $W = q \cdot V$. Si el flujo es constante, podemos expresar el trabajo de todas esas cargas circulando como $W = I \cdot t \cdot V$. Por lo tanto, en un circuito por el que circula un amperio en un segundo, sometido a una diferencia de potencial de un voltio, se realiza un trabajo de un julio.

La potencia eléctrica la defino como el trabajo realizado en la unidad de tiempo, luego: $P = I \cdot V$. La unidad de potencia es el **vatio** o **watio** (W), que se genera cuando circula por un circuito un amperio donde existe una diferencia de potencial de un voltio.

Basada en la unidad de potencia vatio, es muy usual encontrarse con una unidad de energía eléctrica denominada kilowatio-hora ($kW \cdot h$)

[1]Existen definiciones más precisas de esta unidad. Consultar Wikipedia para más información: https://es.wikipedia.org/wiki/Amperio

4.2. Circuito eléctrico



Cuadro 1: CIRCUITO GENÉRICO

Un circuito eléctrico es un conjunto de elementos que forman un camino cerrado, y por el cual puede generarse y circular una corriente eléctrica. En un circuito eléctrico encontramos cuatro tipos de elementos:

A) Fuente de energía: generador, pila, acumulador, etc. Mantiene una tensión en sus bornes de manera que puedan circular las cargas. La causa que mantiene esa tensión se denomina fuerza electromotriz.

B) Receptor: resistencia, reactancia, capacitancia, «bombilla», «timbre», etc. Convierte la energía eléctrica en otro tipo de energía y/o modifica el flujo de cargas.

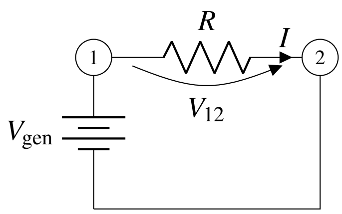
C) Elementos de control: interruptor, conmutador, etc. Permiten el paso o no del flujo de cargas.

D) Conductores: cables, metales. Transportan el flujo de cargas del generador al receptor.

4.3. Ley de Ohm

La relación entre la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito y la intensidad que lo atraviesa se denomina resistencia. Esta relación se conoce como ley de Ohm.

$$R = \frac{V_{12}}{I} \tag{6}$$



Cuadro 2: LEY DE OHM

La resistencia de un elemento del circuito se mide en **Ohmios** (Ω). Un ohmio es la relación entre un voltio y un amperio. La resistencia puede interpretarse como la dificultad que impone un material a ser atravesado por cargas eléctricas (usualmente electrones).

Si su resistencia es muy, muy baja. Tan baja que en la práctica puede considerarse nula, el material se denomina **conductor**. Si su resistencia es muy, muy alta; tan alta que puede considerarse infinita en la práctica, los denominamos **aislantes**.

4.3.1. Resistencia y resistividad

En general, la resistencia de un material varía según tres parámetros: (a) un coeficiente de resistividad, que expresa cómo se comporta ante el paso de la corriente eléctrica (ρ), (b) aumenta según su medida más larga **L**, (c) y disminuye según la sección transversal del mismo **S**.

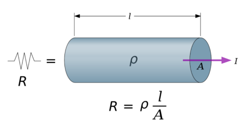


Figura 7: RESISTIVIDAD

La resistividad se mide en $\Omega \cdot m$ o unidades equivalentes. Presento algunos valores de resistividad según los materiales:

Valores de resistividad			
Aluminio	$0.03\ \Omega \cdot mm^2/m$	Latón	$0.063\ \Omega \cdot mm^2/m$
Cobre	$0.01785\ \Omega \cdot mm^2/m$	Plata	$0.016\ \Omega \cdot mm^2/m$
Hierro	$0.13\ \Omega \cdot mm^2/m$	Madera de pino[2]	$45\ M\Omega \cdot m$

La resistencia en un conductor suele además variar linealmente con la temperatura (ya que ésta al aumentar lo expande). Para un rango de entre -20ºC y 200ºC, y siempre que no haya cambio de fase, aproximadamente podemos usar para los conductores la fórmula $\Delta R = 1 + \alpha \cdot \Delta t$ tomando normalmente como referencia inicial la temperatura a 20ºC.

