



Tema 8: Inducción electromagnética y energía magnética

Joaquín Mur Amada



Tema 8 – Índice.

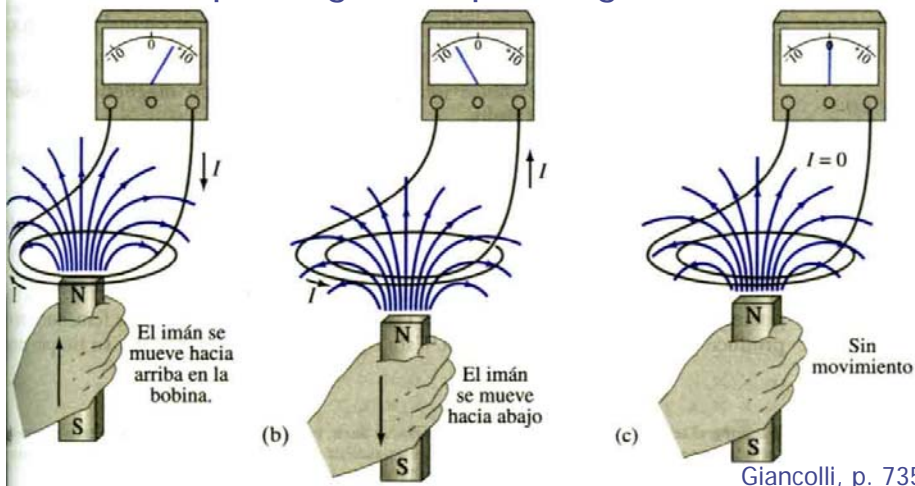
2

1. Los Experimentos de Faraday
2. La Ley de Faraday y Lenz
 - 2.1. Fundamento energético de la Ley de Lenz
3. F.e.m. inducida sobre un circuito móvil en un campo magnético estático
4. Inductancias
 - 4.1. Autoinducción
 - 4.2. Inducción mutua
5. El transformador
6. Energía magnética
 - 6.1. Densidad de energía en función de B y H
7. Corrientes de Foucault
8. Generadores eléctricos básicos

3

1- Los experimentos de Faraday

◆ Un campo magnético puede generar una fem:

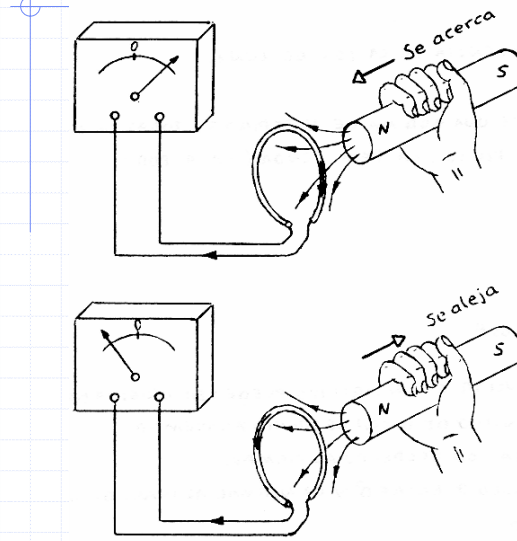


Vídeo del experimento de Faraday



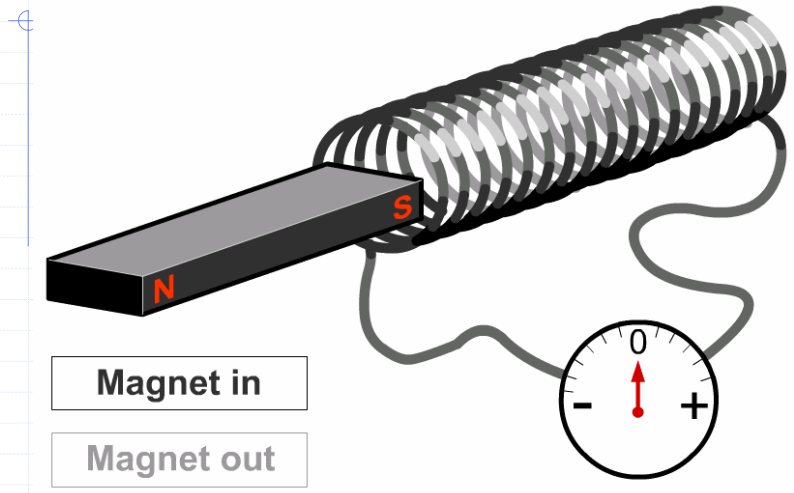


Fuerza electromotriz inducida y Ley de Faraday

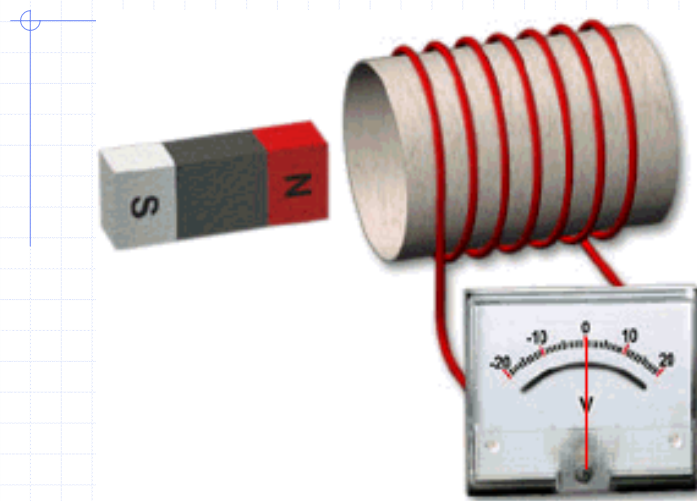


◆ Siempre que hay un movimiento relativo entre el imán y el circuito de la espira se genera una corriente en el circuito.

Inducción de corriente mediante un imán móvil

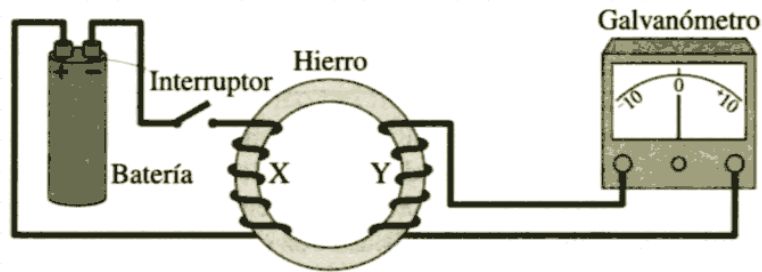


Inducción de corriente mediante un imán móvil



Una variación brusca de corriente de un circuito genera otra en un circuito cercano

- ◆ El galvanómetro marca momentáneamente cuando se cierra o se abre el interruptor S. No interviene ningún movimiento físico entre las bobinas.



- ◆ La corriente que aparece se llama corriente inducida originada por una f.e.m. inducida. Giancolli, p. 735

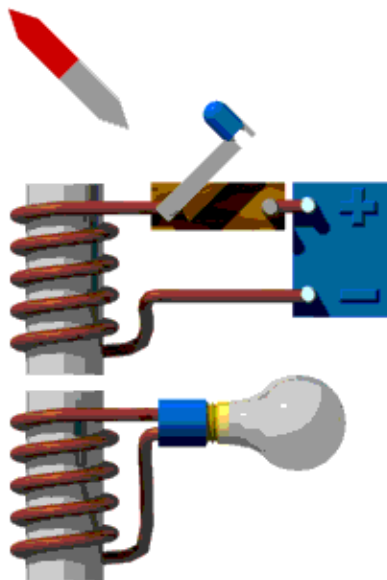
Experimento de Faraday



- ◆ El toroide tiende a mantener el número de líneas de campo B (flujo) constante por medio de la corriente inducida.
- ◆ Cuando varía la corriente en el arrollamiento primario, aparece una corriente en el secundario opuesta a la variación de flujo

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday/index.html>

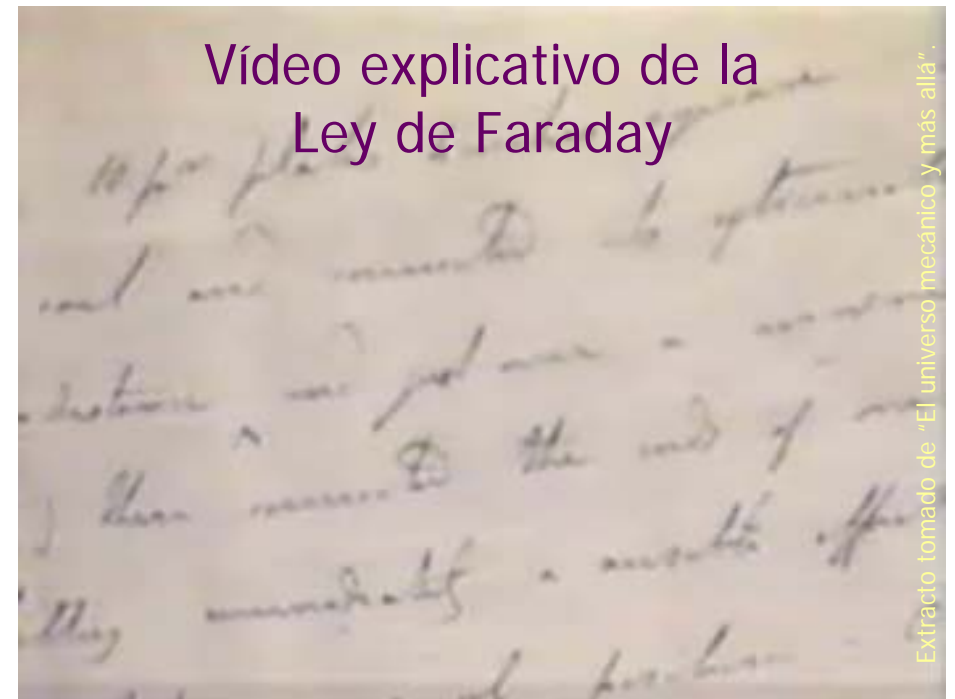
Otro experimento con solenoides



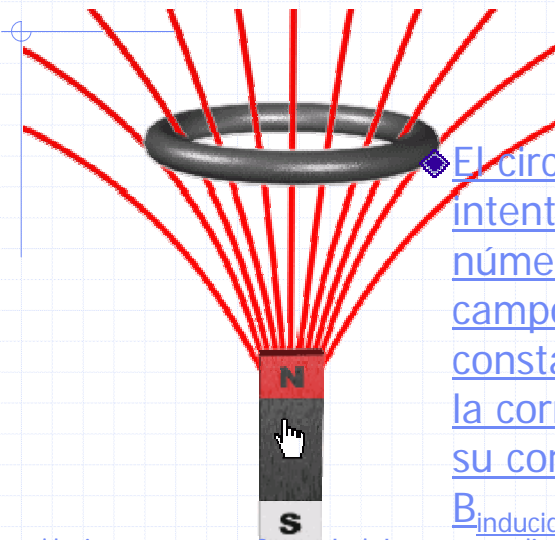
- ◆ Cuando se produce una variación brusca del campo magnético B se induce una corriente en el solenoide y se ilumina la bombilla.

<http://www.windpower.org/en/stat/emag/induct1.htm>

Vídeo explicativo de la Ley de Faraday



Animación de la ley de Lenz



El circuito siempre intenta mantener el número de líneas de campo B (flujo) sea constante por medio de la corriente inducida y su correspondiente B_{inducido}

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lenzlaw/index.html>

2- La Ley de Faraday-Lenz

- La f.e.m. inducida en un circuito es igual a la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito. El sentido es tal que se opone al cambio de flujo.

