



1. Magnetismo natural e imanes

El **magnetismo** es el fenómeno físico que, entre otros efectos, describe las conocidas fuerzas de atracción y repulsión de imanes entre sí y con el hierro. Un **imán** (magnet en inglés) es un cuerpo que genera un campo magnético permanente, que es el responsable de las fuerzas. Un campo magnético se genera por corrientes eléctricas (cargas moviéndose) y por momentos magnéticos de partículas (propiedad cuántica de partículas relacionada con el spin), y a su vez actúa sobre otras corrientes y momentos.

El **momento [dipolar] magnético** es una magnitud vectorial que indica la tendencia de un objeto a alinearse con un campo magnético; se tiende a que momento y campo sean paralelos. En un imán el momento es un vector que va de polo sur a polo norte; es imposible separarlos, no hay monopolos sino dipolos. Una espira con corriente equivale a un imán y también tiene su momento dipolar magnético asociado, con norte y sur.

El **comportamiento magnético de un material** depende de su configuración electrónica, estructura, y temperatura: el magnetismo de un imán es una manifestación macroscópica de los momentos magnéticos de sus partículas, que no se cancelan a nivel de asociación de electrones en el átomo, ni a nivel de asociación de átomos, ni a nivel de asociación de dominios de átomos en el material. Tipos de materiales:

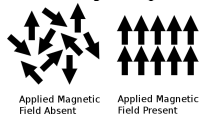
Diamagnéticos: son repelidos ligeramente por un campo magnético aplicado externamente, crean campo magnético opuesto. No son permanentes. Un ejemplo es el agua.

Paramagnéticos: tienen electrones no apareados cuyos momentos se alinean con el campo magnético aplicado externamente, lo refuerzan y son atraídos ligeramente por él, no son permanentes.

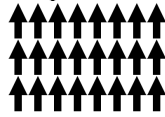
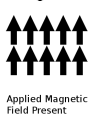
Ferromagnéticos: tienen electrones no apareados cuyos momentos se alinean entre sí en regiones llamadas dominios, por lo que son permanentes. La alineación entre dominios explica el comportamiento de todo el material, la magnetización tras aplicar un campo magnético intenso, y desmagnetización con un golpe.

Antiferromagnéticos: los momentos se alinean de manera opuesta. Son permanentes y de magnetismo débil.

Ferrimagnéticos: formados por dos iones cuyos momentos magnéticos se alinean de manera opuesta, siendo uno mayor que otro. Son permanentes. Un ejemplo es la magnetita (Fe_3O_4)



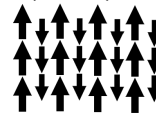
Paramagnetismo.



Ferromagnetismo



Antiferromagnetismo



Ferrimagnetismo; cc-by-sa, ACGrain, Wikimedia

El magnetismo permanente / no temporal implica retener propiedades magnéticas si no se aplica el campo. El aumento de temperatura aumenta el desorden: a la temperatura Curie/Néel pasan a ser paramagnéticos.

1.1 Relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos

Históricamente fenómenos eléctricos y magnéticos descubiertos y tratados por separado, pero luego unificados en electromagnetismo: corrientes eléctricas (cargas en movimiento) producen campos magnéticos (Oersted) y variación de campo magnético produce corriente eléctrica (Faraday)

2. Campo magnético

Concepto general de campo de fuerzas y líneas de campo análogo a campo gravitatorio y eléctrico, solo que aquí vector campo y fuerza son siempre perpendiculares (línea fuerza \neq campo) y el que exista interacción depende de que exista desplazamiento de cargas. Líneas de campo salen de polo norte y entran por polo sur. La definición de campo magnético requiere introducir la ley de Lorentz, que es una definición indirecta.