[2]ver https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC/article/view/621/1392

4.4. Ley de Joule

En general, el paso de una corriente a través de una resistencia desprende calor. La potencia disipada en un conductor se expresa como:

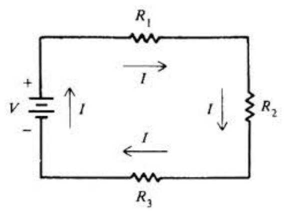
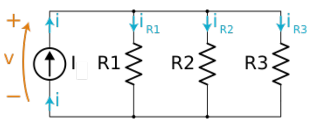
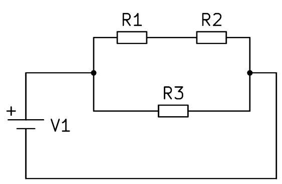
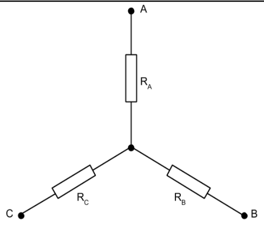
$$P = I^2 \cdot R \tag{7}$$

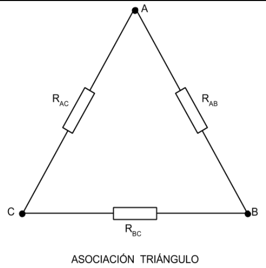
Si queremos conocer el calor desprendido, en **calorías**, durante un cierto tiempo **t**, podemos usar la expresión: $Q = 0{,}239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$

5. Circuitos elementales en corriente continua

5.1. Serie y paralelo.

Los elementos de un circuito, y en particular los resistivos, pueden conectarse entre sí siguiendo varias configuraciones:

TIPOS DE ASOCIACIONES DE RESISTENCIAS				
	**Serie**	$V_1 = I \cdot R_1$ $V_2 = I \cdot R_2$ $\vdots$ $V_n = I \cdot R_n$	Misma intensidad. Se suman las tensiones.	$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$ $V = I \cdot R_{eq}$ $V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n$
	**Paralelo**	$I_1 = V/R_1$ $I_2 = V/R_2$ $\vdots$ $I_3 = V/R_3$	Misma tensión. Se suman las intensidades de cada rama.	$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$ $V = I \cdot R_{eq}$ $I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$
	**Mixto**	Depende del circuito. Se van simplificando las ramas según sean en serie o en paralelo, sustituyéndolas por su resistencia equivalente.		
 	**Estrella**	Son tres resistencias con un nodo en común. Es intercambiable con tres resistencias en triángulo. A veces se denomina en «T»		

TIPOS DE ASOCIACIONES DE RESISTENCIAS		
	**Triángulo**	Es intercambiable con tres resistencias en estrella. A veces se denomina «Δ»

Se denomina resistencia equivalente de un grupo de resistencias a la resistencia única que, sustituyendo a dicho grupo, absorbe la misma intensidad que el grupo. En serie la re**sistencia equivalente es la suma de las resistencias**. En paralelo, **la inversa de la resistencia equivalente es la suma de las inversas de cada resistencia**.

5.1.1. Transformación triángulo (delta) a estrella

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{AC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \qquad R_B = \frac{R_{AB} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \qquad R_C = \frac{R_{AC} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \tag{8}$$

Regla nemotécnica: en el denominador, las sumas de las tres resistencias que aparecen en el triángulo. En el numerador, la multiplicación de las dos resistencias que forman el nodo.

5.1.2. Transformación estrella a triángulo (delta)

$$R_{AB} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_C} \qquad R_{AC} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_B} \qquad R_{BC} = \frac{R_A \cdot R_B + R_A \cdot R_C + R_B \cdot R_C}{R_A} \tag{9}$$

Regla nemotécnica: las resistencias entre dos nodos tiene de numerador la suma de los productos dos a dos, y de denominador la resistencia opuesta a los nodos.

Nota: ver la demostración en https://analisisdecircuitos1.wordpress.com/parte-1-circuitos-resistivos-cap-capitulo-19-transformacion-delta-estrella-y-estrella-delta/

6. Leyes de Kirchhoff

6.1. Nudos (nodos) y mallas

Un objetivo principal de resolver un circuito a priori suele ser calcular la intensidad total entregada por la fuente, para dimensionar correctamente la necesidad energética del mismo, y el cálculo de las intensidades parciales en cada elemento que nos indican la energía que se disipa. Para ello es útil las transformaciones anteriormente usadas (serie, paralelo, etc.). Pero no es la única forma de calcular estos parámetros en un circuito.

En un circuito de corriente continua hay elementos activos, que proporcionan energía (pilas, baterías, generadores) y pasivos (resistencias) que absorben la energía proporcionada por los primeros y la disipan en forma de luz y calor, principalmente.

En un circuito llamamos:

I) **Nudo** (**nodo**): al punto en el que concurren dos o más elementos en un circuito.

II) **Rama**: al conjunto de elementos que existen entre dos nudos.

III) **Malla**: caminos cerrados en un circuito que empiezan y terminan en el mismo nudo.