- Hoja explicativa

$$\varepsilon = \oint_{\text{Circuito}} \vec{E}_{\text{NC}} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \Phi_B = -\frac{d}{dt} \int_{\text{Superficie limitada por los conductores del circuito}} \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

- Cuando tenemos una bobina formada por N espiras:

$$\Phi_{\text{bobina}} = N \Phi_{\text{1espira}} \Rightarrow \varepsilon_{\text{bobina}} = N \varepsilon_{\text{1espira}}$$

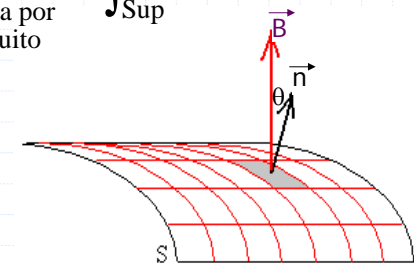
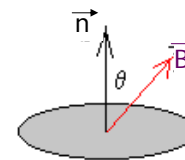
Resnick 36.2, Serway 31.1

Ley de Faraday. Circulación de \vec{E}

Extracto tomado de "El universo mecánico y más allá".

¿Cómo se puede variar Φ_B ?

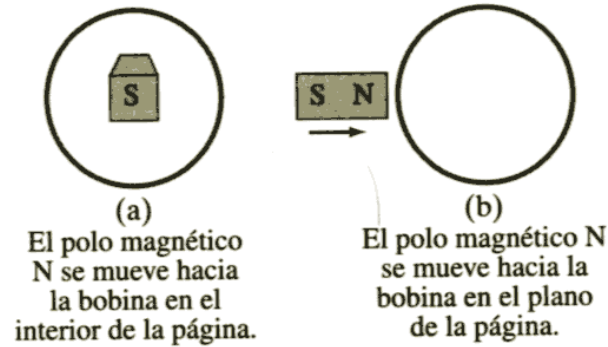
$$\Phi_B = \int_{\text{Superficie limitada por los cables del circuito}} \vec{B} \cdot \vec{n} dS = \int_{\text{Sup}} B dS \cos \theta$$



- Variando la magnitud de $|\vec{B}|$
- Variando el área S
- Variando el ángulo θ entre \vec{B} y la normal \vec{n} al plano de la espira

A. Franco. Curso interactivo de Física

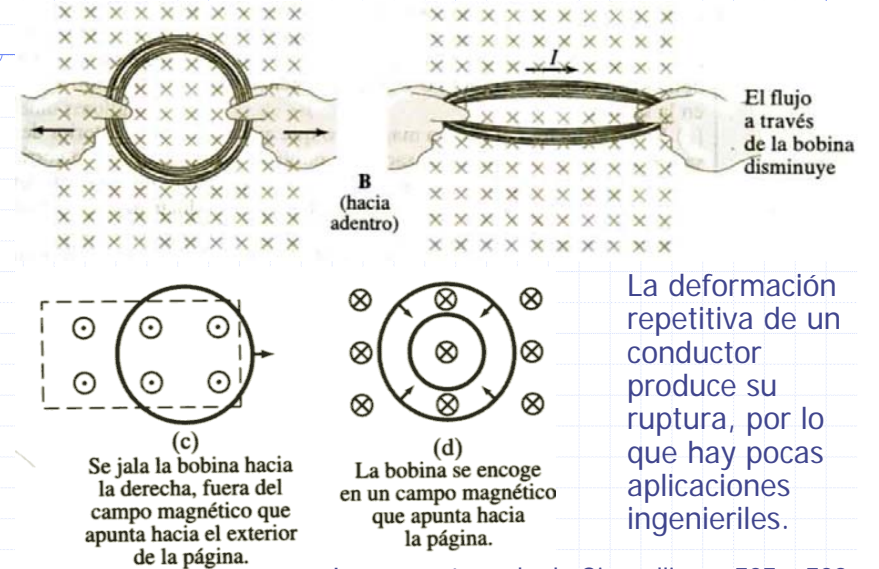
a) Variar Φ_B modificando $|\vec{B}|$



Ejemplos típicos: transformadores, bobinas, sensores inductivos...

Imagen tomada de Giancoli, p. 738

b) Variar Φ_B modificando S

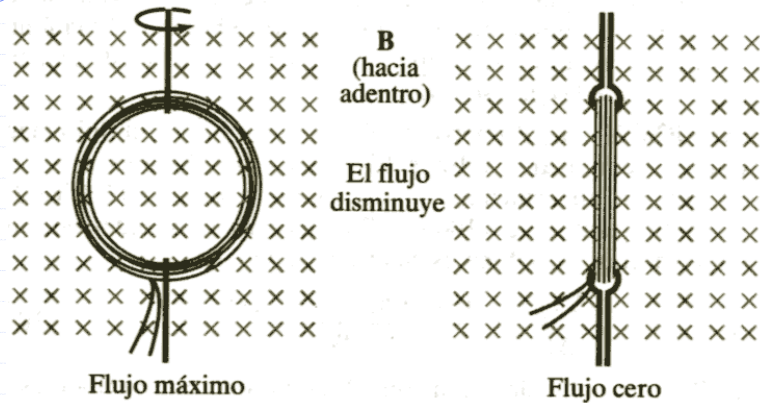


La deformación repetitiva de un conductor produce su ruptura, por lo que hay pocas aplicaciones ingenieriles.

Imagenes tomada de Giancoli, pp. 737 y 738

c) Variar Φ_B modificando θ

(ángulo entre \vec{B} y la normal \vec{n} al plano de la espira)



Ejemplos típicos: generadores, motores...

Imagen tomada de Giancoli, p. 737



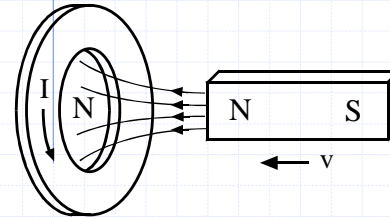
2.1. Fundamento energético de la Ley de Lenz

- La polaridad de la f.e.m. inducida es tal que tiende a producir una corriente que crea un flujo magnético que se **OPONE** al cambio del flujo magnético principal a través del circuito.
- Al acercar un imán a un circuito, se genera un polo del mismo tipo que el que estamos acercarnos → fuerza de repulsión → tenemos que realizar trabajo.
- Al alejar un imán de un circuito, se genera un polo de distinto tipo del que está junto al circuito → fuerza de atracción → hay que realizar trabajo.

Resnick 36.3; A. Pardina, Electricidad y Magnetismo, 1º Eléctricos, p. 12-2 y 3

Oposición al movimiento o cambio → hay que realizar trabajo

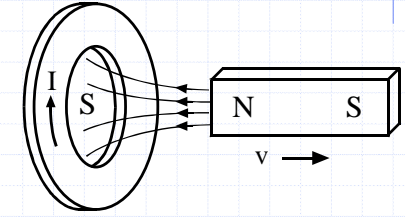
Acercamos un imán a una espira:



Cara norte ← → polo norte
fuerza de repulsión

Al acercar el imán tenemos que realizar trabajo para vencer la repulsión.

Alejamos un imán de una espira:



Cara sur → ← polo norte
fuerza de atracción

Al alejar el imán tenemos que realizar trabajo para vencer la atracción.

El trabajo mecánico realizado al mover el imán se convierte en calor en la espira por efecto joule



3- F.e.m. inducida en un conductor en movimiento

Resolución por la fuerza de Lorentz

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{E}_{NC} = \frac{\vec{F}}{q} = \vec{v} \times \vec{B}$$

En una barra donde $\vec{v} \perp \vec{B}$ y $\vec{v} \perp$ barra

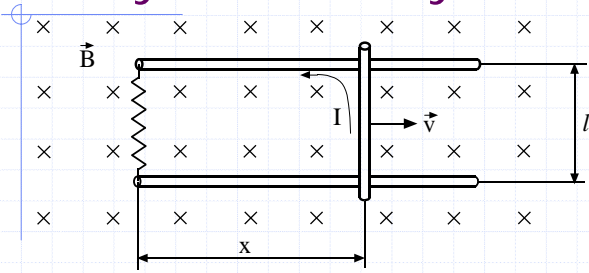
$$\varepsilon = \oint_{\text{Circuito}} \vec{E}_{NC} \cdot d\vec{l} = \int_{\text{Partes móviles}} \vec{E}_{NC} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{Partes estáticas}} \vec{E}_{NC} \cdot d\vec{l}$$

$$\varepsilon = \int_{\text{barra móvil}} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} + \int_{\text{Resto del circuito}} (\vec{0} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = B \ell v$$

Extremo positivo: el apuntado por $\vec{v} \times \vec{B}$

Animación interactiva (problema 5):
<http://cwx.prenhall.com/bookbind/pubbooks/giancoli3/chapter29/multiple3/deluxe-content.html>

Resolución a través de la ley de Faraday-Lenz



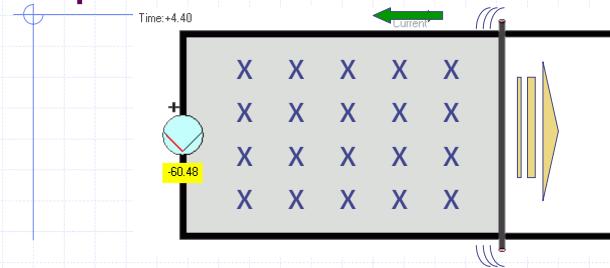
El área del circuito en un instante dado de tiempo será: $S = l \cdot x$

El flujo magnético que atraviesa dicha área será: $\phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot x$

La f.e.m. inducida según la ley de Faraday, vendrá dada por la velocidad con que varía el flujo:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(B \cdot l \cdot x) = -B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$

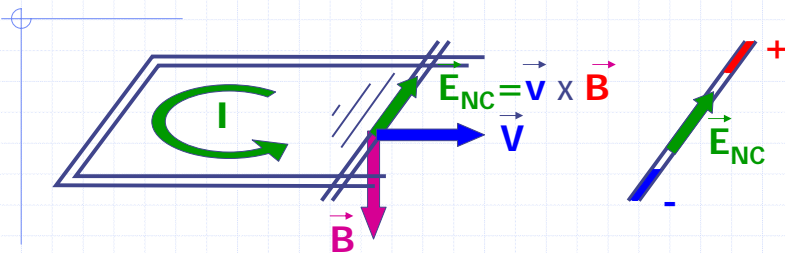
Sentido de la corriente: el que se opone a la variación de flujo



◆ El signo (-) es una consecuencia de la ley de Lenz, para determinar el sentido de la f.e.m.