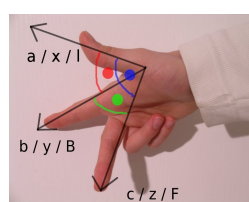
2.1 Ley de Lorentz / Fuerza de Lorentz

La **ley de Lorentz** define la fuerza magnética que se ejerce sobre una carga en una región donde hay campo magnético (la fuerza es proporcional a la carga, al módulo de v , y perpendicular a v): $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$

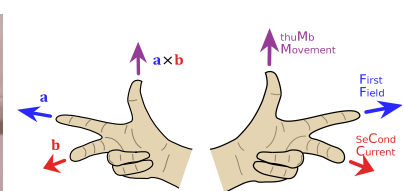
La **fuerza de Lorentz** expresa la fuerza total que se ejerce sobre una carga en una región donde hay campo eléctrico y magnético: $\vec{F} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$

Reglas para recordar estas leyes y otras análogas hay muchas: usar una si nos hacer sentir cómodos y nos da seguridad. Sirven para recordar el **producto vectorial**, el significado e interpretación variará.

$$\begin{aligned} \vec{a} \times \vec{b} &= \vec{c} \\ \vec{x} \times \vec{y} &= \vec{z} \\ \vec{i} \times \vec{j} &= \vec{k} \\ I(\vec{l} \times \vec{B}) &= \vec{F} \\ q(\vec{v} \times \vec{B}) &= \vec{F} \end{aligned}$$



Abdull, cc-by-sa



Acdx, cc-by-sa

Regla mano iz. Fleming





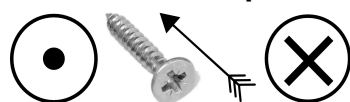
2.2 Intensidad del campo magnético/ Inducción magnética

Es un vector para cada punto del espacio, cuyo módulo indica la fuerza ejercida por unidad carga de prueba positiva que se mueve con una unidad de velocidad en dirección perpendicular al campo. Expresión asociada a ley Lorentz:

$$\text{Si } \vec{v} \perp \vec{B} \Rightarrow |\vec{B}| = \frac{|\vec{F}|}{q|\vec{v}|}$$

El campo magnético se representa por la letra B, y se utiliza nombre de inducción magnética o densidad de flujo magnético, ya que hay otra intensidad de campo magnético histórica que recibe el nombre de H asociado a materiales magnéticos/imantación. El campo B tiene en el SI unidades **Tesla (T)**, que sería el campo que ejerce una fuerza de 1 N sobre una carga de 1 C que va a 1 m/s con v perpendicular al campo. En el caso de existir varios campos, la fuerza total se obtiene usando el **principio de superposición**.

2.3 Convenio representación vectores



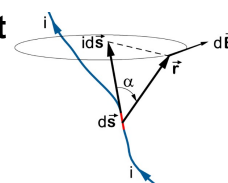
Como v (o I), F y B suelen ser perpendiculares, en representaciones en un plano se suele usar un convenio para representar vectores (campo, corriente, fuerza) de manera perpendicular al plano: \odot (también a veces un punto) indica hacia fuera del papel, dirigido hacia el lector, “la punta del vector”, y \otimes (también a veces \times ó $+$) hacia dentro del papel, “la cola del vector”, o visualizable como cabeza de tornillo de estrella.

3. Campos magnéticos creados por corrientes eléctricas

3.1 Campo creado por un elemento de corriente. Ley de Biot y Savart

$$d\vec{B} = K' \frac{I}{r^2} (\vec{dl} \times \vec{u}_r); K' = \frac{\mu_0}{4\pi} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$$

Permeabilidad magnética del vacío



Copyright Paul Wormer

Obtenido experimentalmente, campo perpendicular a r, y sentido según indica el producto vectorial o según “regla de la mano derecha” (ver corriente rectilínea). Se puede asociar una corriente a cargas positivas con cierta velocidad.

3.2 Campo creado por una corriente rectilínea e indefinida / Regla mano derecha



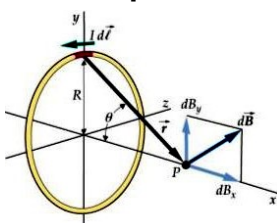
Jfmelero, cc-by-sa

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

Se obtiene integrando Ley Biot y Savart. En expresión habitual se indica sólo el módulo. Expresión completa: $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi d} (\vec{u}_l \times \vec{u}_r)$
Módulo: constante a una distancia d del conductor.

Dirección y sentido: “regla de la mano derecha”: con el pulgar apuntando en la dirección de la corriente y los dedos rodeándola, los dedos apuntan en el sentido del campo, que describe círculos concéntricos.

