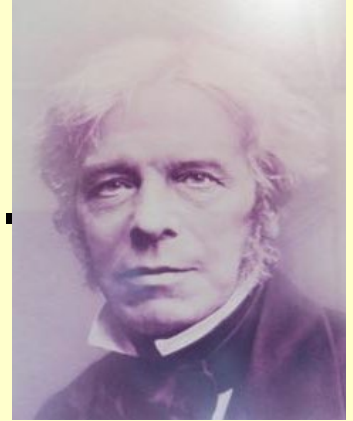


Lección 9: Inducción electromagnética

- Flujo magnético.
- Fenómenos de inducción electromagnética.
- Ley de Faraday y ley de Lenz.
- Ejemplos de las leyes de Faraday y Lenz.
- Autoinducción e inducción mutua.
- El transformador.
- Energía almacenada en una autoinducción.



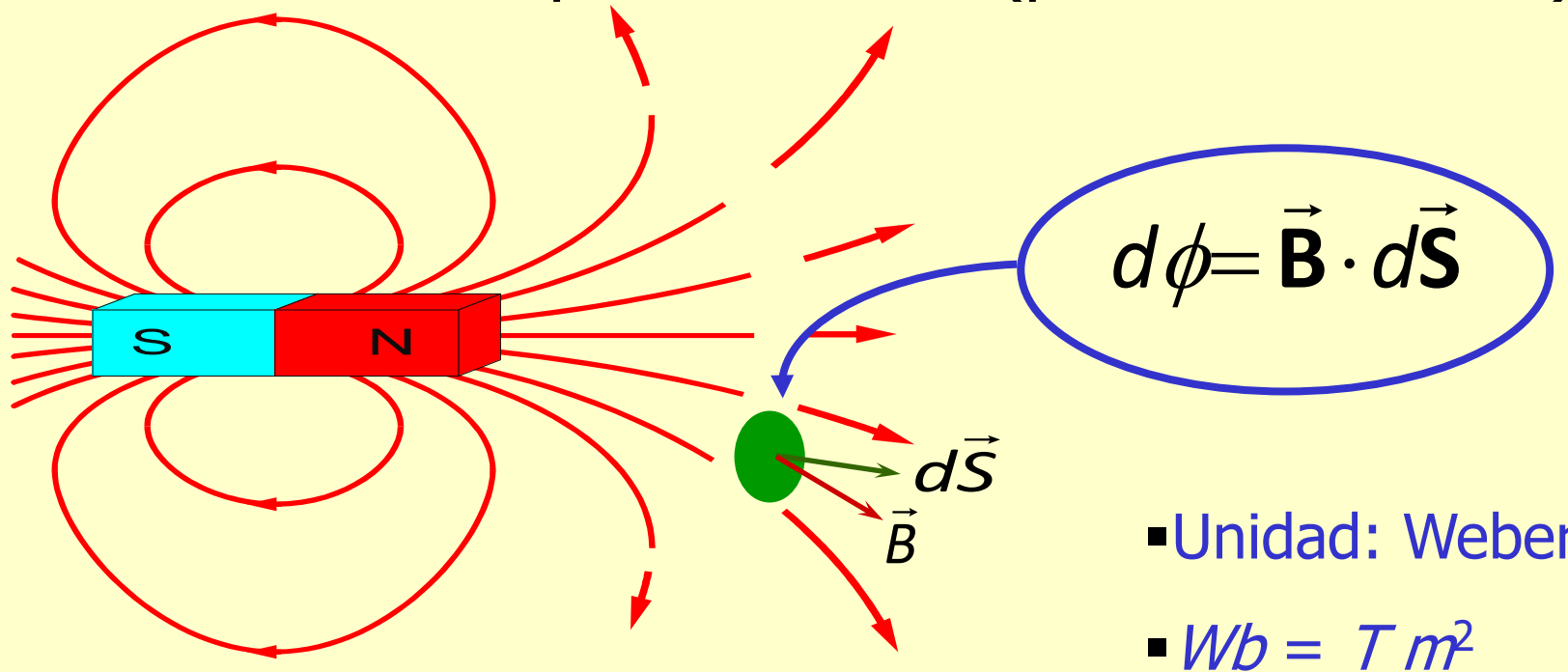
Michael Faraday
1791-1867

Hall de la Royal Society
Londres



Flujo magnético

- Dada la superficie $d\vec{S}$, se define el flujo magnético a través de esa superficie como (producto escalar):



- Si la superficie es finita (superficie S):
$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Ley de Faraday

- La **corriente inducida** en una espira se debe a fuerzas electromotrices que dependen de la **velocidad de cambio del flujo magnético** que atraviesa la espira:

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi}{dt}$$



Ley de Faraday
Ley experimental

- Si **R** es la **resistencia** de la espira, la corriente que recorre la espira es:

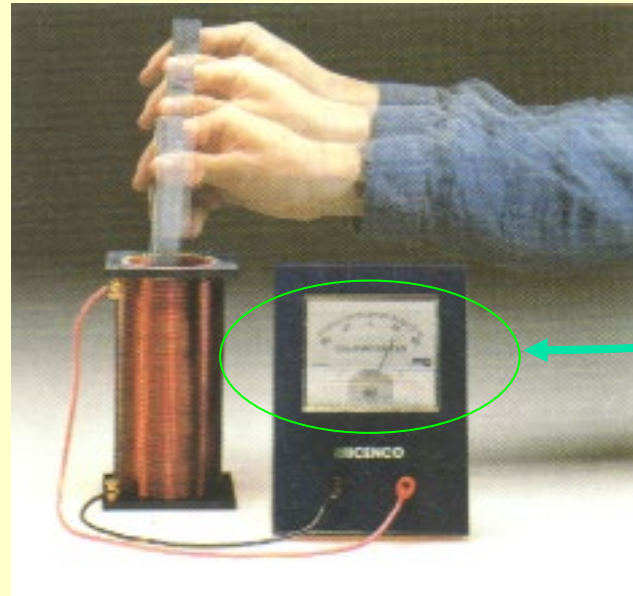
$$i = \frac{\varepsilon}{R}$$

La **derivada del flujo** respecto del tiempo nos da el **módulo** de la **fuerza electromotriz inducida**, pero no su polaridad. La polaridad de la **emf** nos la da la **ley de Lenz**.

Fenómenos de inducción electromagnética

- Los fenómenos de inducción electromagnética se conocen desde 1830, cuando Michael Faraday y Joseph Henry encontraron que un campo magnético variable produce corrientes en una bobina (o una espira).

Mover un imán en una bobina produce una corriente eléctrica en la bobina



Corriente $\neq 0$

Veremos que cambios en el campo magnético no es la única forma de inducir corrientes. Más importantes son los cambios en el flujo magnético.

¿Cómo se puede cambiar el flujo magnético?

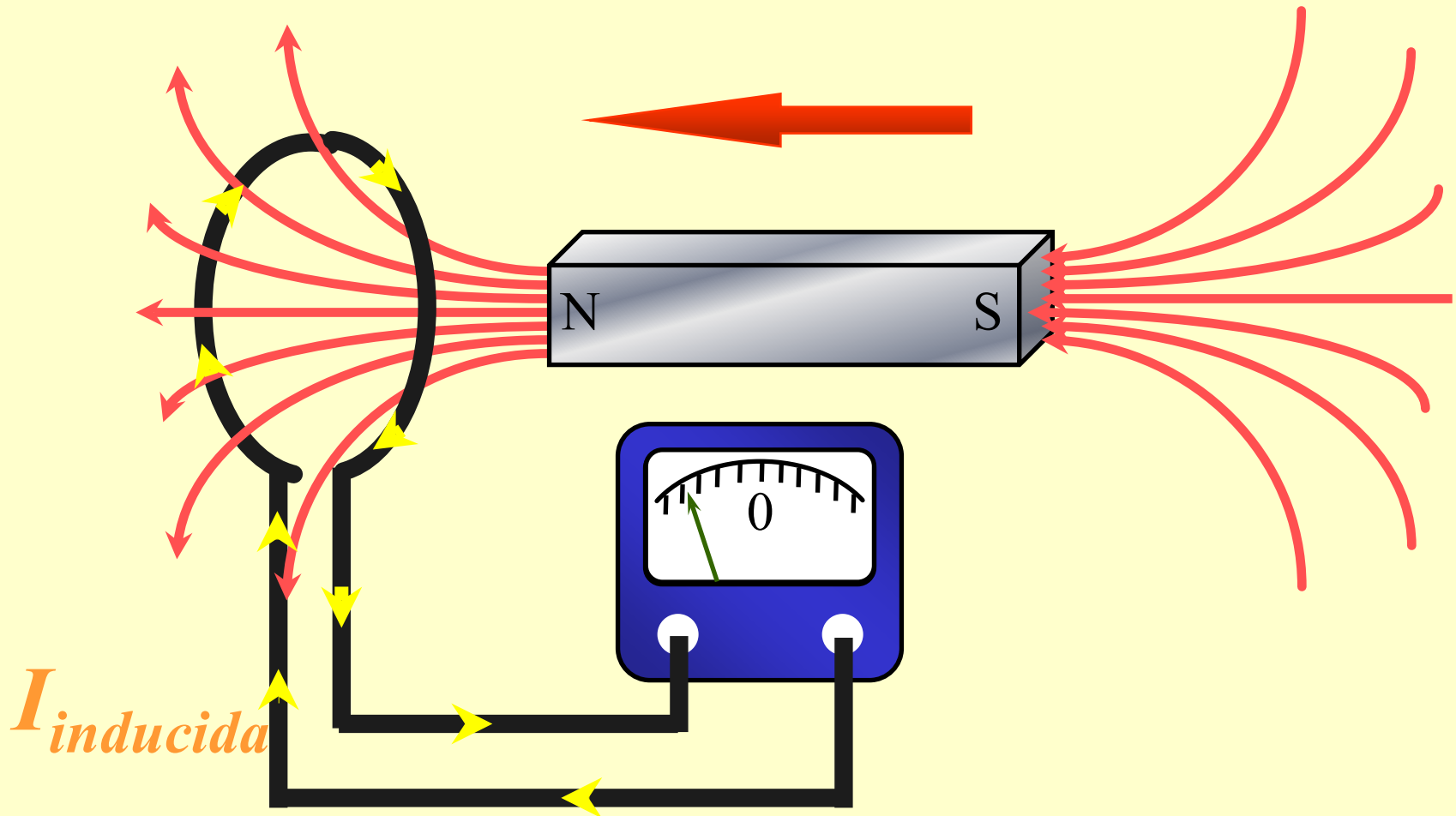
- El flujo magnético de una espira se calcula como:

$$\phi = \int_S \vec{\mathbf{B}} d\vec{\mathbf{S}} = \int_S |B| |dS| \cdot \cos \varphi$$

- **Cambios en el flujo** pueden deberse a:
 - a) Cambios en el campo magnético, B
 - b) Cambios en la superficie de la espira, S
 - c) Cambios en el ángulo entre B y S , φ

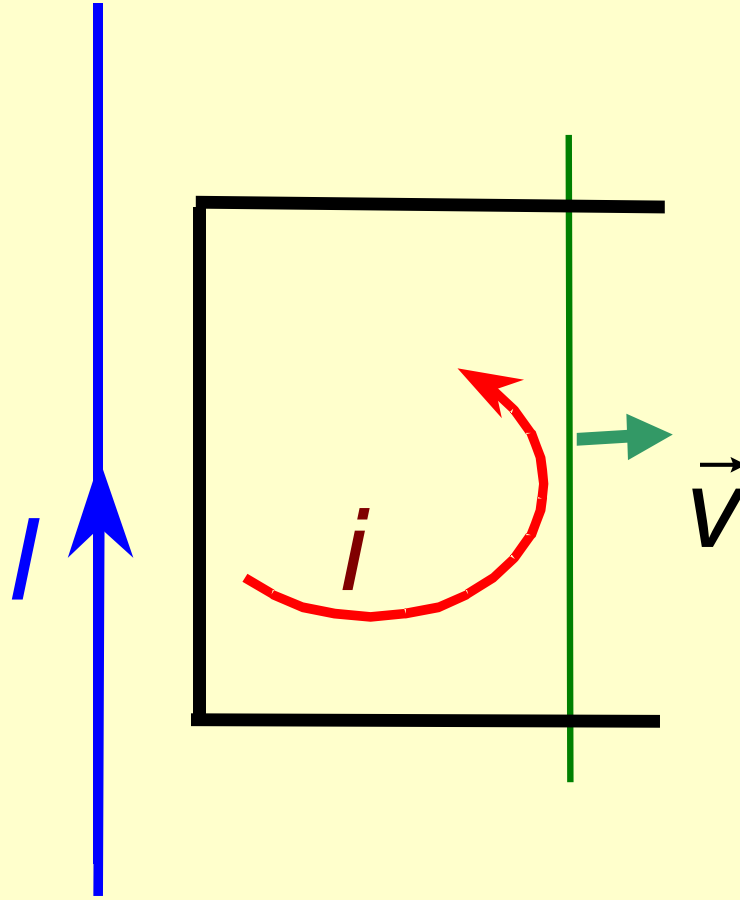
¿Cómo se puede cambiar el flujo magnético?

- a) Cambios en el campo magnético, B



¿Cómo se puede cambiar el flujo magnético?