Sentido de la f.e.m. inducida en una varilla moviéndose



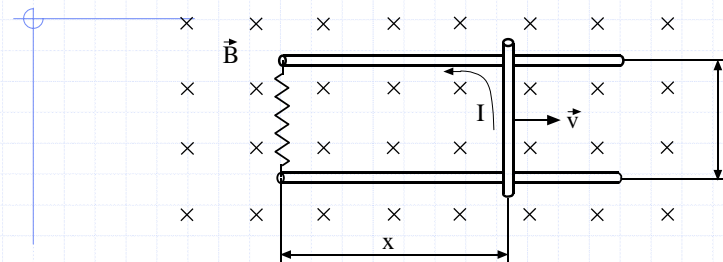
Extremo o terminal positivo:

el apuntado por $\vec{v} \times \vec{B}$

Equivalente circuital:



Fuerza necesaria para mover la barra



$$\vec{F}_{\text{barra}} = \int_{\text{barra}} I d\vec{l} \times \vec{B} = I |\vec{B}| l \vec{u}_x \quad (\text{sentido opuesto al movimiento})$$

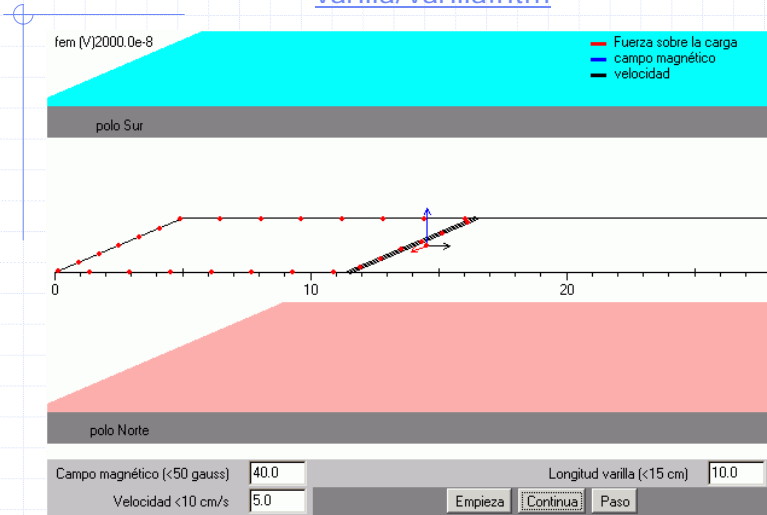
Potencia necesaria para mover la barra: $P = \vec{F}_{\text{barra}} \cdot \vec{v} = IB \ell v = I \varepsilon$

Potencia eléctrica en el circuito: $P = I \varepsilon$

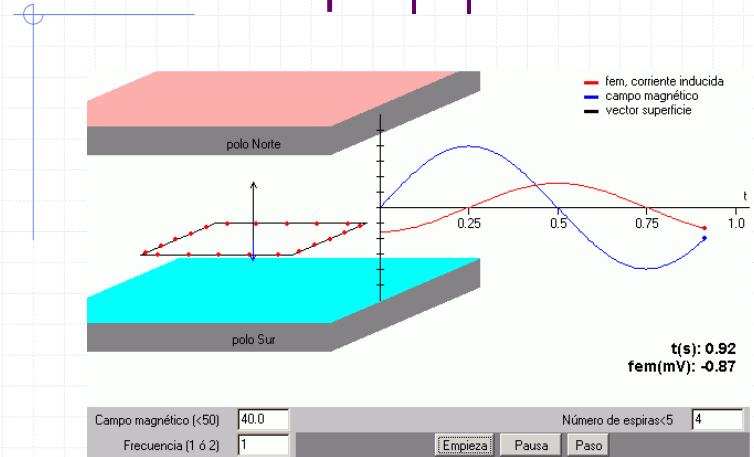
⇒ **Generador elemental que transforma energía mecánica en energía eléctrica.**

Animación interactiva:

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/varilla/varilla.htm>

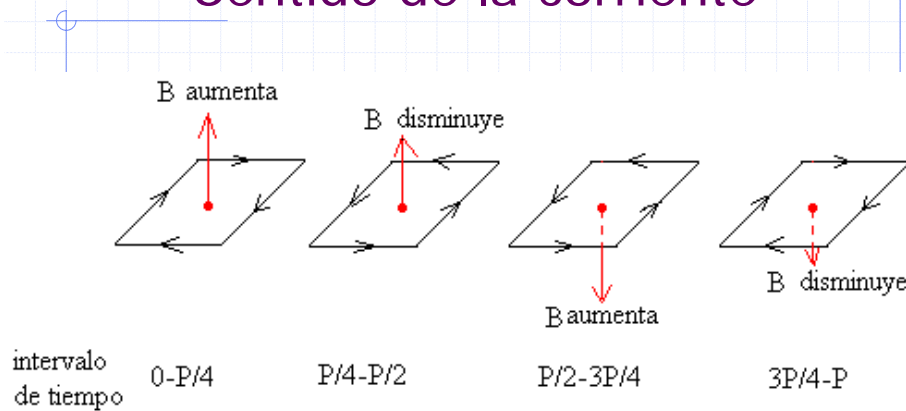


Espira fija dentro de una región con campo $|\vec{B}|(t)$ sinusoidal



Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/variable/variable.htm>

Sentido de la corriente



Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/variable/variable.htm>

Razona el sentido de las corrientes inducidas

Dos bobinas de alambre se mueven en los alrededores de un alambre recto de gran longitud que transporta una corriente estable como se indica en la figura 29-26. Calcule la dirección de la corriente inducida en cada bobina.

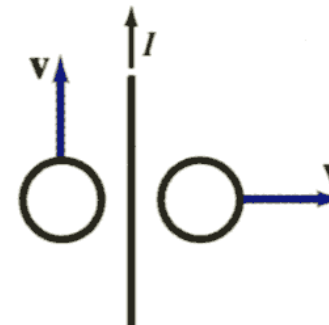
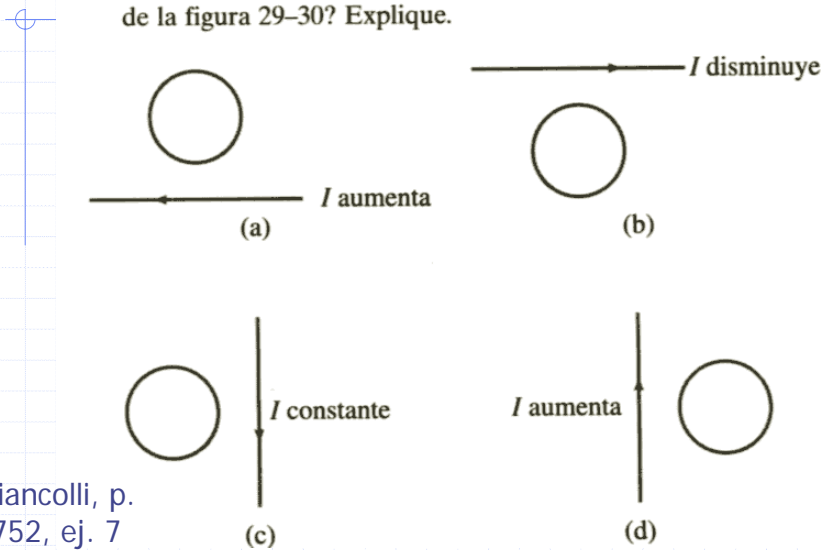


FIGURA 29-26
Pregunta 5.

Giancolli, p. 751, ej. 5

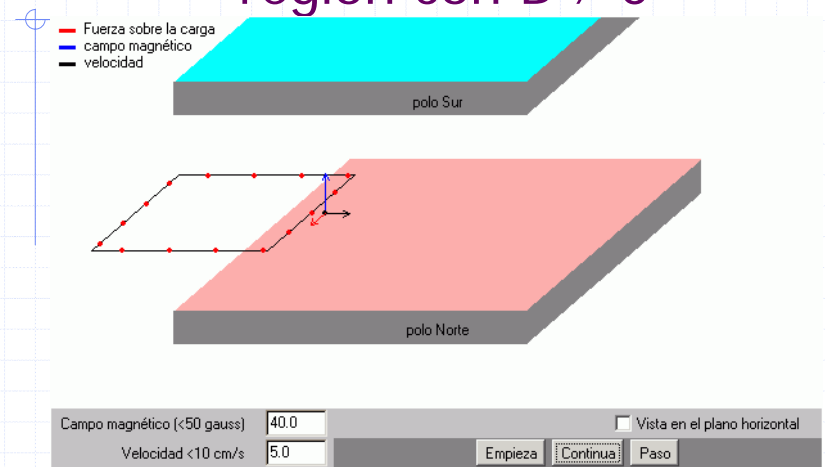
Razona el sentido de las corrientes inducidas

7. (II) ¿Cuál será la dirección de la corriente inducida en la bobina circular debido a la corriente que se muestra en cada parte de la figura 29-30? Explique.



Giancoli, p. 752, ej. 7

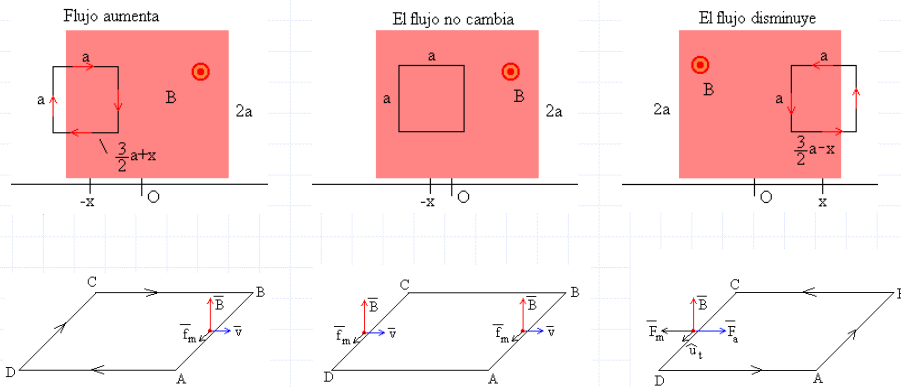
Espira que entra dentro de una región con $B \neq 0$



Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/espira/espira.htm>

Tres etapas: espira...

entrando dentro saliendo

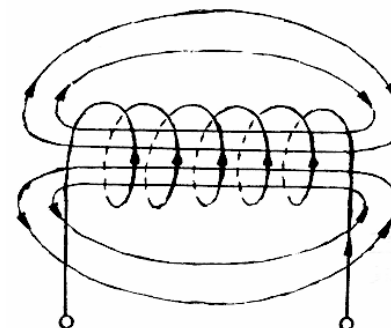


Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/espira/espira.htm>

4. Autoinductancia

◆ En una bobina, el flujo total Φ_t atraviesa a toda la bobina. Es decir, pasa a través de sus N espiras.

$$\Phi_{\text{total a través de las } N \text{ espiras}} = N_{\text{espiras}} \Phi_{1 \text{ espira}}$$



Φ ESTÁ ORIGINADO POR I Y POR LAS N ESPIRAS
 $\Phi_t = N\Phi$: FLUJO TOTAL ABRAZADO POR LA BOBINA

$$L = \frac{\Phi_t}{I} = \frac{N \cdot \Phi_{\text{espira}}}{I} \quad \text{Unidad: } [L] = \frac{[\Phi]}{[I]} = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \text{H (henrio)}$$

Unidades de autoinducción

- ◆ La autoinducción se mide en Henrios
- ◆ El Henrio es la inductancia propia de un circuito que al ser recorrido por un amperio es atravesado por un flujo total abrazado de 1 Wb.

Valor de la fem autoinducida en una inductancia

$$L = \frac{\Phi_{\text{total}}}{I} = \frac{N_{\text{espiras}} \cdot \Phi_{\text{una espira}}}{I} = \frac{N \cdot \Phi}{I}$$

$$\Rightarrow N \cdot \Phi = L \cdot I \quad \text{Según la ley de Faraday:}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(N \cdot \Phi) = -\frac{d}{dt}(L \cdot I) = -L \frac{dI}{dt}$$

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$$

La f.e.m. inducida es proporcional a la velocidad con que varía la corriente. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de autoinducción.