3.3 Campo creado por una corriente circular (espira)



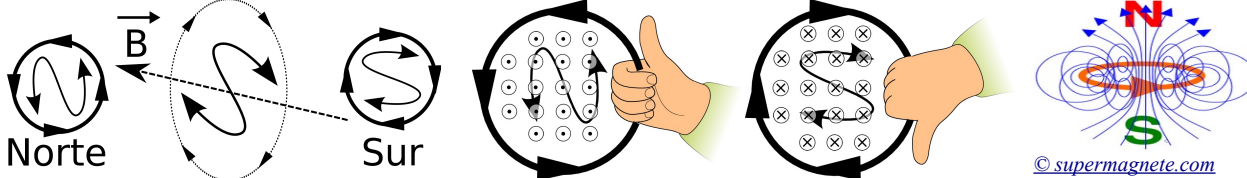
elfisicoloco.blogspot.com

Se obtiene integrando a partir Ley de Biot y Savart en el eje perpendicular a la espira que pasa por su centro. En expresión habitual se indica solo el módulo.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{\sqrt{(x^2 + R^2)^3}}$$

Módulo: constante a una distancia x del plano espira. Habitual centro espira (x=0), más simple: $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$
Dirección: eje de la espira

Sentido: según el sentido de giro corriente en la espira. Hay varias reglas gráficas para recordar el sentido (válidas para espiras de cualquier forma). Una espira con corriente tiene su momento dipolar magnético asociado y vector B en su eje, vector que va de sur a norte. Se puede asignar polaridad a caras de la espira según el sentido de la corriente



© supermagnete.com

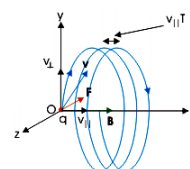
4. Fuerzas sobre cargas móviles en campos magnéticos: Ley de Lorentz

La ley de Lorentz, ya vista al definir campo, determina la fuerza magnética ejercida y permite el análisis de movimiento de cargas eléctricas bajo campos magnéticos.

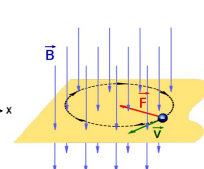
- Si $v=0$, o v es paralela al campo magnético, la fuerza magnética es nula
- Si v es perpendicular a B, la fuerza es centrípeta y describe una circunferencia radio R
- En el caso general, es composición de ambos: movimiento helicoidal.

Ejemplos de aplicaciones: desvío electrones en tubo de televisión (también con campo eléctrico), selector de velocidades (medición q/m Thomson), espectrómetro/espectrógrafo de masas, aceleradores de partículas, ciclotrón, confinamiento magnético, auroras

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$



cnx.org, cc-by-sa



educastur.





4.1 Interacciones magnéticas sobre corrientes eléctricas. Fuerza sobre una corriente

$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$ Ley de Laplace: Expresión análoga a ley de Lorentz, pero q y v cambian por I y l; intensidad como grupo de cargas móviles. (Recordar: corriente va de + a - ; electrones van de - a +)

4.2 Fuerza sobre una espira

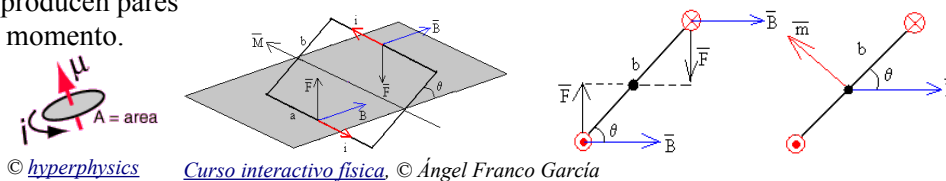
En espiras rectangulares, se producen pares de fuerzas, que producen un momento.

$$\vec{M} = I(\vec{S} \times \vec{B})$$

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

$$\vec{m} = i\vec{A} = I\vec{S}$$

S=superficie/área espira



© hyperphysics Curso interactivo física. © Ángel Franco García

El momento magnético de una espira, de forma cualquiera, es un vector perpendicular a la misma, de módulo IS, y de sentido el asociado a la regla del sacacorchos según el sentido de giro de la corriente en la espira.