- b) Cambios en la superficie de la espira, S

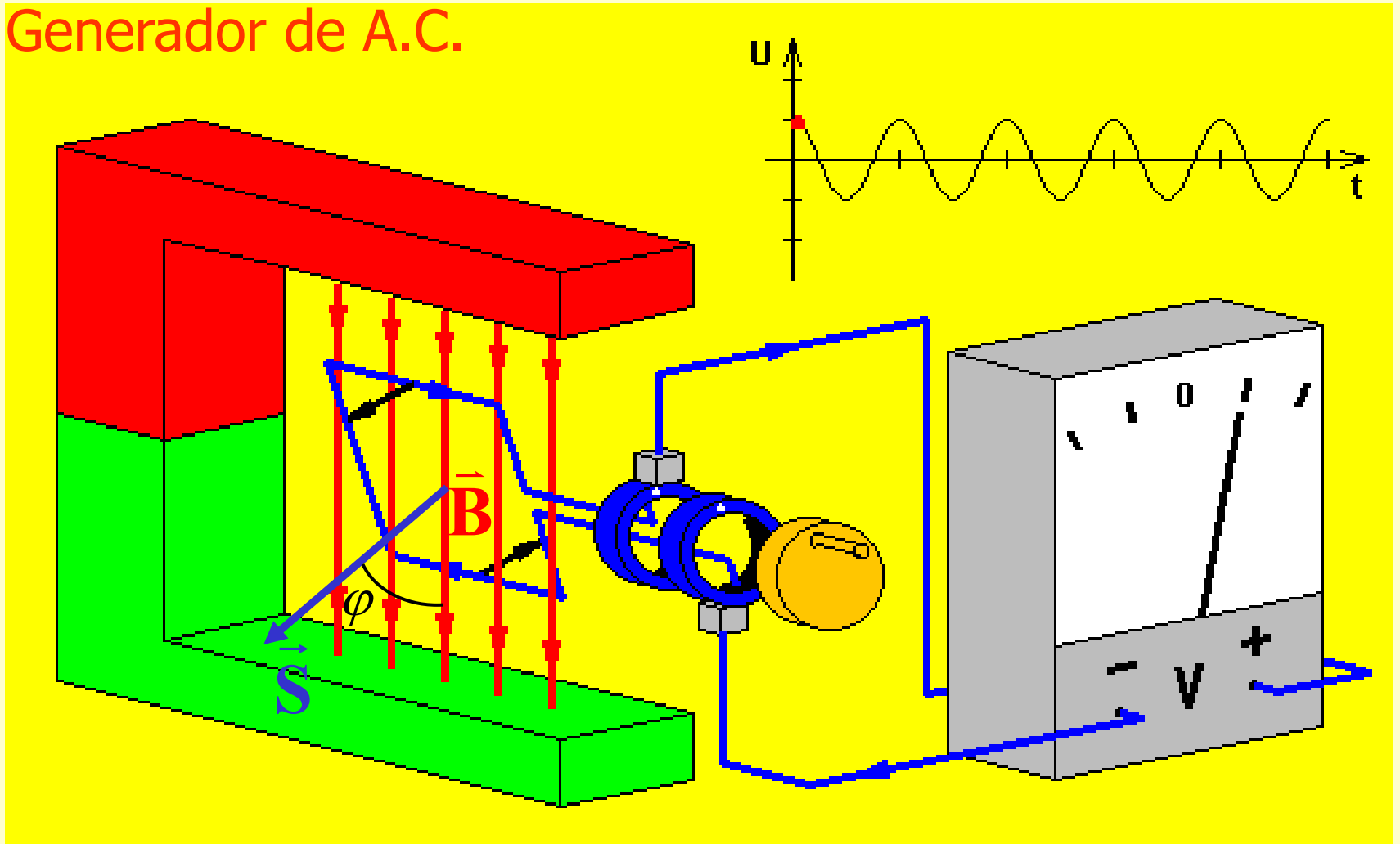


I produce un **flujo magnético** a través de la espira. Si un lado de la espira se mueve (**velocidad v**), el flujo magnético cambia y **i aparece**.

¿Cómo se puede cambiar el flujo magnético?

- c) Cambios en el ángulo entre \vec{B} y \vec{S} , φ

Generador de A.C.



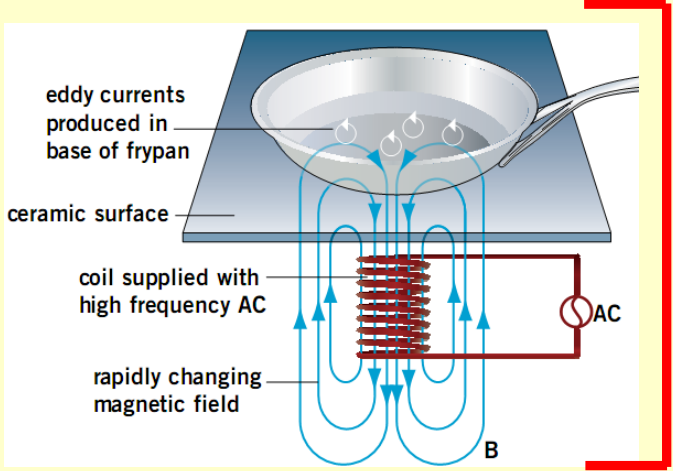
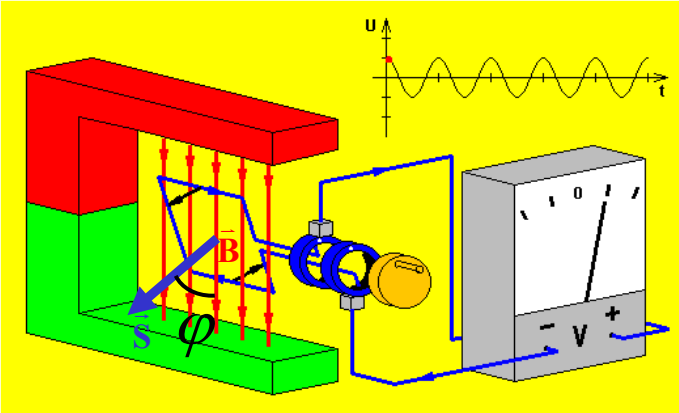
Ley de Lenz

- Las polaridades de la fem (ε) y de la intensidad de corriente inducidas son siempre opuestas a los cambios producidos en el flujo magnético a través de la espira.
- Es muy importante notar que la corriente inducida no se opone al flujo, sino a variaciones del flujo.
- La corriente inducida siempre intenta mantener el flujo existente.