4.1 Autoinducción: Cálculo para circuitos básicos

39

PASOS TÍPICOS PARA CALCULAR L:

1. Cálculo de B mediante la ley de Ampere.
2. Cálculo del flujo magnético creado sobre el mismo circuito por su campo B.
3. Cálculo del coeficiente de autoinducción como el cociente entre el flujo y la intensidad por el circuito

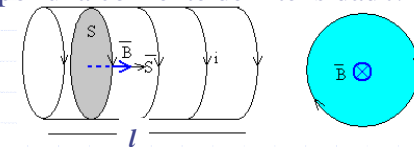
$$L = \frac{\Phi_{\text{total a través de las N espiras}}}{I} = \frac{N_{\text{espiras}} \Phi_{1 \text{ espira}}}{I}$$

Del mismo modo que la capacidad, el coeficiente de autoinducción solamente depende de la geometría del circuito y de las propiedades magnéticas de la sustancia que se coloque en el interior del solenoide. La autoinducción de un solenoide de dimensiones dadas es mucho mayor si tiene un núcleo de hierro que si se encuentra en el vacío

Ejemplo: coeficiente de autoinducción L de un solenoide

40

Disponemos de un solenoide de N espiras, de longitud l y de sección S recorrido por una corriente de intensidad i .



- 1.- El campo magnético producido por la corriente que recorre el solenoide suponemos que es uniforme y paralelo a su eje, cuyo valor hemos obtenido aplicando la ley de Ampère $B = \frac{\mu_0 N i}{l}$

- 2.- Este campo atraviesa las espiras el solenoide, el flujo de dicho campo a través de todas las espiras del solenoide se denomina flujo propio.

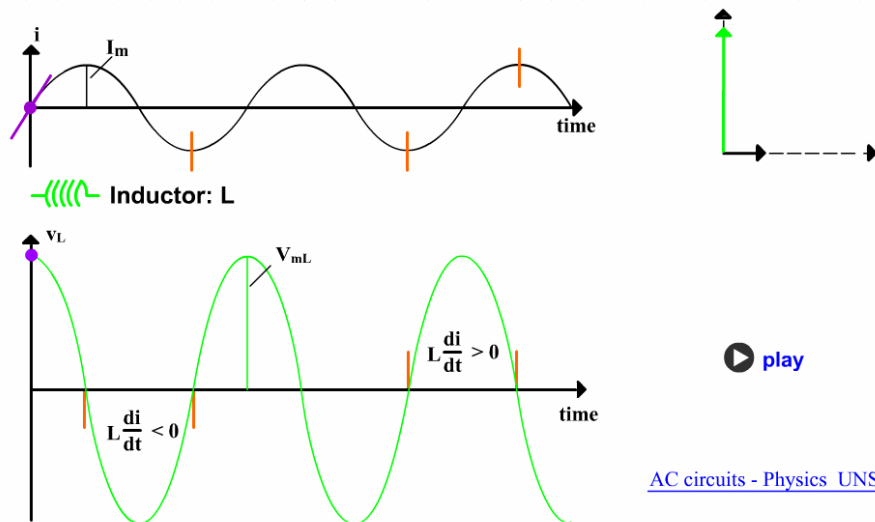
$$\Phi = NB \cdot S = NBS \cos 0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} i$$

- 3.- Se denomina coeficiente de autoinducción L al cociente entre el flujo propio Φ y la intensidad i .

$$L = \frac{\Phi}{i} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

Bobina conectada a una fuente AC

41



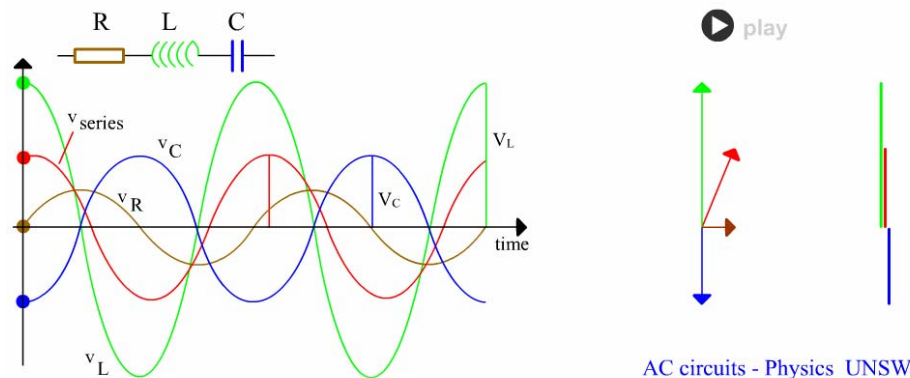
$fem_{bobina} = L \times (\text{pendiente de la gráfica de la corriente})$
 La corriente se hace máxima $\frac{1}{4}$ de ciclo después que la tensión.
<http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/AC.html#inductors>

AC circuits - Physics UNSW

Circuito RLC conectado fuente AC

42

OPCIONAL



AC circuits - Physics UNSW

La corriente por los tres elementos es la misma (proporcional a la ddp en la resistencia).

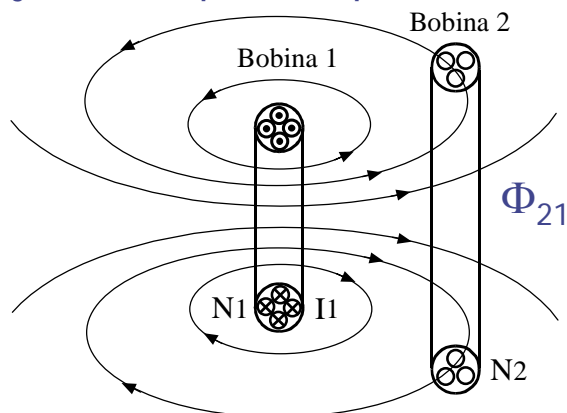
La utilización de fasores (vectores girando que se proyectan) permite resolver estos circuitos.

<http://www.phys.unsw.edu.au/~jw/AC.html#inductors>

Flujo entre dos bobinas próximas

43

◆ Cuando tenemos dos bobinas acopladas, parte del flujo creado por una pasa a la otra.



Φ_{21} = Flujo magnético que crea la bobina 1 y que atraviesa la 2

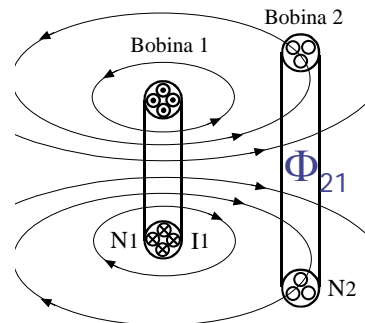
4.2 Inducción mutua

44

◆ El flujo que atraviesa la bobina 2 Φ_2 es debido a la corriente que circula por la propia bobina, Φ_{22} , y la debida a la bobina 1, Φ_{21} .

$$\Phi_2 = \Phi_{a \text{ través de 2 creado por } I_2} + \Phi_{a \text{ través de 2 creado por } I_1}$$

◆ La inductancia mutua es la relación del flujo en la bobina 2 creado por la bobina 1 y la intensidad que recorre la bobina 1.



$$M_{21} = \frac{\text{flujo total en la bobina 2 creado por la bobina 1}}{\text{intensidad por la bobina 1}} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}$$

Significado de los subíndices del flujo

- Φ_{11} = flujo a través de la bobina 1 producido por ella misma
- Φ_{22} = flujo a través de la bobina 2 producido por ella misma
- Φ_{12} = flujo a través de la bobina 1 producido por la bobina 2
- Φ_{21} = flujo a través de la bobina 2 producido por la bobina 1
- Φ_1 = flujo total a través de la bobina 1 = $\Phi_{11} + \Phi_{12}$
- Φ_2 = flujo total a través de la bobina 2 = $\Phi_{21} + \Phi_{22}$

Observación: En un circuito existe una corriente que produce un campo magnético ligado al propio circuito y que varía cuando lo hace la intensidad. Por tanto, cualquier circuito en el que exista una corriente variable producirá una fem inducida que denominaremos fuerza electromotriz autoinducida.

Si la fem es debida a otros circuitos cercanos, se le denomina fuerza electromotriz debida a la inducción mutua y, si no es deseada, causa interferencias y acoplamientos entre circuitos.

A. Pardina. Apuntes de tecnología eléctrica, 2º Diseño EUITI

Valor de la f.e.m. Inducida en el circuito 2⁴⁶ debido a la corriente del circuito 1

- ◆ Si la corriente I_1 varía con el tiempo, el flujo por la bobina 2 será variable en el tiempo y se inducirá una f.e.m. ε_2 en la misma

$$\text{como } N_2 \Phi_{21} = M_{21} I_1 \quad \text{y} \quad \varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} \quad : \quad \boxed{M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}}$$

$$\varepsilon_2 = -\frac{d}{dt} [N_2 \Phi_{21}] = -\frac{d}{dt} [M_{21} I_1] = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad \boxed{\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}}$$

- ◆ Análogamente, Φ_{12} es el flujo en la bobina 1 creado por la corriente I_2 que circula por la bobina 2. Por tanto, la inductancia mutua del circuito 1 respecto al 2 sería

$$M_{12} = \frac{\text{flujo total en la bobina 1 creado por la bobina 2}}{\text{intensidad por la bobina 2}} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2}$$

- ◆ Se cumple que el coeficiente de autoinducción es el mismo en los dos casos: $M_{21} = M_{12} = M =$ coeficiente de autoinducción

Acoplo magnético entre dos bobinas

- ◆ Se cumple que el coeficiente de autoinducción es el mismo en los dos casos:

$$M_{21} = M_{12} = M = \text{coeficiente de autoinducción}$$

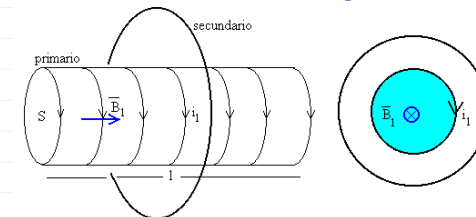
- ◆ Cuando dos circuitos están acoplados magnéticamente, y por uno de ellos circula una corriente variable en el tiempo, podemos calcular la f.e.m. Inducida en el otro

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{d\Phi_{11}}{dt} - \frac{d\Phi_{12}}{dt} = \underbrace{-L_1 \frac{dI_1}{dt}}_{\text{f.e.m. debido al flujo creado por la propia bobina 1}} \quad \underbrace{-M \frac{dI_2}{dt}}_{\text{f.e.m. debido al flujo creado por la otra bobina}}$$

$$\varepsilon_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} - M \frac{dI_1}{dt}$$

Ejemplo: inducción mutua M entre un solenoide y una espira⁴⁸

Tenemos dos circuitos acoplados formados por una espira y un solenoide, tal como se muestra en la figura.



El solenoide está formado N espiras, de longitud l y de sección S recorrido por una corriente de intensidad i_1 . Por ejemplo, denominaremos circuito primario al solenoide y secundario a la espira.

- 1.- El campo magnético creado por el solenoide (primario) suponemos que es uniforme y paralelo a su eje, y cuyo valor hemos obtenido aplicando la ley de Ampère

$$B_1 = \frac{\mu_0 N I_1}{l}$$

Ejemplo: inducción mutua M entre un solenoide y una espira

- 2.- Este campo atraviesa la sección de la espira (secundario), el flujo de dicho campo a través de la espira vale.

$$\Phi_2 = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{S} = \frac{\mu_0 N S}{l} i_1$$

S es la sección del solenoide, no de la espira, ya que hemos supuesto que fuera del solenoide no hay campo magnético (tal como ocurre en un solenoide infinito).

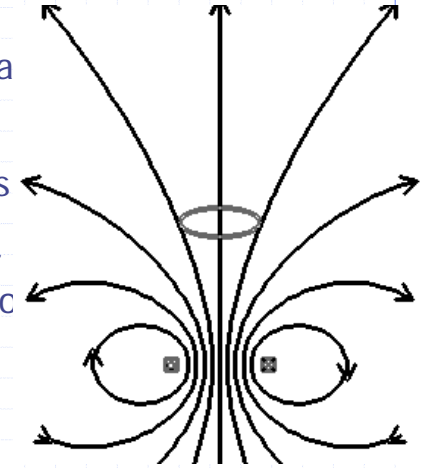
- 3.- Se denomina coeficiente de inducción mutua M al cociente entre el flujo a través del secundario Φ_{21} y la intensidad en el primario i_1 .