No hay M ni giro si m y B son paralelos, y si no son paralelos, m y B tienen a alinearse (analogía brújula)

4.3 Interacciones magnéticas entre corrientes rectilíneas. Definición de Amperio

Dos conductores rectilíneos paralelos se ejercen una fuerza entre sí de mismo módulo: si la corriente es en el mismo sentido se atraen, si es en sentido contrario se repelen. Aprovechando esta fuerza se define Amperio como la corriente que, circulando por dos conductores paralelos e indefinidos separados una distancia de 1 m en el vacío, produce sobre cada conductor una fuerza de $2 \cdot 10^{-7}$ N por metro de longitud de conductor.

5. Ley de Ampère

$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$ La integral de línea de B (circulación) a lo largo de un camino cerrado depende únicamente de las corrientes encerradas por esa curva.

Para decidir el signo de las corrientes encerradas (sentido opuesto cambia el signo) se utiliza la regla de la mano derecha: con los dedos en el sentido de integración, el pulgar señala las corrientes positivas.

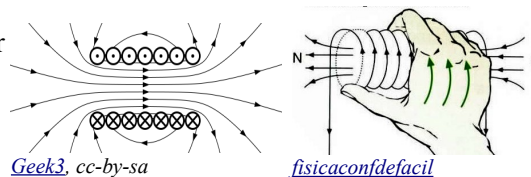
5.1 Aplicaciones ley de Ampère

De manera análoga a ley de Gauss para campo eléctrico, esta ley con una selección adecuada del recorrido de integración, nos permite calcular el campo magnético en ciertas situaciones (más: toroide, interior conductor)

$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$ Campo en interior **solenoid** (radio despreciable frente a longitud bobina l), válido para el interior del solenoid, donde es uniforme. Sentido líneas

de campo de solenoid: mismo criterio que en espiras.

$B = \frac{\mu_0 N I}{2r}$ **Agrupación N espiras muy próximas** (no confundir con solenoid): válido para el centro de la agrupación de espiras.



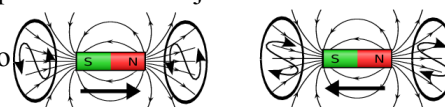
Geek3, cc-by-sa

fisicakonfdefacil

6. Inducción electromagnética. Leyes de Faraday y de Lenz

Concepto e historia: generar corriente eléctrica con variación campo magnético. Experiencias Faraday (mover imán cerca circuito), Henry (mover circuito cerca imán) e interpretación con flujo.

Ley de Lenz. Nos da el signo de la corriente inducida. La corriente se induce en un sentido tal que los efectos que genera se oponen al cambio de flujo que que la origina.

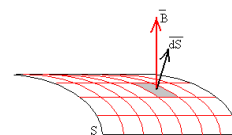


Dibujos muestra caras de las espiras orientadas al imán

Ley de Faraday. Nos da el valor de la corriente inducida.

La corriente inducida es producida por una fuerza electromotriz (fem) inducida que es directamente proporcional a la rapidez con la que varía el flujo total inductor. En la expresión de la ley de Faraday hay que destacar:

$$\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

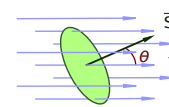


© Ángel Franco García

1. El signo menos está asociado a la ley de Lenz.
2. Si hay N espiras, la expresión se multiplica por N ("S", flujo y fem N veces mayor)

El **flujo magnético** a través de una superficie es $\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$ donde la integral está extendida a toda la superficie, que en el caso habitual de que el campo sea uniforme en toda la superficie y la superficie sea plana, se simplifica como $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos \alpha$

El flujo magnético en el SI se mide en Weber (Wb), y de la definición de flujo magnético se puede definir Tesla como Wb/m² (Weber por metro cuadrado)



Jfmelero, cc-by-sa

Dado que en la inducción electromagnética aparece voltaje, corriente, y las espiras reales tienen resistencia, es imprescindible tener presente la ley de Ohm: $R = V/I$

Para deducir el sentido de giro de la corriente inducida en la espira puede ser útil la regla asociada a las letras S y N, recordando que la corriente inducida se opone al efecto que la produce.