Ejemplos. Aplicaciones de las corrientes inducidas

Generación de corriente alterna

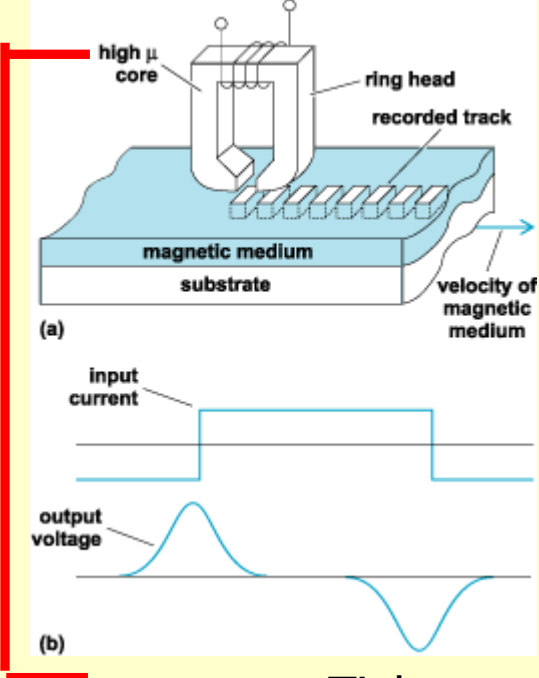
$$\phi = \mathbf{NBS} = NBS \cos wt \quad \varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = NBSwsenwt$$



Corrientes de Foucault. Cocina de Inducción

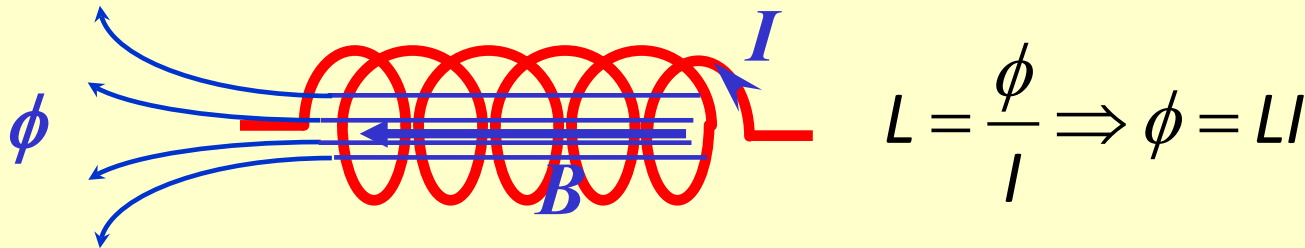
Lectura de información en un disco magnético

<https://www.youtube.com/watch?v=RlvnTk3BJKU>



Autoinducción

- Si tenemos una espira o un circuito, la relación entre el flujo magnético y la intensidad es el coeficiente de autoinducción de ese circuito. Presentan una elevada autoinducción las bobinas, solenoides, o autoinducciones.
- En una bobina con una corriente I , la corriente produce un campo magnético y un flujo magnético a través de ella. El cociente entre el flujo y I es la autoinducción de la bobina, L :



$$L = \frac{\phi}{I} \Rightarrow \phi = LI$$

En los circuitos se representa con el símbolo:

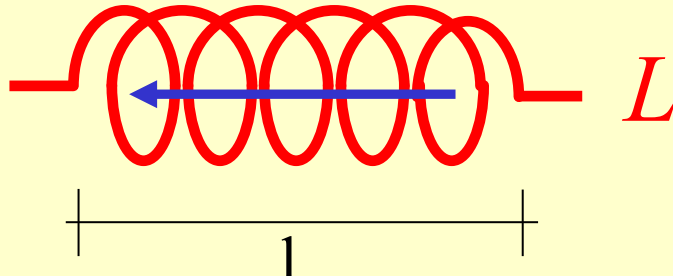


L

El dispositivo físico se llama “autoinducción”

Ejemplo: Autoinducción de un solenoide

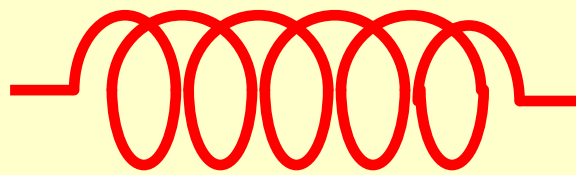
- Un solenoide con una corriente I , produce un campo magnético dentro del solenoide:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$


N : vueltas
 A : sección transversal

L

- Asumiendo que B es uniforme en el solenoide, el flujo magnético que atraviesa el solenoide es:

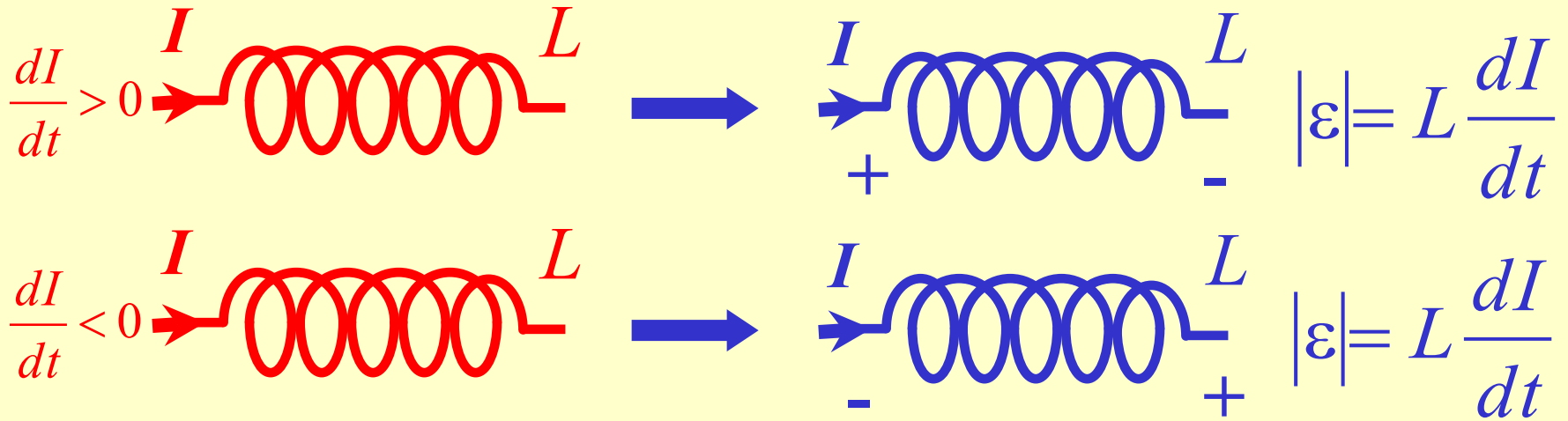
$$\phi = NBA = N \frac{\mu_0 NI}{l} A = \frac{\mu_0 N^2 IA}{l}$$


- Luego: $L = \frac{\phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$ *Autoinducción de un solenoide*

Fuerza electromotriz en una autoinducción.

Según la ley de Faraday aparece una fem: $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$

Polaridad de la fem inducida:



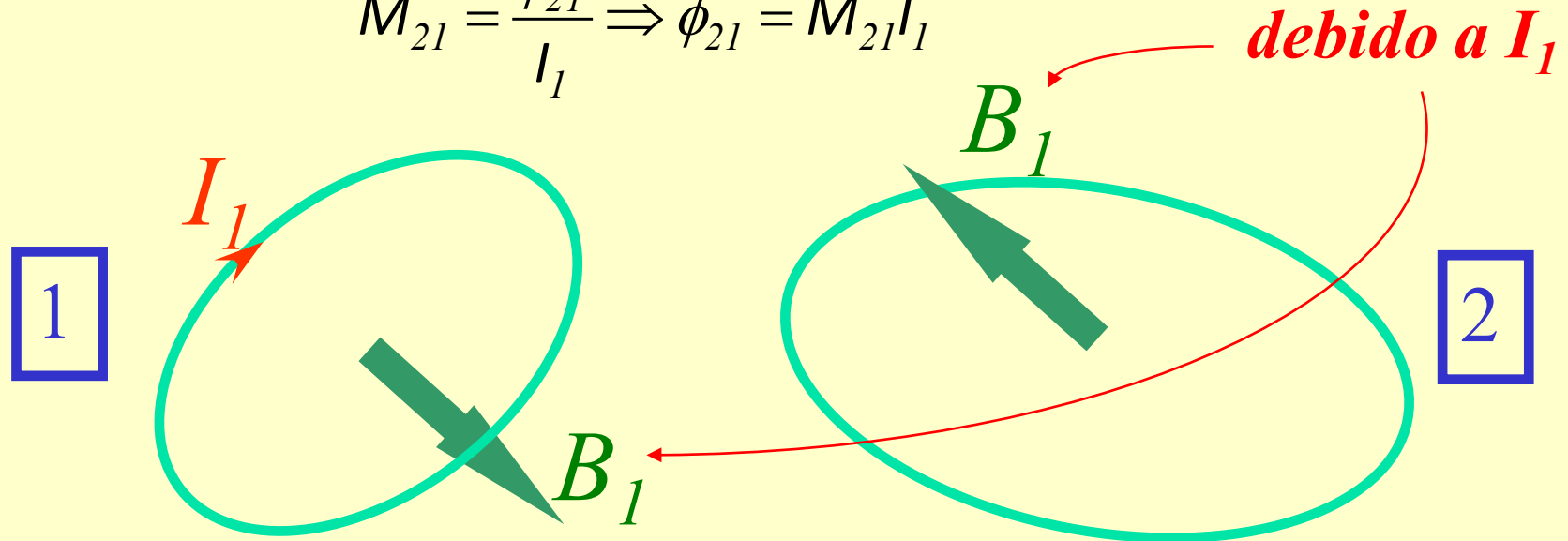
- Regla general:
- dI/dt tiene su propio signo (>0 or <0 según I)
 - El terminal + es aquel por donde entra la corriente.
 - Para corrientes estacionarias (D.C.) $\varepsilon=0$. Entonces, la autoinducción se comporta como un cortocircuito.