Las leyes de Kirchhoff nos dicen que:

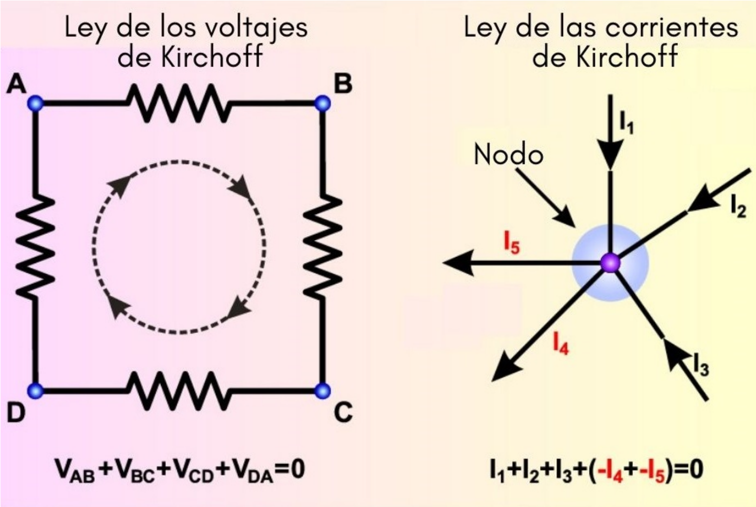


Figura 8: LEYES DE KIRCHHOFF

I) **La suma de las intensidades que confluyen en los nodos es cero**. Las intensidades que «entran» en el nodo se consideran positivas y las que «salen» negativas. $\sum_{i=1}^{n} I_i = 0A$

II) **La sumas de las tensiones al recorrer una malla es cero.** $\sum_{i=1}^{n} V_i = 0V$

Aprenderemos a resolver por Kirchhoff usando ejemplos de circuitos en problemas.

6.2. Teorema de superposición

Cuando existen varios generadores en un circuito, la intensidad que circula por una rama es la suma algebraica de las intensidades obtenidas considerando una fuente cada vez. Las fuentes que no se consideran deben sustituirse por sus resistencias internas (cero ohmios, si son ideales).

Veremos algún ejemplo resuelto de este teorema en los problemas.

Comprobar y simular circuitos en: https://masterplc.com/simulador/

7. Conceptos y fenómenos electromagnéticos

7.1. Inducción electromagnética. Campo Magnético.

Desde la antigüedad se conoce el fenómeno de atracción que existía entre ciertos materiales, como la magnetita, y los objetos pequeños de hierro. Esta propiedad de estos materiales se denominó magnetismo.

Con el tiempo se comprobó que esa propiedad podría ser adquirida por materiales como el mismo hierro, el cobalto o el níquel.

Un material magnético presenta la existencia de dos polos, que denominamos **norte** y **sur**. Entre ambos se manifiesta la **fuerza magnética**, por lo que decimos que entre el polo norte y sur de un imán existe un **campo magnético** (B). Gráficamente representamos este campo con **líneas de fuerza** (Figura 9). Una mayor densidad de líneas de fuerza representa un campo magnético más intenso.

La unidad en el SI del campo magnético es el **Tesla** (T). Ver más en: https://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/campomag.html

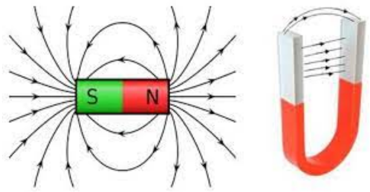
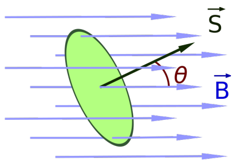
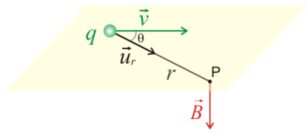


Figura 9: LÍNEAS DE FUERZA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA

7.1.1. Flujo magnético



(a) FLUJO MAGNÉTICO



(b) CAMPO MAGNÉTICO CARGA PUNTUAL

Figura 10: FLUJO Y CAMPO CARGA PUNTUAL

El concepto de flujo magnético viene dado por el número de líneas de fuerza que atraviesan la unidad de superficie, es decir la multiplicación escalar del vector campo magnético con el vector superficie. $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$. En forma diferencial $d\Phi = \vec{dB} \cdot d\vec{S}$. La unidad de flujo magnético es el **Weber** (Wb).

7.2. Ley de Biot-Savart

Una carga eléctrica en movimiento crea un campo magnético alrededor de ella. Viene dado por la fórmula:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot q \cdot \frac{\vec{v}\, x\, \vec{u}_r}{r^2} \tag{10}$$

Siendo $\vec{B}$ el campo magnético creado a una distancia $\vec{r}$ del campo.

La constante μ_0 es denominada permeabilidad magnética del espacio libre, cuyo valor en el Sistema Internacional es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{T}{mA}$. La carga eléctrica móvil es **q** y su velocidad $\vec{v}$. El vector $\vec{u}_r$ es el vector unitario en la dirección de $\vec{r}$. También puedo escribirla como:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot q \cdot \frac{\vec{v}\, x\, \vec{r}}{r^3} \tag{11}$$

Hay que hacer notar que si la carga se mueve en un plano, el vector campo magnético es siempre perpendicular a dicho plano. El módulo del campo magnético se puede calcular como $B = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{q \cdot v \cdot sen(\theta)}{r^2}$, siendo θ el ángulo que forman $\vec{v}$ y $\vec{r}$.