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{i_1} = \frac{\Phi_{21}}{i_1} = \mu_0 \frac{N S}{l}$$

Nota: $N_2 = n^\circ$ de espiras del secundario = n° de espiras de una bobina de 1 espira = 1

Ejemplo 2: Bobina y espira alineadas en el mismo eje

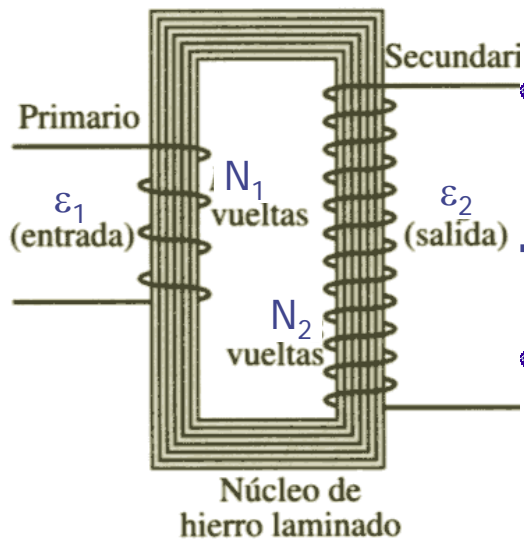
- ◆ Consideremos dos circuitos acoplados formados por una bobina y una espira que tienen el mismo eje y están situadas en planos paralelos separados una distancia z . La bobina está formada por N espiras apretadas de radio a , y la espira tiene un radio b .



SOLUCIÓN:

Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/acoplados1/acoplados1.htm>

5. El transformador



- ◆ Una bobina crea un flujo variable en la segunda bobina.

→ son dos bobinas acopladas

- ◆ En el caso ideal:

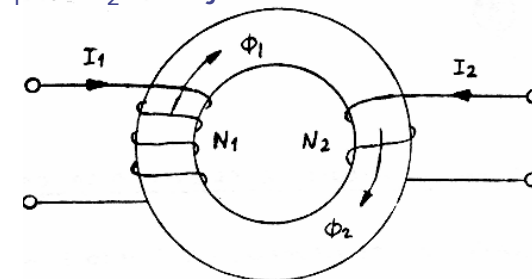
$$N_1/N_2 = \varepsilon_1/\varepsilon_2$$

Coeficiente de acoplo entre dos bobinas

Caso en que todo el flujo creado por una bobina atraviesa la otra (TRANSFORMADOR IDEAL)

- ◆ En un circuito magnético, el flujo magnético es conducido a través del material magnético y, dado que las líneas de B deben ser cerradas, el flujo a través del núcleo es constante.

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \text{flujo a través del núcleo}$$



Caso en que todo el flujo creado por una bobina atraviesa la otra

Φ_{11} = flujo a través de la bobina 1 producido por ella misma

Φ_{22} = flujo a través de la bobina 2 producido por ella misma

Φ_{12} = flujo a través de la bobina 1 producido por la bobina 2

Φ_{21} = flujo a través de la bobina 2 producido por la bobina 1

Φ_1 = flujo total a través de la bobina 1 = $\Phi_{11} + \Phi_{12}$

Φ_2 = flujo total a través de la bobina 2 = $\Phi_{21} + \Phi_{22}$

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_{11}}{I_1}$$

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}$$

$$L_2 = \frac{N_2 \Phi_{22}}{I_2}$$

$$M_{12} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2}$$

No hay dispersión => una corriente crea el mismo flujo en las dos bobinas

$$\Phi_{11} = \Phi_{12}$$

$$\Phi_{22} = \Phi_{21}$$

Caso en que todo el flujo creado por una bobina atraviesa la otra

Utilizando la igualdad $\Phi_{11} = \Phi_{12} = \Phi_1$ y $\Phi_{22} = \Phi_{21} = \Phi_2$

$$M = M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} = \frac{N_2 \Phi_{11}}{I_1}$$

$$M = M_{12} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2} = \frac{N_1 \Phi_{22}}{I_2}$$

Multiplicando miembro a miembro ambas expresiones tendremos:

$$M^2 = \frac{N_2 \Phi_{11}}{I_1} \frac{N_1 \Phi_{22}}{I_2} = \frac{N_1 \Phi_{11}}{I_1} \frac{N_2 \Phi_{22}}{I_2} = L_1 L_2$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

Cuando hay acoplamiento magnético total,
M = media geométrica de sus autoinductancias

Acoplamiento magnético parcial (no todo el flujo creado en una bobina atraviesa la otra: transformador REAL)

En la práctica, no todo el flujo que crea una bobina llega a la otra

Φ_{11} = Flujo que crea 1 en la propia bobina 1

Φ_{12} = parte del flujo creado por 1 que llega a la bobina 2

$$\Phi_{11} < \Phi_{12}$$

Φ_{22} = Flujo que crea 2 en la propia bobina 2

Φ_{12} = parte del flujo creado por 2 que llega a la bobina 1

$$\Phi_{12} < \Phi_{22}$$

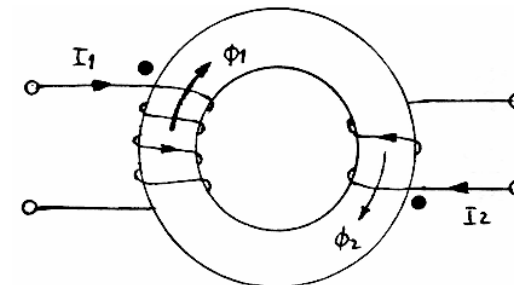
$$\Rightarrow M < \sqrt{L_1 L_2}$$

Esto se puede expresar utilizando el coeficiente k de acoplamiento magnético

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}; \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (k = \text{coef. acoplamiento magnético})$$

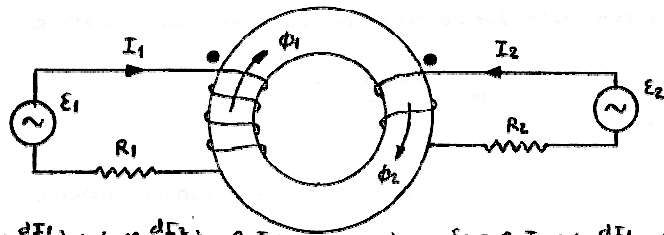
Terminales correspondientes

- ◆ Son aquellos en los que si entra la corriente por ambos, sus flujos se suman. Se marcan con un punto.



Análisis circuital de sistemas con acoplamiento magn.

Las f.e.m. se suman si el sentido elegido para la corriente entra o sale por el punto en el primario y secundario. Por ejemplo:

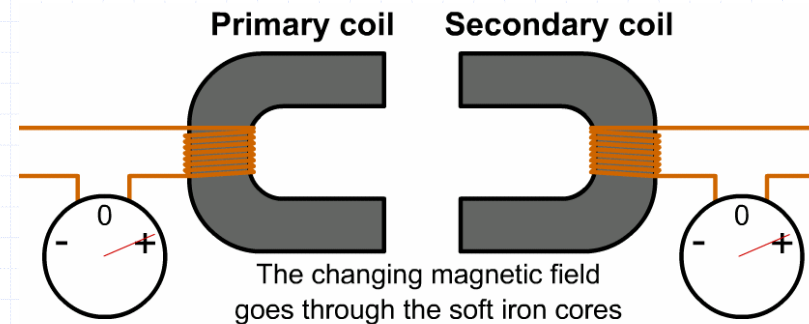


$$\begin{aligned} \epsilon_1 + (-L_1 \frac{dI_1}{dt}) + (-M \frac{dI_2}{dt}) &= R_1 I_1 & \Rightarrow & \epsilon_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \\ \epsilon_2 + (-L_2 \frac{dI_2}{dt}) + (-M \frac{dI_1}{dt}) &= R_2 I_2 & \Rightarrow & \epsilon_2 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} \end{aligned}$$

Si una de las corrientes entra por el punto y la otra sale, entonces los flujos se oponen y el término en M será negativo:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} - M \frac{dI_2}{dt} \\ \epsilon_2 &= R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} - M \frac{dI_1}{dt} \end{aligned}$$

Animación de un circuito acoplado

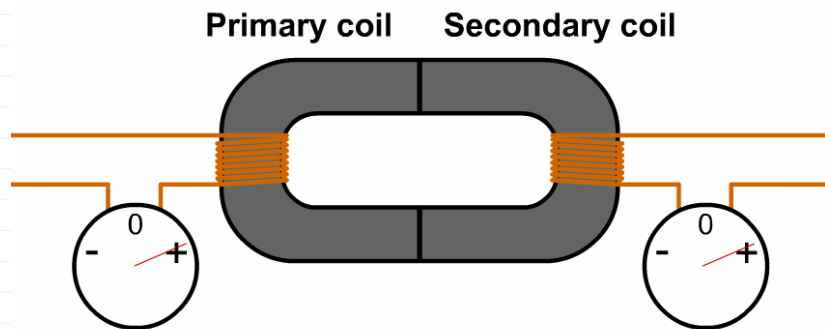


A changing current through the primary coil produces a changing magnetic field.

The changing magnetic field induces a current in the secondary coil.

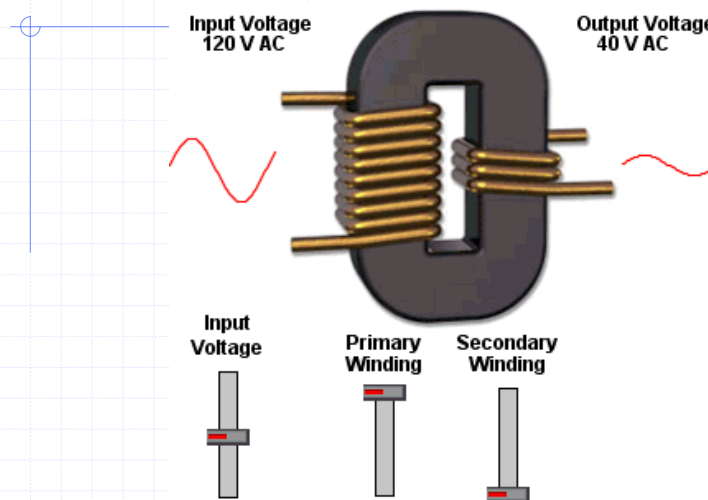
<http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitsize/physics/electricity/electromagneticinductionrev4.shtml>

Animación de un transformador



<http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitsize/physics/electricity/electromagneticinductionrev4.shtml>

Influencia del nº de vueltas



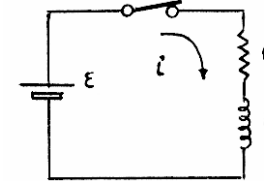
<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transformer/index.html>



6.- Energía almacenada en un campo magnético

62

◆ En una bobina almacena energía a través del campo magnético que crea una corriente.



$$\mathcal{E} \text{ f.e.m.} = Ri$$

$$\mathcal{E} + (-L \frac{di}{dt}) = Ri$$

$$\mathcal{E} = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$\mathcal{E}i = Ri^2 + L \frac{di}{dt} i$$

$$\mathcal{E}i dt = Ri^2 dt + Li \frac{di}{dt} dt = Ri^2 dt + Li di$$

$\mathcal{E}i dt$ = ENERGÍA TOTAL SUMINISTRADA POR EL GENERADOR EN UN dt

$Ri^2 dt$ = ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL GENERADOR QUE SE HA DISIPADO EN FORMA DE CALOR POR EFECTO JOULE EN LA RESISTENCIA EN UN dt .

