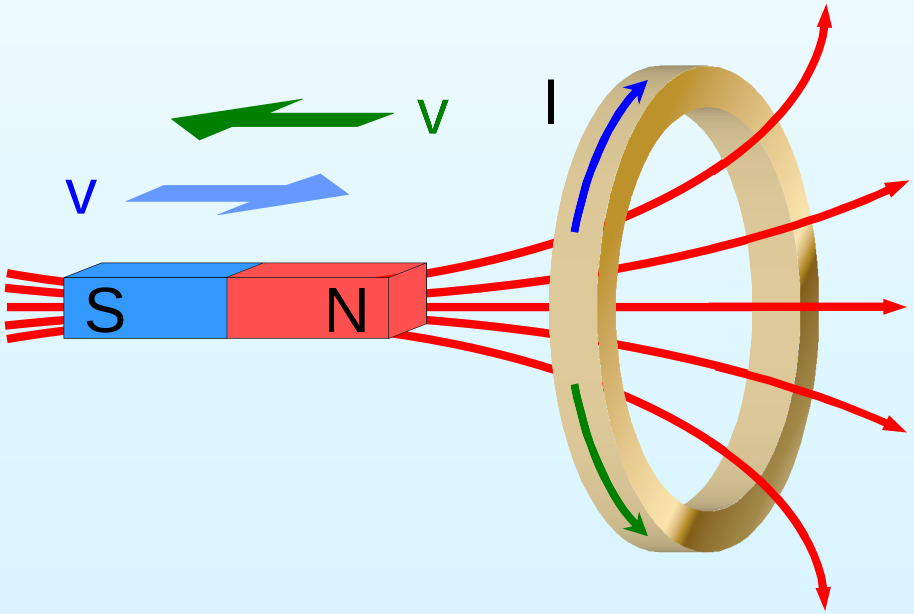
# TEMA 5: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

- Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz
- Inducción por movimiento. Generador de C. Alterna
- Autoinducción
- Energía del campo magnético
- Introducción al magnetismo en la materia

Michael Faraday 1791-1867

# Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz

- Experimento: puedes comprobar que si acercas o alejas un imán de una espira conductora, por la espira circula corriente eléctrica.
- Este ejemplo es un caso particular del fenómeno conocido como **inducción electromagnética**. La inducción electromagnética viene descrita por la **Ley de Faraday-Henry** y por la **Ley de Lenz**.




# Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz

**Ley de Faraday-Henry:**

*La fuerza electromotriz inducida en un circuito cerrado es igual a la rapidez con que varía el flujo magnético a través del área encerrada por el conductor.*

$$\varepsilon = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|$$

Flujo de campo magnético $\Phi$ [Weber]:

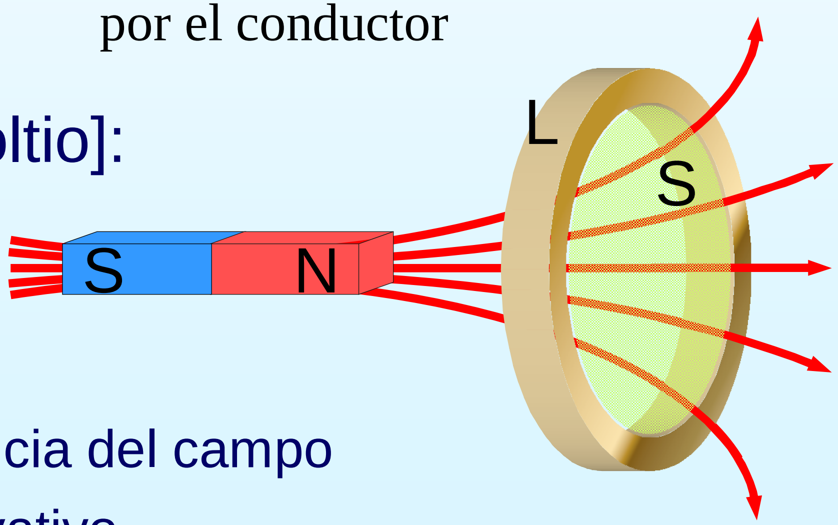
$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

S, superficie encerrada por el conductor

Fuerza electromotriz (f.e.m) $\varepsilon$ [Voltio]:

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

L, trayectoria cerrada a lo largo del conductor



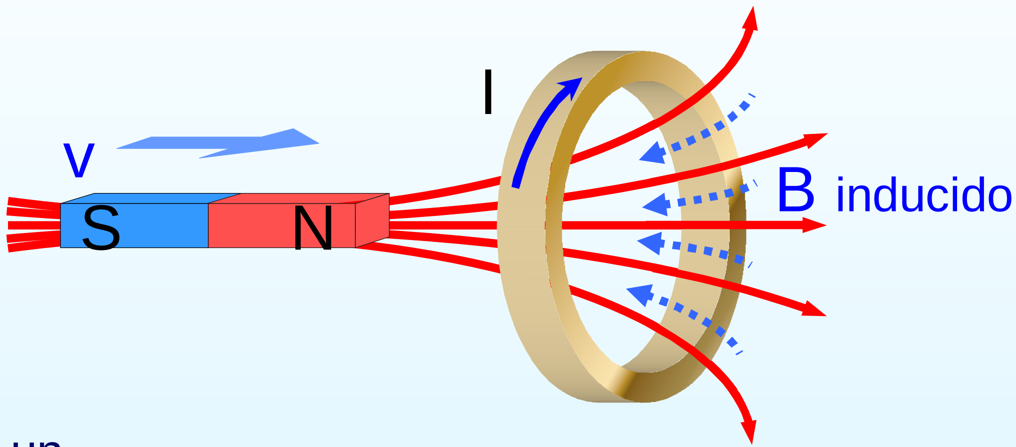

- El campo eléctrico inducido, a diferencia del campo eléctrico electrostático, es no conservativo.

# Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz

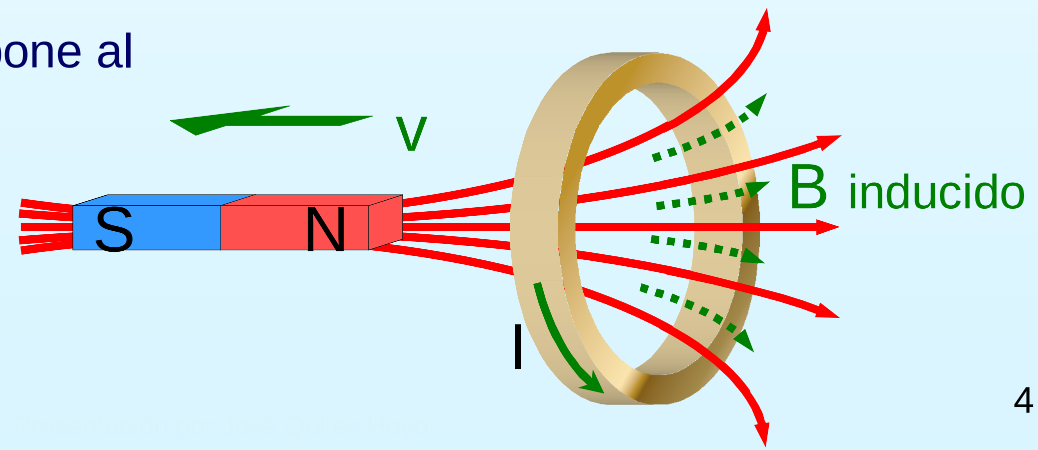
**Ley de Lenz:**

*La corriente inducida posee un sentido tal, que tiende a oponerse a la causa que la produce (signo negativo en la ley de Faraday-Henry)*

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




- La corriente inducida genera un campo magnético que se opone al cambio de flujo magnético.



# Ley de Faraday-Henry. Ley de Lenz

Posibles causas de variación del flujo de campo magnético:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\overleftarrow{S}$$

$$\boxed{B = f(t)}$$

Varía el campo magnético

$$S = h(t)$$

Varía el tamaño de la superficie

$$\vec{B} \cdot d\overleftarrow{S} = \left|\vec{B}\right| \left|d\overleftarrow{S}\right| \cos(\alpha) ; \alpha = g(t)$$

Varía la orientación relativa

Cualquiera de estas tres causas, o una combinación de ellas, genera una fuerza electromotriz inducida.

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}\left(\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}\right)$$

# Inducción por movimiento

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\left(\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}\right)$$

Una de las formas más comunes de obtener corriente inducida es a través del **movimiento**. Se transforma energía mecánica en energía eléctrica.

Por ejemplo:

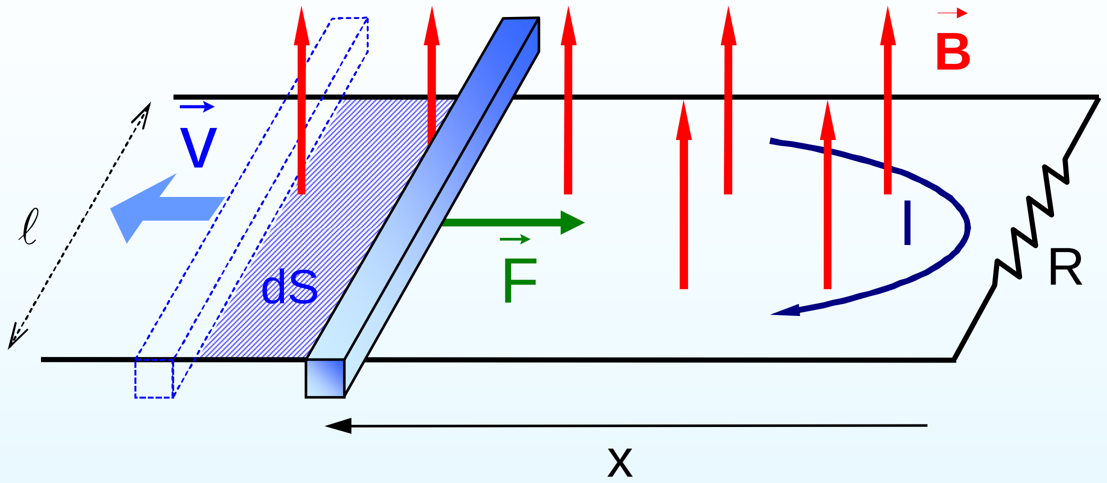
- aumentando o disminuyendo, con velocidad *v,* la superficie de un circuito rectangular perpendicular a un campo magnético uniforme