7.3. $\vec{B}$ creado por una corriente eléctrica

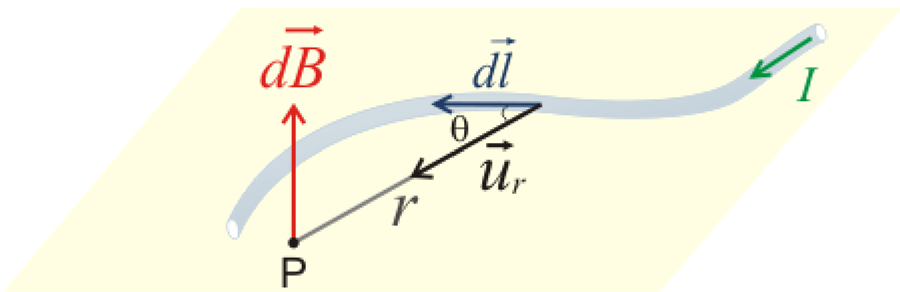


Figura 11: CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA CORRIENTE ELÉCTRICA

Las cargas moviéndose por el cable crean el campo. Un trozo de longitud diferencial $\vec{dl}$ de ese cable creará un campo diferencial $\vec{dB}$. Para poder tener una expresión de este campo, calculamos previamente el producto escalar $I \cdot \overrightarrow{dl}$

$$I \cdot \overrightarrow{dl} = \frac{dq}{dt} \cdot \overrightarrow{dl} = dq \cdot \frac{\overrightarrow{dl}}{dt} = dq \cdot \vec{v} \tag{12}$$

$$\overrightarrow{dB} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot dq \cdot \frac{\vec{v}\, x\, \vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I \cdot \frac{\overrightarrow{dl}\, x\, \vec{u}_r}{r^2} \tag{13}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I \cdot \int_l \frac{\overrightarrow{dl}\, x\, \vec{u}_r}{r^2} \tag{14}$$

Por lo tanto, el campo magnético creado a una distancia $\vec{r}$ del conductor es la suma (integral) de los campos creados por cada trozo diferencial según la expresión anterior. Las fórmulas para los siguientes elementos, que se demostrarán en los problemas, son:

$$B = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{a}$$

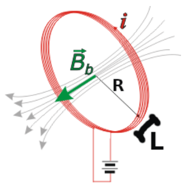
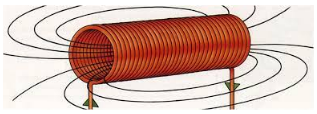
(a) CONDUCTOR RECTILÍNEO INFINITO A UNA DISTANCIA «A» (MÓDULO)

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{R}$$

(b) CONDUCTOR DE UNA ESPIRA DE RADIO «R» EN SU CENTRO (MÓDULO)

Cuadro 4: CAMPOS MAGNÉTICOS PARA ELEMENTOS RELEVANTES

Otras fórmulas:

Algunos elementos		
Espiras apretadas		$L \ll R$ $B = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$ **L grosor del conjunto** **R radio** **N número de espiras**
Solenoide o bobina		$L \gg R$ $B = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot I}{L}$

En ambos casos, el campo es perpendicular al eje de las espiras y proporcional al número de ellas.

Ver animación, animación

7.4. Fuerzas creadas por campos magnéticos

7.4.1. Carga puntual

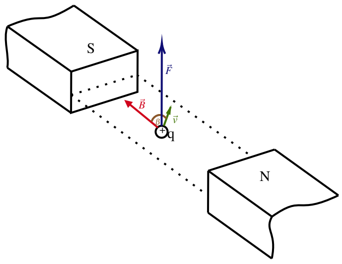


Figura 12: FUERZA EJERCIDA A UNA CARGA Q EN PRESENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO B

Una carga eléctrica en movimiento crea un campo magnético. Si además, esa carga se mueve dentro de otro campo magnético ajeno al suyo, ambos campos interaccionan. El resultado es una fuerza que se ejerce sobre dicha carga.

La fuerza tiene la siguiente expresión vectorial: $\vec{F} = q \cdot \vec{v} x \vec{B}$, en módulo $F = q \cdot v \cdot B \cdot sen(\beta)$, siendo el ángulo β el ángulo que forman la velocidad y el campo magnético. Si la carga es positiva, y siguiendo la regla de la mano derecha, la fuerza apunta en la dirección de giro de v a B; pero al contrario si la carga es negativa.

Si despejamos $B = \frac{F}{q \cdot v \cdot sen(\beta)}$. Con esta expresión obtenemos la definición de la unidad Tesla: un ***tesla*** es el campo magnético necesario para que una carga de un culombio que lo atraviese perpendicularmente a una velocidad de un metro por segundo experimente una fuerza de un newton.