$Li di$ = ENERGÍA SUMINISTRADA POR EL GENERADOR QUE SE HA UTILIZADO PARA ESTABLECER EL CAMPO MAGNÉTICO EN LA BOBINA EN UN dt . ESTA ENERGÍA QUEDA ALMACENADA EN DICHO CAMPO COMO ENERGÍA POTENCIAL.

Energía total almacenada en una bobina

63

Energía necesaria para aumentar la corriente un di

$$i' = i + di \Rightarrow dW_m = Li di$$

La energía total necesaria para aumentar la corriente que circula por una bobina desde 0 hasta i es:

$$W_m = \int_0^i Li di = L \int_0^i i di = L \left[\frac{i^2}{2} \right]_0^i = \frac{1}{2} LI^2$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

Esa energía se puede considerar asociada a al campo magnético que crea la corriente que circula por la bobina.

6.1- Densidad de energía por unidad de volumen

64

Para el caso particular de un solenoide:

$$H = nI; \quad B = \mu nI; \quad L = \mu n^2 S \ell$$

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu n^2 S \ell I^2$$

S = sección del solenoide
 ℓ = longitud del solenoide
 n = densidad de espiras = N/ℓ
 τ = volumen del solenoide = $S \ell$

$$W_m = \frac{1}{2} (nI)(\mu nI)(S \ell) = \frac{1}{2} HB \tau$$

Esta expresión es válida en general.

La densidad de energía magnética se define como la energía magnética por unidad de volumen.

$$w_m = \frac{W_m}{\tau} = \frac{1}{2} HB$$

7- Corrientes parásitas en conductores (corrientes de Foucault)

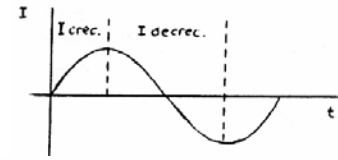
65

- ◆ En un conductor que experimenta un B variable se crean unas corrientes inducidas que tienden a mantener B constante.
- ◆ Muchas veces, esas corrientes son indeseables y producen calentamiento en el conductor, disminuyendo el rendimiento de la máquina (por ello se denominan parásitas).
- ◆ Chapa de conductor: lo podemos considerar como superposición de espiras. En cada espira se produce una f.e.m. que origina la corriente.

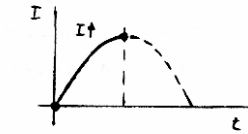
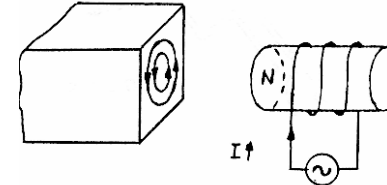
Corrientes parásitas en un campo oscilante

66

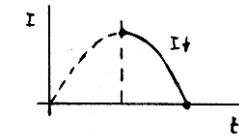
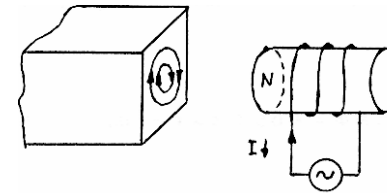
Este es el principio de funcionamiento de las cocinas de inducción.



- ◆ Crecimiento de la corriente



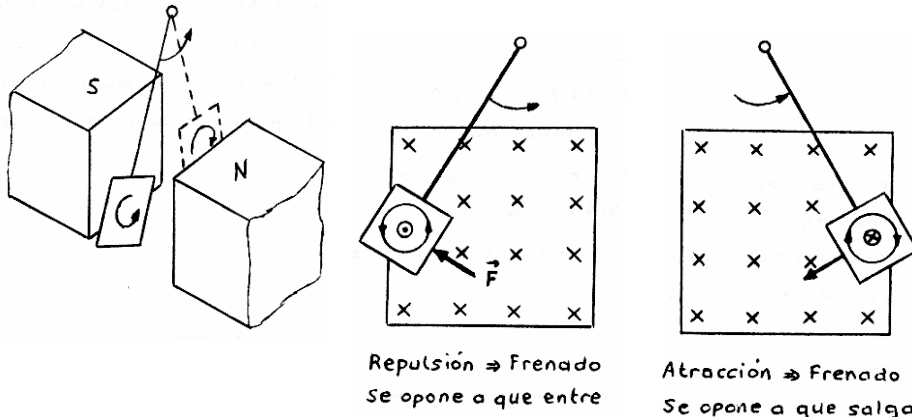
- ◆ Decrecimiento de la corriente



Corrientes parásitas en conductores en movimiento

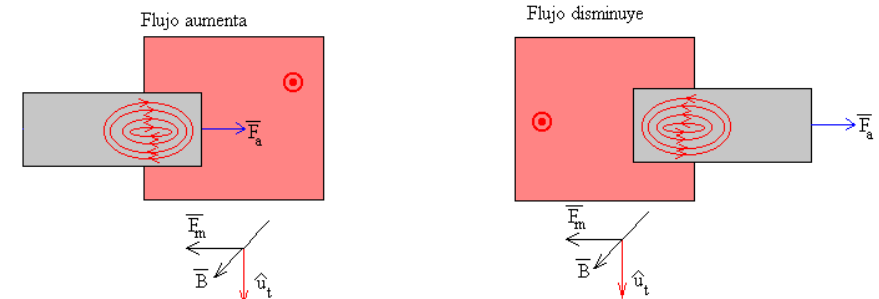
67

- ◆ Fuerza de frenado sobre un péndulo



Explicación: pletina... entrando saliendo

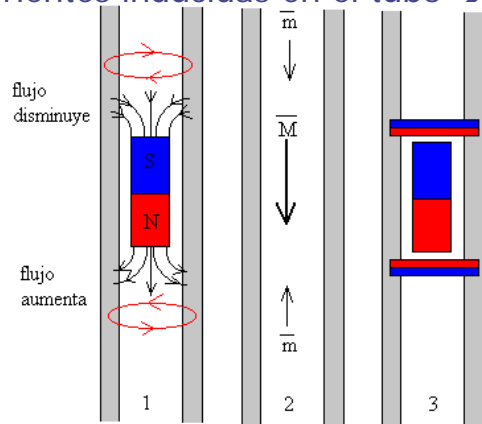
68



- ➔ Fuerza de frenado sobre un péndulo (siempre opuesta al movimiento del péndulo)

Experimento: imán cayendo por el interior de un tubo conductor

Corrientes inducidas en el tubo →



Se inducen "imanes" que atraen a la parte superior y que repelen la parte inferior → se oponen a que el imán baje

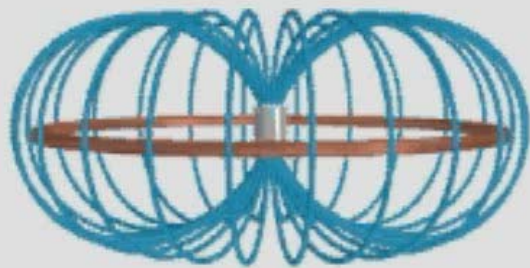
Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/foucault1/foucault1.htm>



Imán cayendo a través de un aro superconductor

<http://web.mit.edu/jbelcher/www/anim.html>



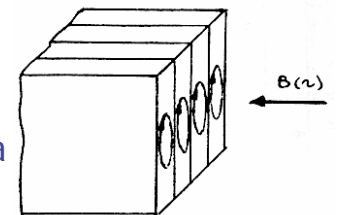
Imán suspendido de un aro superconductor

(Requeriría un imán con una relación peso/potencia mayor que en el caso anterior).

<http://web.mit.edu/jbelcher/www/anim.html>

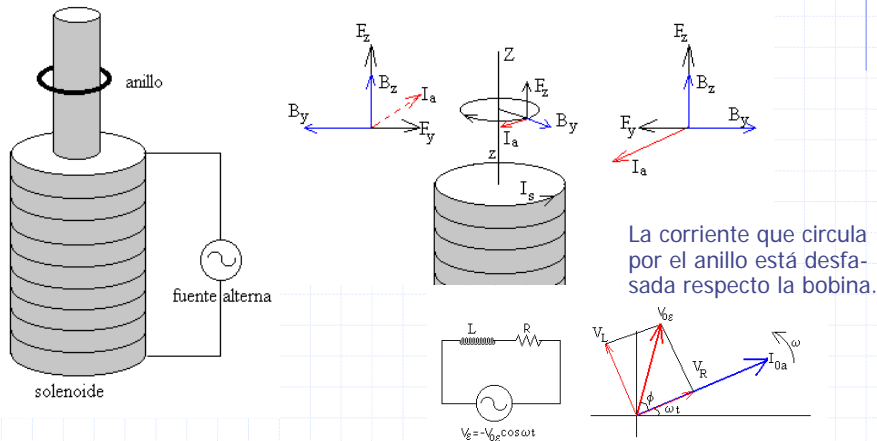
Corrientes parásitas en conductores

- ◆ Hay una circulación de corrientes en torbellino en todo el volumen del conductor, encontrándose las trayectorias en planos perpendiculares al campo.
- ◆ En las máquinas que funcionan con corrientes alternas (en ellas B es variable), se utilizan núcleos formados por láminas delgadas y aisladas eléctricamente entre sí.
- ◆ De este modo se reduce la f.e.m., las corrientes y calentamientos.
- ◆ Las chapas se disponen alineadas con el campo (disminuyendo la superficie equivalente de la "espira de corriente").



Experimento: anillo de Thomson

→ El anillo levita debido a la componente radial B_y



Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/anillo/anillo.htm>

Anillo levitando sobre el solenoide de núcleo ferromagnético



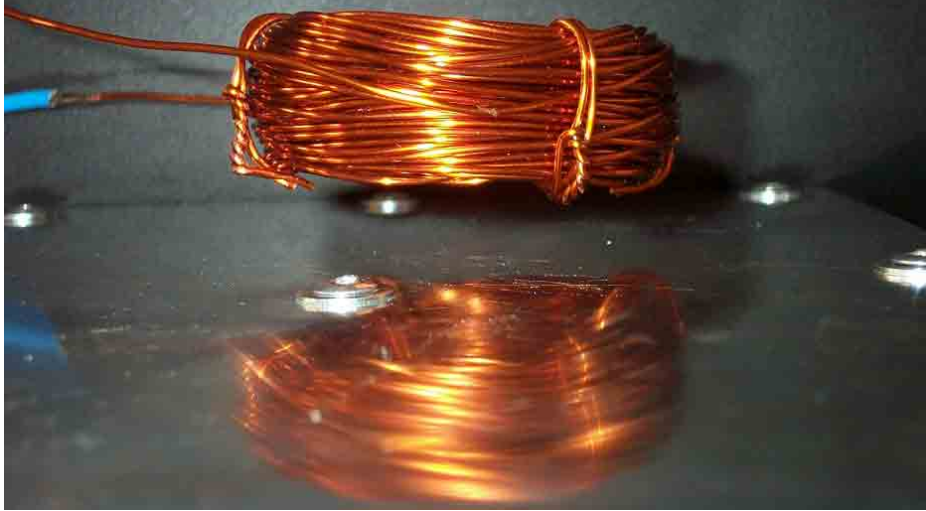
Distintas configuraciones del solenoide...



Sistema de regulación para controlar la altura (proyecto fin de carrera)



Bobina levitando sobre una plancha conductora no ferromagnética.