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

Inducción mutua

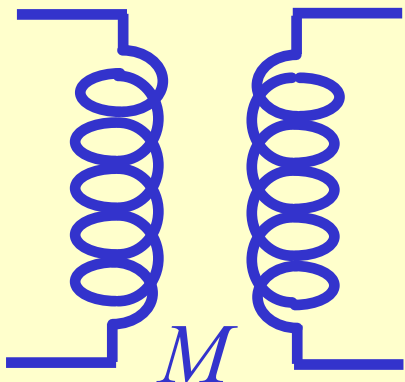
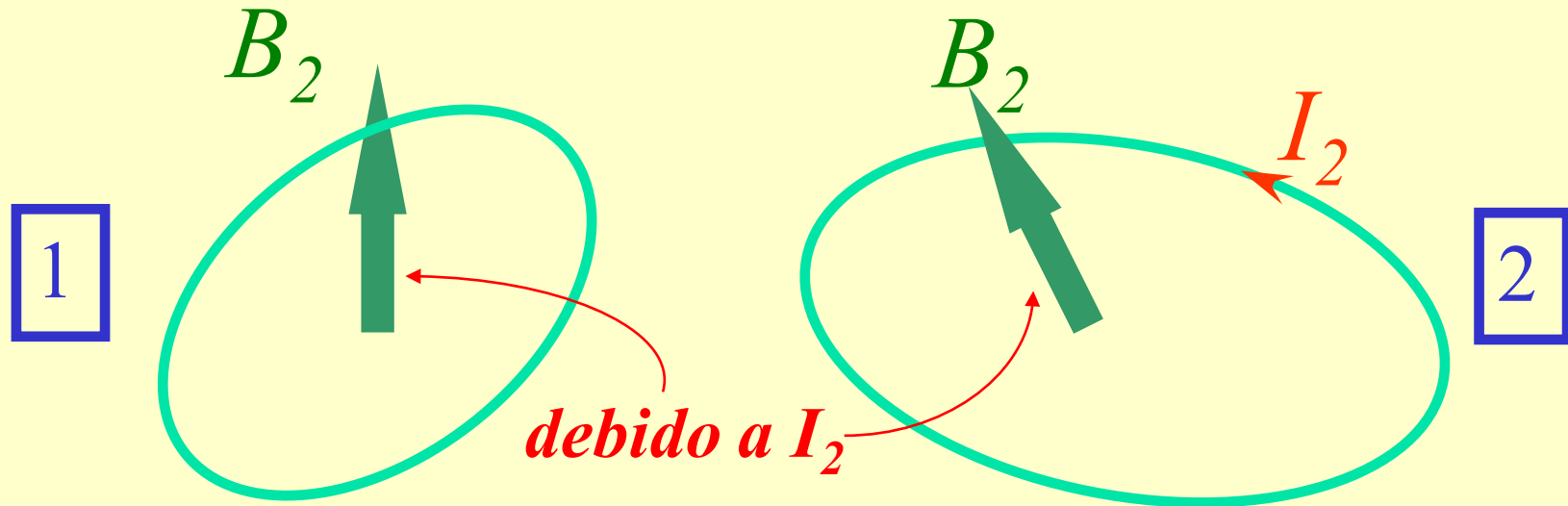
- Si tenemos **dos espiras** (o dos **circuitos**), una **corriente en uno** de los circuitos (I_1) **crea** un campo magnético y un **flujo magnético** a través del **segundo circuito** (ϕ_{21}). El cociente entre ϕ_{21} y I_1 es el coeficiente de inducción mutua entre ambos circuitos 1 y 2 (M_{21}):

$$M_{21} = \frac{\phi_{21}}{I_1} \Rightarrow \phi_{21} = M_{21}I_1$$



Inducción mutua

- Recíprocamente podemos definir $M_{12} = \frac{\phi_{12}}{I_2}$



- Se puede demostrar que $M_{12} = M_{21} = M$
- M es el coeficiente de inducción mutua entre los circuitos 1 y 2.