7. Anexos / temas para profundizar

7.1 Producto vectorial de vectores con determinante.

Método numérico para realizar el producto vectorial de vectores cualquiera, frecuente en campo magnético.

$$\vec{v}_1 = (x_1, y_1, z_1), \vec{v}_2 = (x_2, y_2, z_2); (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}$$

Recordar que $\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$ El producto vectorial se introduce antes en gravitación al ver momento angular y momento de una fuerza. Este método es matemático, adicional a reglas mnemotécnicas: tornillo, sacacorchos, manillas reloj, mano derecha e izquierda, acelerador manillar moto ...

7.2 Analogías y diferencias entre campos gravitatorio, eléctrico y magnético

Visión completa tras haber visto campo gravitatorio y eléctrico con anterioridad, amplía lo visto entre ellos.

	Gravitatorio	Eléctrico	Magnético
Ley asociada	Gravitación	Coulomb	Biot-Savart / Lorentz
<i>Fuente del campo</i>	Masa	Carga	Movimiento carga/corriente eléctrica ⁽¹⁾
<i>Afecta a cuerpos</i>	Con masa ⁽²⁾	Con carga	Con carga que esté en movimiento ⁽¹⁾
<i>Dependencia distancia</i>	1/R ²	1/R ²	1/R ²
<i>Dependencia medio</i>	No, G universal	Sí, ε, permitividad	Sí, μ, permeabilidad magnética
<i>Dirección fuerzas</i>	Centrales	Centrales	Perpendiculares a vector que va de fuente de campo al punto donde se ejerce fuerza
<i>Sentido fuerza</i>	Siempre atractiva	Atractiva/repulsiva, según signos cargas	Atractiva y repulsiva, según sentido corriente
Conservativo	Sí	Sí	No
Energía potencial	Sí, negativa	Sí, positiva o negativa	No ⁽³⁾

(1) También es fuente de campo el momento magnético de partículas, y también les afecta a ellas.

(2) En relatividad la gravedad también afecta a la luz, que no tiene masa

(3) A veces se define [energía potencial magnética](#) de un momento dipolar magnético en función de su orientación dentro de un campo magnético uniforme

7.3 Producción de energía eléctrica

$$\Phi = NBS \cos(\omega t)$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -NBS\omega \sin(\omega t)$$

$$e_m = NBS\omega$$

$$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; e_e = \frac{e_m}{\sqrt{2}}$$

Generador: bobinado (N espiras) gira: flujo, fem, intensidad sinusoidal
Valores eficaces de tensión e intensidad: valor cuadrático medio en un periodo, valor que produce el mismo calor en el mismo tiempo que corriente continua en una resistencia.

En el uso de energía alterna es habitual el uso de transformadores; se produce energía en centrales, se transporta a alta tensión.

Un **transformador** es un dispositivo transporta energía de un circuito corriente alterna a otro circuito de corriente alterna utilizando **inducción**

mutua (teniendo dos espiras, si circula una corriente variable por la primera, genera campo magnético y flujo variable que induce corriente en la segunda, y a su vez esta corriente inducida de la segunda induce corriente en la primera). Permite cambiar propiedades de una corriente alterna (reducir o aumentar la tensión), pero manteniendo la frecuencia.

El principio de funcionamiento del transformador es tener un bobinado primario (p) y secundario (s) que comparten el flujo magnético a través de un núcleo, teniendo cada uno un número de espiras distinto (N_s y N_p). Relacionando flujos tenemos:

$$\Phi_s = N_s \Phi; V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt}; \Phi_p = N_p \Phi; V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt}$$

Eliminando el término en común llegamos a la ecuación básica de un transformador $\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$

También podemos poner la relación en función de las corrientes, asumiendo que no hay pérdidas en el transformador, la energía se conserva y la potencia eléctrica a la entrada es igual a la de salida, por lo que

$$I_p V_p = I_s V_s \Rightarrow \frac{V_s}{V_p} = \frac{I_p}{I_s}$$





7.4 Aproximación histórica a la síntesis electromagnética de Maxwell

En 1865 Maxwell unificó leyes existentes en una formulación única teoría electromagnética, usando el concepto de campo, sintetizó en las “**Ecuaciones de Maxwell**” (antes más, hoy 4 y se pueden expresar en forma diferencial o integral). Además de organizar y sintetizar, realizó aportaciones como generalizar la ley Ampère con corriente desplazamiento, y supuso la **unificación** de electricidad, magnetismo y óptica.