Vídeo corrientes parásitas

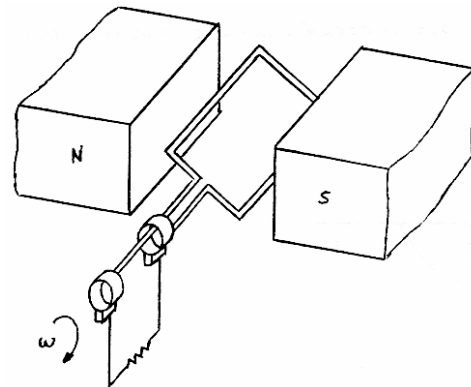


Extracto tomado de "El universo mecánico y más allá".

8. Generadores eléctricos

79

◆ El generador elemental está constituido por una espira de N vueltas que gira dentro de un campo magnético uniforme.



Aunque el campo magnético es constante, el flujo abrazado por las espiras varía con θ :

$$\Phi = B S \cos \theta$$

O equivalentemente, al estar los conductores en movimiento, se inducen en ellos una f.e.m.

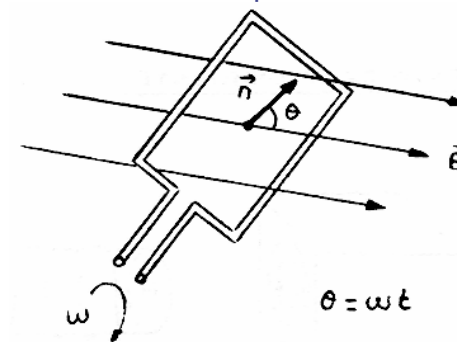
Cálculo del flujo

80

ω = velocidad angular de giro

N = número de vueltas (en la práctica, en vez de una espira se utiliza una bobina de N espiras).

S = área de la espira



Aunque el campo magnético es constante, el flujo abrazado por las espiras varía con θ :

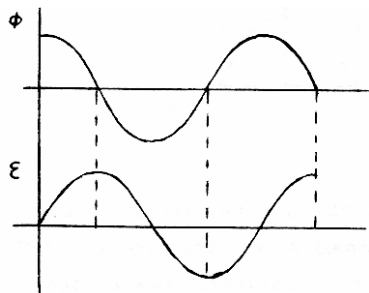
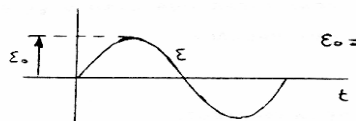
$$\Phi = B S \cos \theta$$

$$\Phi = B S \cos \omega t$$

Cálculo de la fem

POR LA LEY DE FARADAY: $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} = NBS\omega \text{ Sen } \omega t$

$$\mathcal{E} = NBS\omega \text{ Sen } \omega t$$

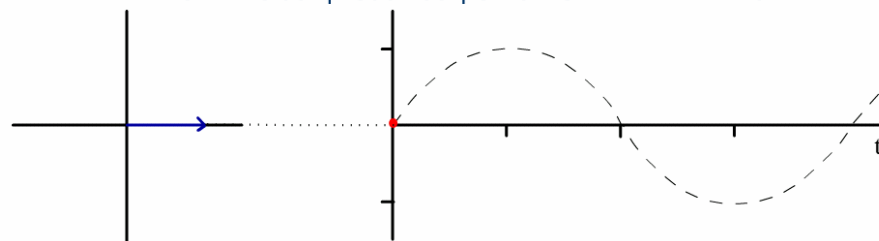


$$\Phi_t = N\Phi = NBS \cos \omega t = \Phi_0 \cos \omega t$$

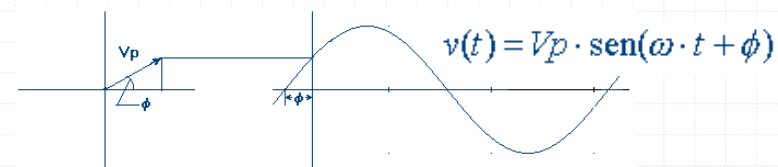
$$\mathcal{E} = NBS\omega \text{ Sen } \omega t = \mathcal{E}_0 \text{ Sen } \omega t$$

Fem de un generador AC

Señal senoidal producida por la Corriente Alterna

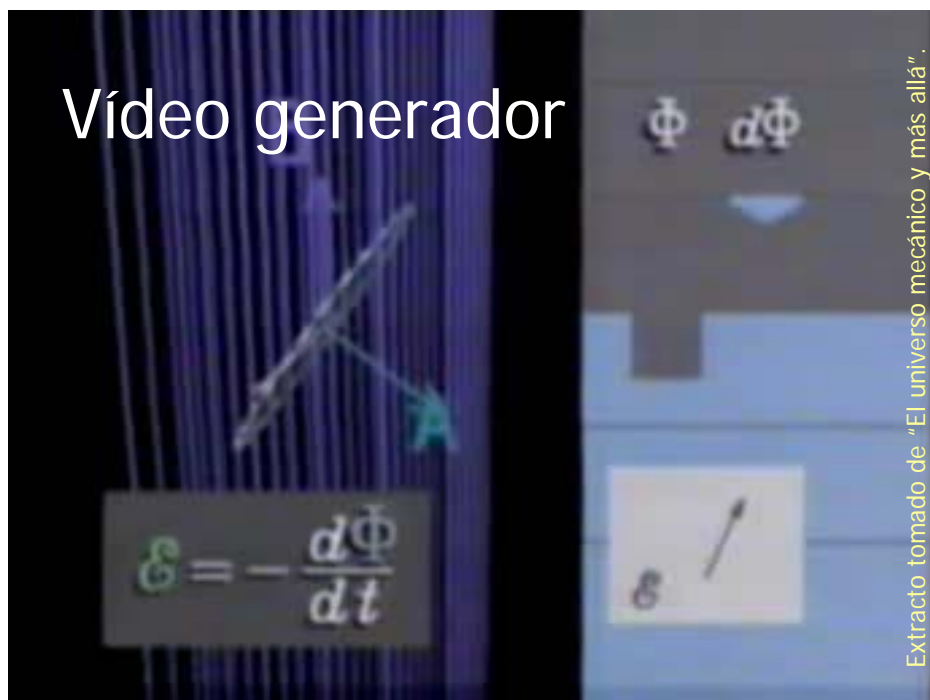


Si para $t = 0$, ωt tiene un valor ϕ diferente de cero, se le llama el ángulo de fase y la señal tiene una ecuación:



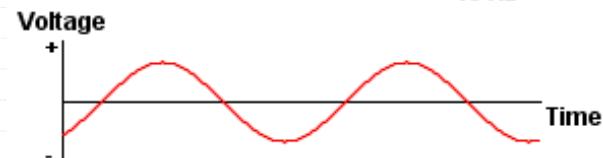
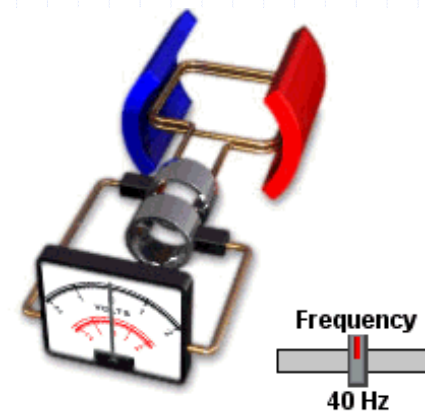
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/2001771/cap01/01_01_01.html

Vídeo generador



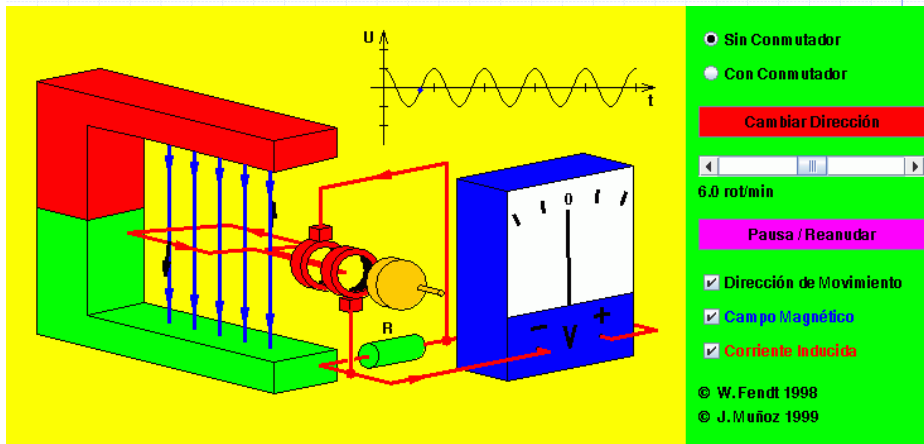
Extracto tomado de "El universo mecánico y más allá".

Generador AC



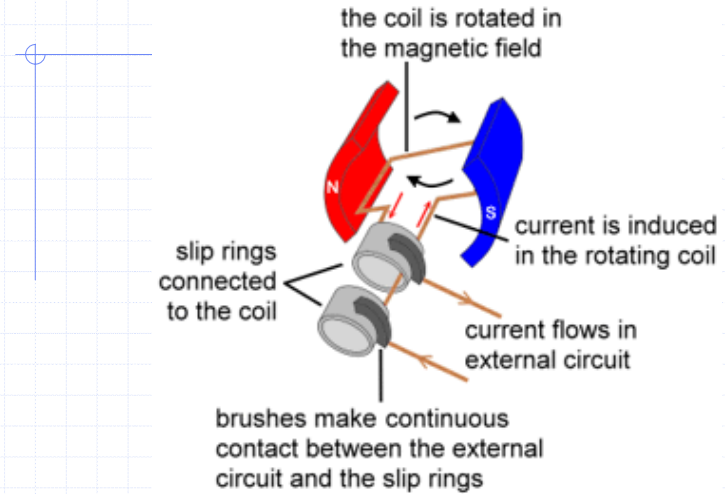
<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/ac.html>

Animación generador AC/DC



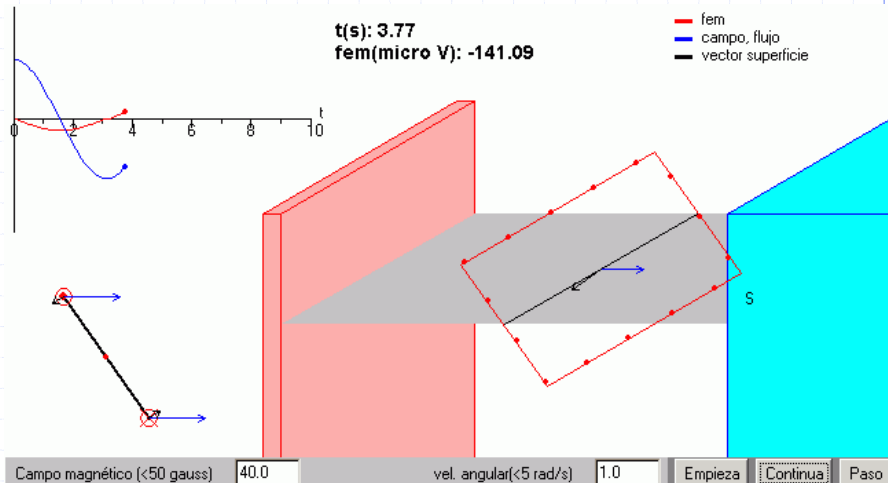
Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/generador/generador.htm>