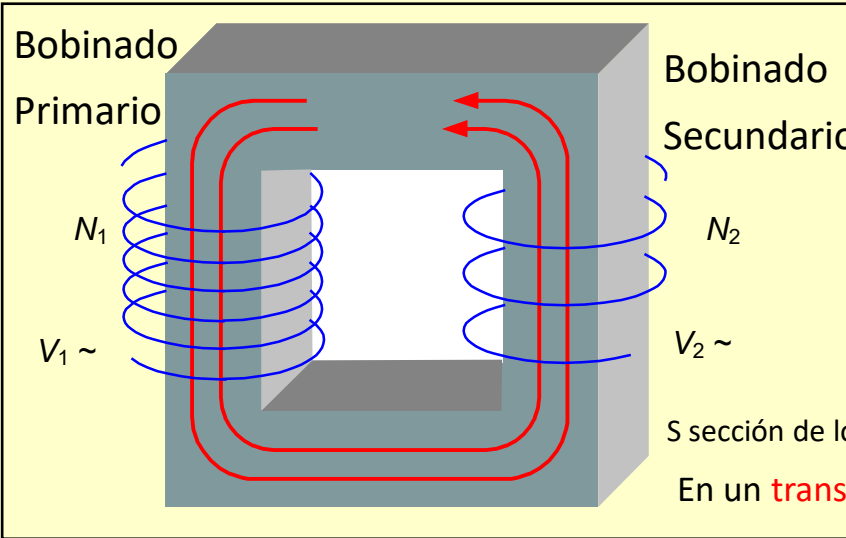
Unidad de inducción: **Henry (H)**

$$1 \text{ Henry} = 1 \text{ Wb}/1 \text{ A}$$

Símbolo de inducción mutua

El Transformador

- Si la **corriente** en el primario **no es constante**, se produce un **campo magnético variable en el tiempo**.
- Este **campo magnético es guiado** por el material ferromagnético, creando un **flujo magnético variable**, y por tanto una **fem** inducida en los terminales del **secundario**.
- Trabaja por inducción electromagnética, por lo que **no funciona en C.C. ó D.C.**



Bobinado Primario N_1 $V_1 \sim$

Bobinado Secundario N_2 $V_2 \sim$

S sección de los solenoides

En un **transformador ideal**, las **potencias en primario y secundario son iguales**

$$\phi_1 = N_1 B S \quad |\mathcal{E}_1| = V_1 = \frac{d\phi_1}{dt} = N_1 S \frac{dB}{dt}$$

$$\phi_2 = N_2 B S \quad |\mathcal{E}_2| = V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

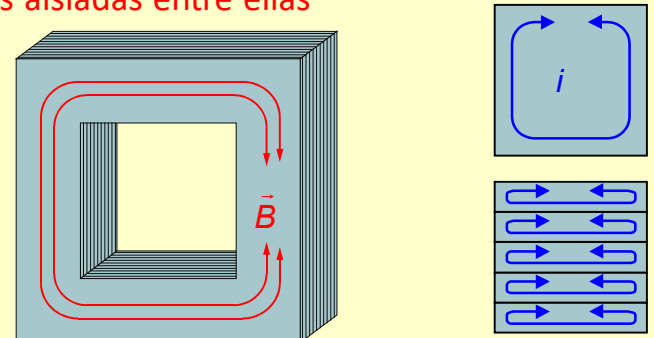
Relación de voltajes ó **relación de transformación** es igual a la **relación de espiras**

En un **transformador real** hay tres clases de **pérdidas**:

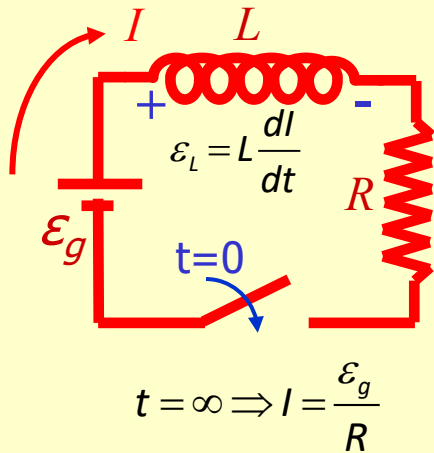
En los bobinados: efecto **Joule**

En el núcleo ferromagnético: **Histéresis magnética** y corrientes de **Foucault**

Para minimizar las corrientes de Foucault, el **núcleo se construye con láminas aisladas entre ellas**



Circuito RL. Energía almacenada en una autoinducción



$$t \leq 0 \Rightarrow I = 0$$

Si el interruptor está cerrado ($t > 0$): $L \frac{dI}{dt} + IR - \varepsilon_g = 0$

La corriente aumenta desde 0 (en $t=0$) hasta régimen permanente ($dI/dt=0$ y $\varepsilon_L=0$ en $t=\infty$). Ahora, la autoinducción se comporta como un cortocircuito, y $I(t=\infty) = \varepsilon_g/R$.

Si multiplicamos la ecuación del circuito por I , la potencia consumida por la autoinducción más la potencia disipada en la resistencia por efecto Joule será igual a la generada por la batería:

$$LI \frac{dI}{dt} + I^2 R = \varepsilon_g I$$

P_L P_R P_g

(Note: A red arrow labeled 'x I' points from the equation above to the term I^2 R in this diagram.)

Cuando la intensidad alcanza el valor I , la energía almacenada en la autoinducción es:

$$W_L = \int P_L dt = \int LI \frac{dI}{dt} dt = \int_0^I LI dI = \frac{1}{2} LI^2$$

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

*Energía almacenada
en una autoinducción*