Ley de Gauss (asociable Ley de Coulomb)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0}$
Ley de Gauss campo magnético (no existencia de monopolos)	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
Ley de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$
Ley de Ampère generalizada	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$

De las ecuaciones, en vacío $q=0$ y $\vec{j}=0$, se deriva $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, velocidad de la luz en el vacío, por lo que Maxwell dedujo que la luz es una **onda electromagnética**: propagación de campo eléctrico y magnético perpendiculares entre sí, refleja metales, refracción. Comprobación experimental Hertz 1885. Más detalles sobre espectro electromagnético en el bloque de “óptica física”

La unificación realizada por Maxwell ha sugerido buscar nuevas unificaciones, como la electrodébil, ...
 Importancia: primer abandono interpretación naturaleza con materia y movimiento. Superación éter.

7.5. Aplicaciones electromagnetismo

Algunas aplicaciones ya comentadas al ver las fuerzas sobre cargas móviles en campos magnéticos.

La inducción de corriente en espiras ya comentada al ver producción de energía eléctrica y transformadores. Las ondas electromagnéticas, en todo su espectro, tienen gran cantidad de aplicaciones, pe microondas.

Bobinas: son elementos utilizados en circuitos de alterna, símbolo L. Unidad Henrio (H). Se basan en un caso concreto de inducción mutua que es la **autoinducción**: con una única espira una corriente variable induce una fuerza electromotriz en la propia espira. El flujo es proporcional a la corriente, $\Phi=L \cdot I$, siendo L el **coeficiente de autoinducción**, que depende geometría bobina y de permeabilidad magnética del medio. La fem autoinducida depende del número de espiras de la bobina, de L, y de la variación de la corriente eléctrica que circula por ella.

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \cdot L \cdot \frac{dI}{dt}$$

Electroimanes: imanes temporales asociados al paso de una corriente eléctrica por una espira. Uso en estátor de motores eléctricos, grúas, separación materiales, trenes levitación magnética, relés, frenos

Motores: transforman energía eléctrica en mecánica, cualitativamente generadores funcionando a la inversa. Dos partes: estátor, parte fija, y rotor, parte móvil normalmente cilíndrica. En ambas partes hay cierto número de imanes / polos, bien permanentes o electroimanes. Para hacer llegar la corriente al rotor se utilizan escobillas. Los motores pueden ser de **corriente continua**, en los que se utilizan delgas, y de **corriente alterna** (universal, asíncrono o de inducción (con rotor bobinado o de jaula de ardilla), síncrono), de una o de varias fases. Sugerencia: LearnEngineering.org [Electrical Machines](http://LearnEngineering.org/ElectricalMachines)

Instrumentos de medida: galvanómetro (amperímetro, voltímetro), rotación aguja unida a bobina.

Altavoces: son transductores electroacústicos, que convierten una señal eléctrica en sonido. El tipo más habitual es el dinámico: la señal pasa por una bobina móvil creando un flujo variable que interacciona con el flujo de un imán permanente, y la bobina se mueve junto con un diafragma produciendo sonido.

Micrófonos: convierte sonido en electricidad, y uno de sus tipos es el dinámico, con el mismo principio de funcionamiento que los altavoces dinámicos, aunque hay otros como los piezoeléctricos y de condensador.

Resonancia magnética nuclear: se aplica un campo magnético muy intenso que hace que el momento magnético nuclear de ciertos átomos se alinee con él, y se altera esta alineación con pulsos electromagnéticos de la frecuencia de resonancia adecuada, detectando cómo los núcleos emiten radiación al volver a alinearse. Es una técnica no solamente utilizada en medicina para obtención imágenes, también en química.

Paleomagnetismo: estudio magnetismo en rocas, es una de las pruebas a favor teoría tectónica de placas.

Almacenamiento magnético: cinta, banda tarjetas, discos duros (usan imanes neodimio para miniaturizar)

7.6 Electromagnetismo y modelos atómicos

Fallo modelo atómico de Rutherford; una carga radia energía al girar / tener aceleración. Sin estar acelerada E y B se mueven con la carga y no radia, pero si acelera debe aportar energía al espacio y radia