La expresión $\vec{F} = q \cdot \vec{v} x \vec{B}$ se conoce también como **Fuerza de Lorentz**.

7.4.2. Conductor de longitud «L»

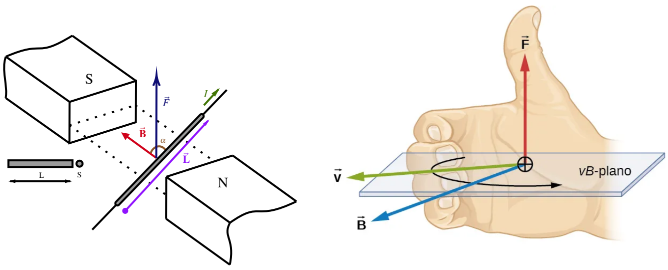


Figura 13: FUERZA EJERCIDA A UN CONDUCTOR DE LONGITUD L POR EL QUE CIRCULA UNA INTENSIDAD I, EN PRESENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO B

Si tenemos un conductor recto de longitud «L», podemos expresar la fuerza que se ejerce sobre él como: $\vec{F} = q \cdot \vec{v} x \vec{B}$, la fuerza que experimenta cada carga que lo atraviesa. Si observamos la expresión de la ecuación 12, recordaremos que $I \cdot \overrightarrow{dl} = dq \cdot \vec{v}$. Como el conductor es recto, y todas las cargas se mueven en dirección a su intensidad, podemos extender este resultado a un vector $\vec{L}$ de longitud **L** y dirección la de la línea del conductor y sentido el de la intensidad, de forma que $\vec{F} = I \cdot \vec{L} x \vec{B}$

En módulo esta fuerza es: $F = I \cdot L \cdot B \cdot sen(\alpha)$

La expresión $\vec{F} = I \cdot \vec{L} x \vec{B}$ también se conoce como **segunda ley de Laplace.**

Si el conductor no es rectilíneo, se puede obtener la fuerza según al expresión $\vec{F} = I \cdot \int \overrightarrow{dl} x \vec{B}$.

Se puede aplicar la regla de la mano derecha, si la hacemos girar desde «I» (o «v») hasta «B», el pulgar apunta a la fuerza.

Variación: espira pivotante

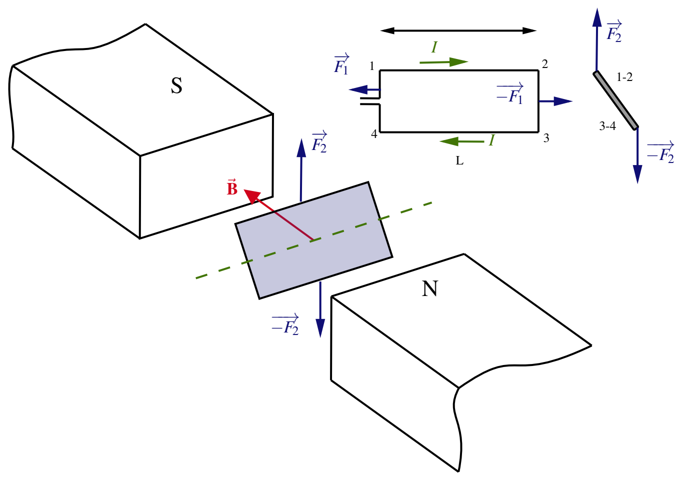
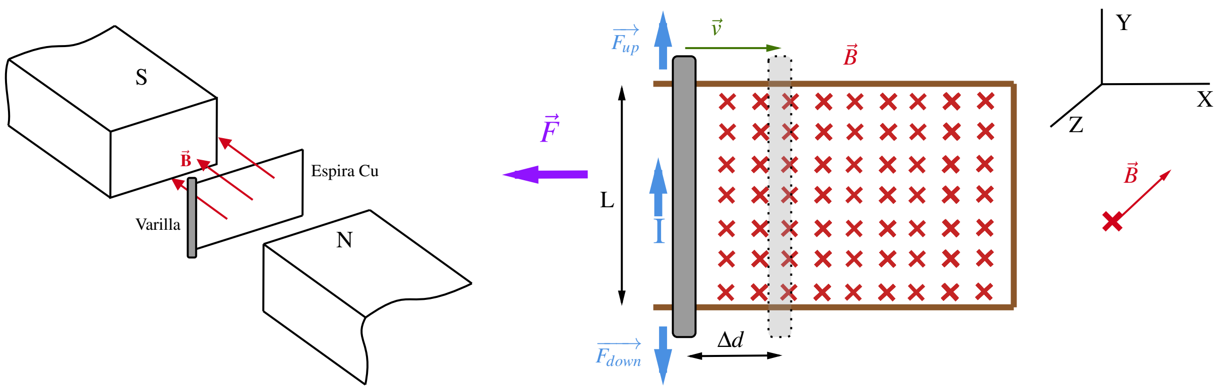


Figura 14: ESPIRA ROTANDO BAJO LA ACCIÓN DE UN CAMPO B

La espira puede girar según un eje que pasa por su centro, y paralelo a los lados más largos de longitud **L.** La recorre una intensidad de valor **I.**

Como puede observarse, la aparición de fuerzas $\overrightarrow{F_1}$ en la espira, en los lados cortos, tienden a abombarla, pero no producen otro efecto sobre ella. Sin embargo, en los lados largos aparecen fuerzas $\overrightarrow{F_2}$, iguales, y de sentido contrario ($F_2 = B \cdot I \cdot L$), que tienden a provocar la rotación de la espira. ***Es el fundamento de los motores eléctricos***.