Detalle de los anillos rozantes



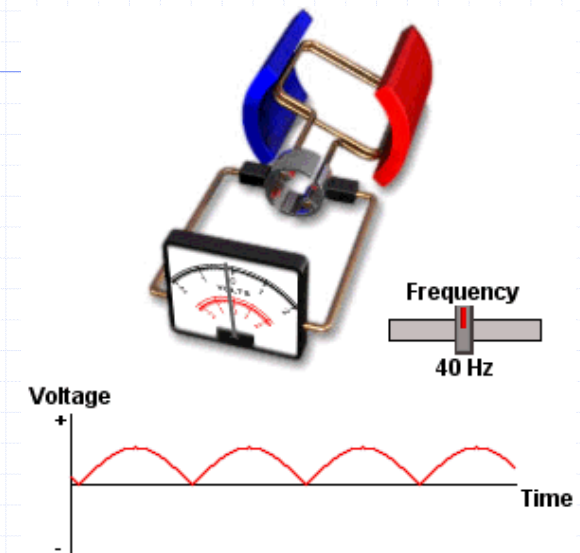
Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/generador/generador.htm>

Animación de un generador



Curso Interactivo de Física de la Univ. de Eibar: © Ángel Franco
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/induccin/generador/generador.htm>

Generador DC

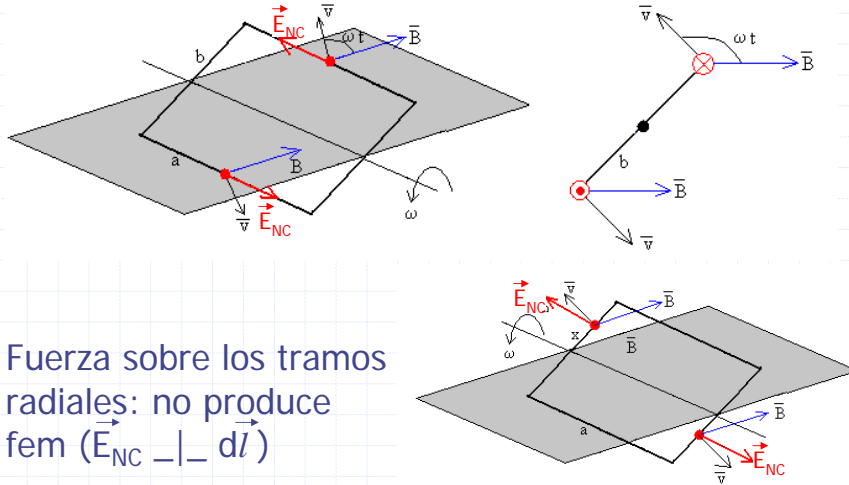


<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/generator/dc.html>

\vec{E}_{NC} en la espira

89

E_{NC} sobre los tramos paralelos al eje: va en sentido del cable ($\vec{E}_{NC} \parallel d\vec{l}$) \rightarrow produce f.e.m.



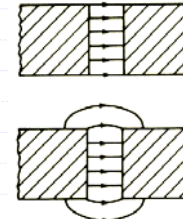
Fuerza sobre los tramos radiales: no produce fem ($\vec{E}_{NC} \perp d\vec{l}$)

Otras aplicaciones: (no entra) grabación magnética

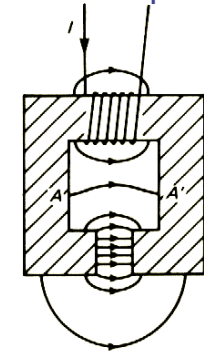
OPCIONAL

90

- ◆ Cuando interrumpimos el flujo que va por un material ferromagnético con una pequeña abertura de material no magnético, las líneas de B se dispersan.



- ◆ Una cinta con material fácilmente imanable se coloca cerca de la abertura de la cabeza de grabación \rightarrow la cinta queda imanada.



Carter, pags. 71 y 72

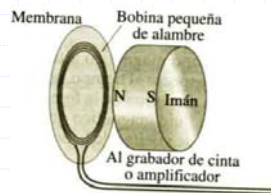
Recuperación de la información grabada (no entra)

91

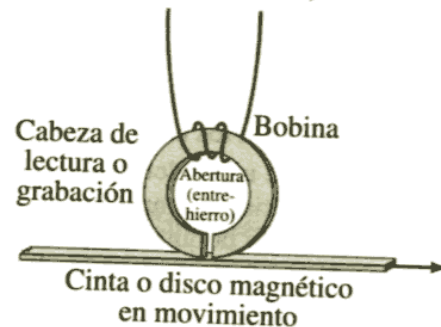
OPCIONAL

- ◆ Si la cinta imanada se mueve, creará un pequeño flujo variable en la cabeza de lectura.
- ◆ Al variar el flujo, se obtendrá una fem proporcional a (la variación de) la señal

Señal original (por ejemplo, de un micrófono magnético)



Señal eléctrica entrada (o salida)

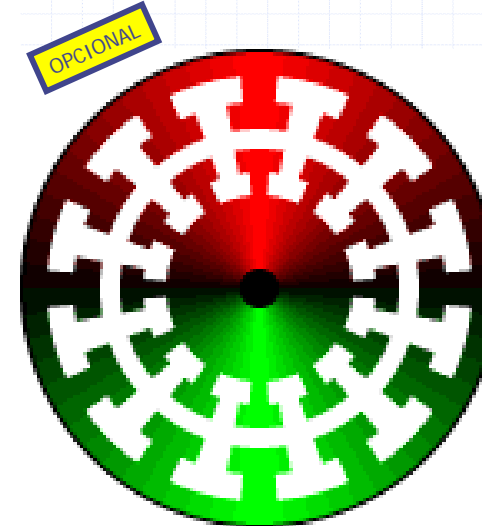


Giancolli, pags. 71 y 72. Giancolli p.

Motor de inducción (AC)

OPCIONAL

92



El estator se bobina de forma que al conectarlo a un sistema trifásico, genera un campo magnético rotativo.

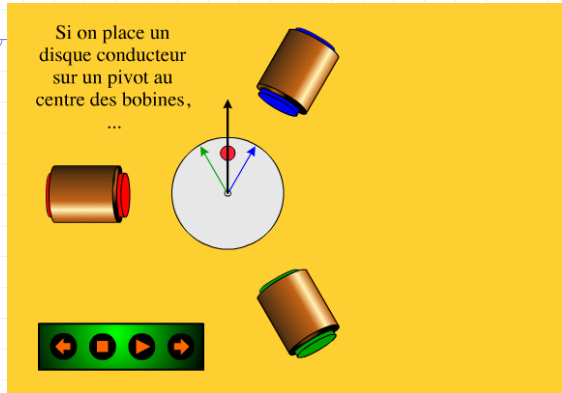
Se inducen corrientes por el rotor para mantener el flujo constante.

La fuerza sobre los conductores produce un par de giro cuando el rotor gira más lentamente que el campo magnético.

http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/train_ref_material/MOTORBLACTUT.html

Fundamento del motor de inducción o asíncrono

OPCIONAL



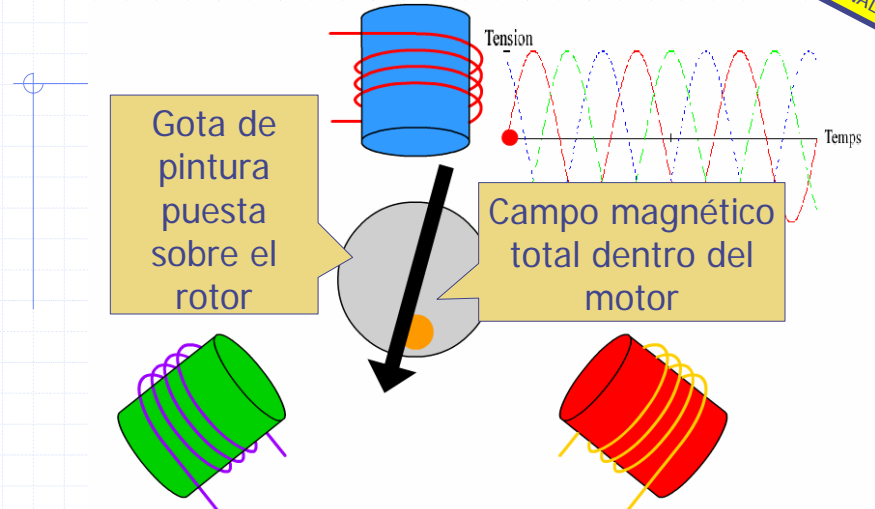
Las tres fases del estator y las inducidas en el rotor están representadas esquemáticamente. En el estator se generan corrientes inducidas de baja frecuencia

La velocidad de giro del rotor + la frecuencia de las corrientes inducidas en el rotor = velocidad de giro del campo magnético creado por el estator.

<http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1998/08/INDMOTOR.HTM>
http://www.physique-appliquee.net/phyapp/champ_tournant/champ_frames.htm

Motor de inducción (AC)

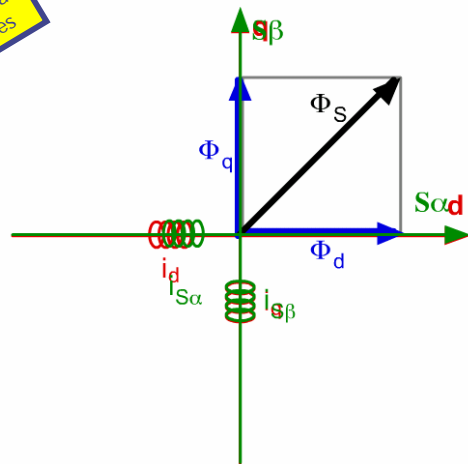
OPCIONAL



El campo magnético es producido por corrientes inducidas sobre un rotor hecho con material conductor. No utilizan imanes ni escobillas.
<http://membres.lycos.fr/kromm/visite.html>

Champ statorique tournant dans repères liés au stator

OPCIONAL, teoría generalizada de motores



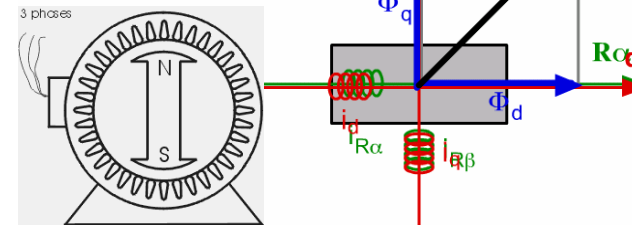
Campo generado por el estator



<http://perso.wanadoo.fr/madiana.solutec/autopilot/Autopilote-MAS.html>

Champ rotorique tournant dans repères liés au rotor

OPCIONAL, teoría generalizada de motores



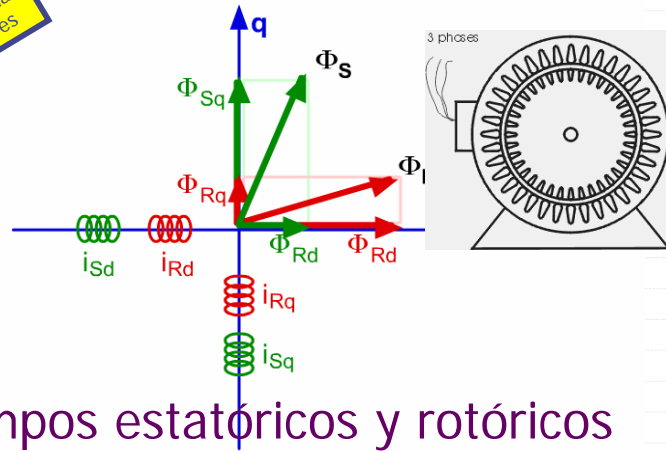
Campo rotórico (el rectángulo representa el rotor)



<http://perso.wanadoo.fr/madiana.solutec/autopilot/Autopilote-MAS.html>

Champs statorique et rotorique dans un père tournant (d,q) lié au flux du rotor

OPCIONAL,
teoría
generalizada
de motores



Campos estatoricos y rotóricos girando en una referencia dq ligada al flujo del rotor

© 2003 B. Pontalier



Extracto tomado de "El universo mecánico y más allá".