7.5. Ley de Faraday-Lenz



(a) ESPIRA EN B (b) VISTA FRONTAL

Figura 15: LEY DE FARADAY

Supongamos la siguiente situación: una espira de cobre abierta, sobre un campo magnético y sobre la que roza una varilla de metal. En principio el conjunto no se conecta a ninguna fuente de tensión, por lo que no circula intensidad por ella. Pero ahora, empezamos a mover la varilla sobre la espira de cobre a una velocidad **v** perpendicular al campo **B**.

Se da la siguiente situación:

A) Las cargas que naturalmente están «libres» en el metal (electrones), experimentan un movimiento en el eje X ($\vec{v} = v \cdot \vec{i}$).

B) Cada carga experimenta una fuerza $\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \text{ x } \vec{B})$; como $\vec{B} = B \cdot (-\vec{k})$, cuando la carga es positiva la fuerza tiene dirección $\vec{j}$. Y si la carga es negativa dirección contraria. Por lo tanto en la zona superior se acumulan cargas positivas y en la inferior negativas. Pero estas fuerzas se compensan.

C) Esta diferencia de potencial crea una intensidad I (ver figura).

D) Esta intensidad **I**, a su vez, por efecto de la fórmula $\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$, crea una fuerza en dirección $-\overrightarrow{i}$. (ya que $\vec{B} = B \cdot (-\vec{k})$ y $\vec{L} = L \cdot \vec{j}$).

E) Por lo tanto, creamos una diferencia de potencial y, para mantener la velocidad **v** debemos compensar la aparición de esta fuerza **F**.

Se puede demostrar que la fuerza electromotriz inducida (diferencia de potencial) tiene la expresión:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \tag{15}$$

Siendo Φ el flujo del campo magnético $\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$. Por lo tanto, **la ley de Faraday nos dice que la variación del flujo magnético provoca la aparición de un diferencia de potencial (f.em. inducida) y una corriente eléctrica**. La aparición de esta corriente puede provocarse de dos maneras:

- ✔ O bien tenemos espiras de cobre de área constante y las sometemos a un campo magnético variable en el tiempo.
- ✔ O bien tenemos un campo magnético constante y variamos el área de las espiras.

Por ejemplo, la carga inalámbrica de móviles funciona de la primera forma. En los móviles existen unos bobinados de área fija, y el cargador inalámbrico lo que provoca es la aparición de un campo magnético variable en cuya proximidad en las bobinas del móvil se induce una corriente eléctrica.

En un solenoide de N espiras tendremos que $\varepsilon = -N \cdot \frac{d\phi}{dt}$

Ley de Lenz

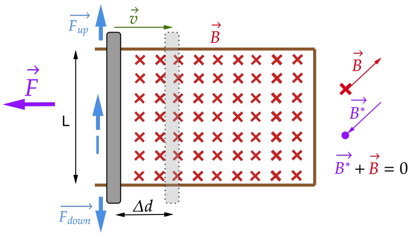


Figura 16: LEY DE LENZ

Ya sabemos de un apartado anterior que si en una espira tenemos una intensidad circulando se crea un campo magnético (ecuación 14) . Si por ejemplo la espira es circular, el campo magnético tiene la expresión $B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot R}$. Si la espira es rectangular, su expresión es más complicada, pero estará en función de la intensidad I y de los lados del rectángulo.

En todo caso la ley de Lenz nos dice que al inducir una fem ε y provocar la aparición de una intensidad **I** en una espira, se crea un campo magnético en ella $\vec{B}^*$.

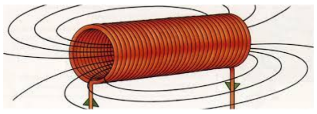
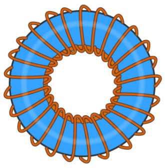
El sentido de este campo $\vec{B}^*$ provocado es tal que se opone al campo $\vec{B}$ original anulándolo.

7.6. La autoinducción

Supongamos el siguiente caso: tenemos una espira de superficie **S** fija que sometemos a una intensidad **I** que en este caso es variable en el tiempo. Ya sabemos que el paso de una corriente **I** por una espira provoca un campo **B** (ecuación 14), y si **I** es variable, **B** también será variable. Y la consecuencia de tener un campo magnético variable es tener un flujo a su vez variable, lo que me provoca a su vez la aparición de una fuerza electromotriz ε.

En este caso, puedo expresar la fuerza electromotriz como proporcional a la variación de la intensidad. **El coeficiente de proporcionalidad se llama autoinductancia o coeficiente de autoinducción, se expresa con la letra «L» y se mide en Henrios (H)**.

$$\varepsilon = -L \cdot \frac{dI}{dt} \tag{16}$$

Coeficiente de autoinducción		
Solenoide o bobina		$h \gg R$ $L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{h}$ Siendo «h» su longitud, «S» su sección y «N» el número de espiras.
Solenoide Toroidal o Toroide		Son muy habituales. Igual que el anterior, solo que «h» puede calcularse en función del radio de su fibra neutra: $h = \pi \cdot R_{neutra}$

7.7. Excitación magnética

Pensemos en un solenoide. Sabemos que el campo magnético provocado en él es $B = N \cdot \frac{\mu_0 \cdot I}{h}$ siempre que se encuentre al aire o en el vacío (**«h»** su longitud). Pero lo habitual es construir el solenoide con un núcleo de otro material. Entonces, la fórmula cambia a $B = N \cdot \frac{\mu \cdot I}{h}$, siendo ahora el factor µ el coeficiente permeabilidad magnética del medio en el que se encuentra.

Tenemos pues en la fórmula dos causas que provocan un campo magnético más o menos intenso:

Material Es más intenso cuanto más permeabilidad magnética posea, µ, siendo esta una característica del medio material que forme su núcleo.

Circuito Es más intenso cuanto más intensidad suministre a la bobina, cuantas más espiras tenga y cuanto menos largo sea (pero siempre h>>R)

Por tanto, defino la **excitación magnética H** como un vector proporcional a **B** cuyas causas son exclusivamente debidas a las características del circuito, y no al material que forme parte del núcleo de la bobina o solenoide. Se mide en amperios/metro.

$$H = \frac{B}{\mu} = N \cdot \frac{I}{h} \tag{17}$$

Permeabilidad magnética relativa

Sería el cociente $K = \frac{\mu}{\mu_o}$, un dato adimensional. Según sea este coeficiente:

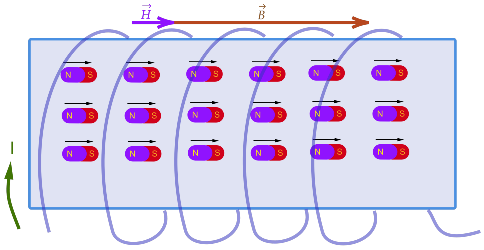
1. Si K<1, el material es **diamagnético**. El campo producido es inferior al producido en el aire o en el vacío.

2. Si $K \gtrsim 1$ el material es **paramagnético**. El campo producido es análogo al campo producido en el vacío o en el aire.

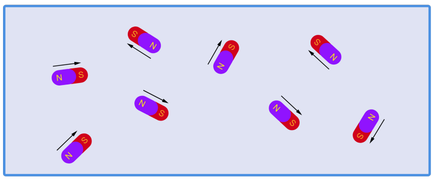
3. Si K>1, el material es **ferromagnético**. En él, el campo magnético puede ser miles de veces más intenso que en el vacío.

Materiales ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos son muy interesantes, ya que pueden construirse con ellos solenoides o bobinas potentes. Un material ferromagnético en su interior tiene una estructura similar al hierro. Los átomos de hierro se comportan como pequeños imanes. Cuando no están sometidos a ningún campo, estos imanes microscópicos se orientan al azar. Los campos magnéticos microscópicos, cuando los sumamos, se cancelan.



(a) DIPOLOS ORIENTADOS

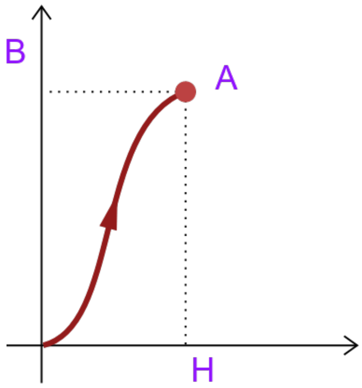


(b) DIPOLOS DESORIENTADOS EN MATERIAL FERROMAGNÉTICO

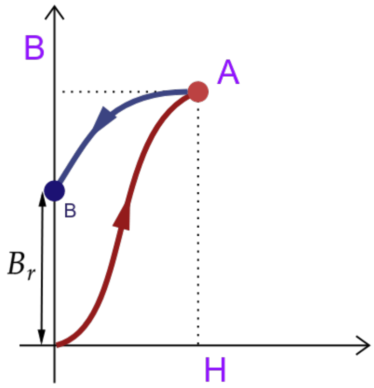
Figura 17: MATERIAL FERROMAGNÉTICO

Cuando aplicamos en una bobina una intensidad **I,** se crea un campo **B.** Hemos expresado anteriormente B como $B = \mu \cdot H$, pero sería más correcto en el caso de materiales ferromagnéticos expresarlo como $B = \mu_0 \cdot (H + M)$ siendo $\mu_0 \cdot H$ la parte del campo creada por la bobina y $\mu_0 \cdot M$ la parte del campo que es contribución de los campos de los dipolos que se han orientado y ahora no se cancelan.

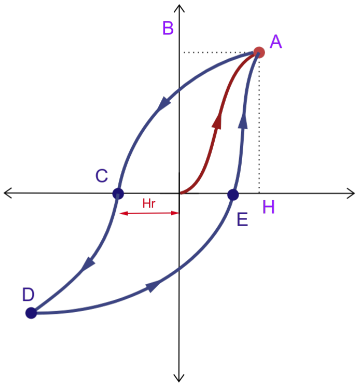
Esta relación además no es totalmente lineal. Al aumentar H aumenta B, pero en un material ferromagnético tiene un máximo, una saturación. En la figura 18a podemos observar cómo llega a un punto (A) que, aunque aumente la excitación magnética H, el campo magnético B se mantiene igual.



(a) IMANACIÓN



(b) IMANACIÓN REMANENTE



(c) CICLO HISTÉRESIS COMPLETO

Figura 18: CICLO DE HISTÉRESIS

Si llegamos a ese máximo en (punto A), y disminuimos la excitación magnética H hasta que sea 0, observaremos como, al estar los dipolos del material orientados, queda remanente un campo magnético B_r : ésta es la inducción o **magnetismo remanente** (punto B).

¿Qué está ocurriendo? Ocurre que el material «recuerda» que ha sido excitado magnéticamente. Se ha provocado la ordenación de los dipolos en una dirección en la que sus contribuciones producen un efecto neto. A esta propiedad de memoria se la denomina **histéresis.**

Para desimantar el material hace falta un campo contrario H_r denominado **campo coercitivo o fuerza coercitiva**, que vuelve a hacer $B = 0$ (punto C). Podemos seguir excitando negativamente el material que se volverá a saturar, pero ahora en sentido contrario en el punto D.

Por fin invirtiendo la corriente y la excitación se vuelve a repetir el ciclo pasando por el punto E, hasta volver al punto A. Al ciclo completo se le denomina **ciclo de histéresis**.

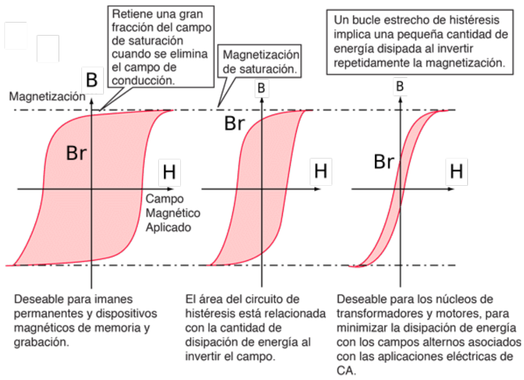


Figura 19: TIPOS DE CICLOS DE HISTÉRESIS

Los ciclos de histéresis tienen una propiedad: disipan energía en forma de calor de forma proporcional al área que encierran. Así, cuanta más área más energía disipan o pierden. Pero también a más área, mejor imanación remanente. Por lo tanto, son deseables ciclos «anchos» que alcanzan una gran imanación remanente en dispositivos como imanes permanentes o dispositivos de memoria magnética, y ciclos estrechos en materiales que formen parte de transformadores o motores. En estos últimos sobre todo si los ciclos de imanación son muy rápidos e intensos.

7.8. Corrientes de Foucault

Si a un trozo de metal le aplicamos un campo magnético variable, aparecerán en él corrientes eléctricas en forma de torbellino que se opondrán al campo. Estas corrientes son llamadas **corrientes de Foucault**. Si por ejemplo por un tubo de cobre vertical lanzamos un imán, el campo del imán provocará estas corrientes en el tubo las cuales a su vez crearán un campo magnético opuesto al del imán. Podremos observar que el imán «cae» por el tubo más lentamente de lo esperado por simple gravedad (ver enlace).

Crear estas corrientes puede ser ventajoso, como en el caso de las cocinas de inducción, donde el calor se provoca en las sartenes metálicas con campos inductivos de alta frecuencia. O perjudicial, si el objetivo no es perder calor, ya que estas corrientes disipan energía. Por ejemplo, en los transformadores, formados por bobinas con núcleos de hierro; aquí estas corrientes son muy intensas y se producen muchas pérdidas. Para minimizarlas, los núcleos de los transformadores no son macizos sino formados por láminas de hierro aisladas entre sí, lo que debilita extraordinariamente la aparición de estas corrientes.