- cambiando la orientación de un campo magnético con respecto a la superficie que definen las espiras

- **Generador** una bobina gira dentro de un campo magnético uniforme
- **Alternador** la fuerza electromotriz se induce en bobinas estáticas debido a un imán giratorio

# Inducción por movimiento

F.e.m inducida por variación de la superficie de un circuito y fuerza sobre una barra móvil.




$$\Phi(t) = BS = B\ell x = B\ell vt$$

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = B\ell v}$$

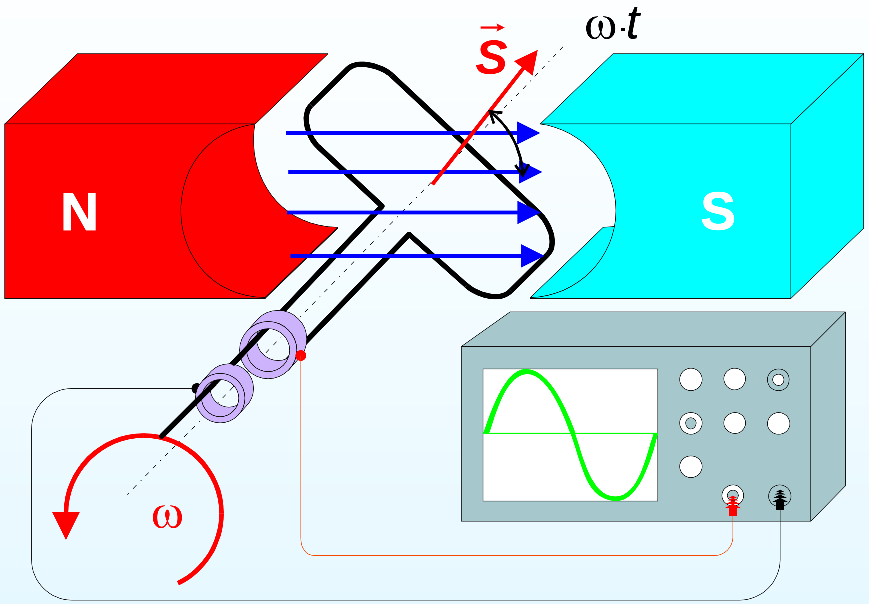
$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\ell v}{R}$$

$$F = i\ell B = \frac{B^2\ell^2 v}{R}$$

$$\boxed{\vec{F} = -\frac{B^2\ell^2}{R}\vec{v}}$$

# Inducción por movimiento. Generador de C.A.

Generación de corriente alterna (C.A.) (caso particular de inducción por movimiento).




$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int BdS\cos(\alpha)$$

$$\alpha = \omega t$$

*fem inducida en un conductor que gira en presencia de un campo magnético*

$$\varepsilon = \omega BA\,\mathrm{sen}(\omega t)$$

*Para N conductores (bobina):*

$$\varepsilon = N\omega BA\,\mathrm{sen}(\omega t)$$

- Si la espira (bobina) es estática y gira el imán: Alternador (dinamo).
- Motor de Corriente Alterna: esquema parecido al generador de C.A.

# Inducción por movimiento. Generador de C.A.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{d\,t} = NBA\,w\,senwt$$

En el caso más general, si $\varphi$ *es el ángulo que forman el campo B y el vector superficie de las espiras en el instante inicial, la f.e.m. alterna instantánea es:*

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \operatorname{sen}(wt + \varphi)$$

siendo:

$$\varepsilon_0 = NBS\,w; \quad T = \frac{1}{f}; \quad w = 2\pi f$$

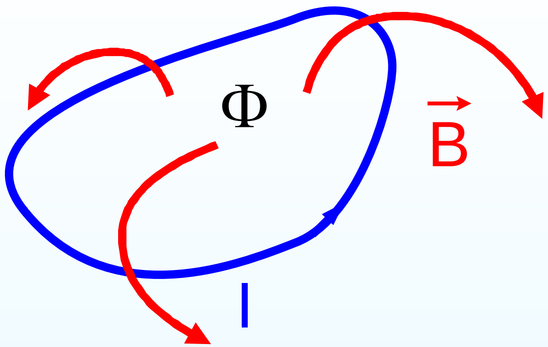
**$\varepsilon_0$ (Amplitud):** valor máximo de ε

***T* (período):** tiempo que las espiras tardan en dar una vuelta completa

***f* (frecuencia):** número de vueltas por segundo que dan las espiras

# Autoinducción

**Autoflujo**: flujo de campo magnético debido a la corriente del propio circuito.




$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\boxed{L = \frac{\Phi}{I}}$$

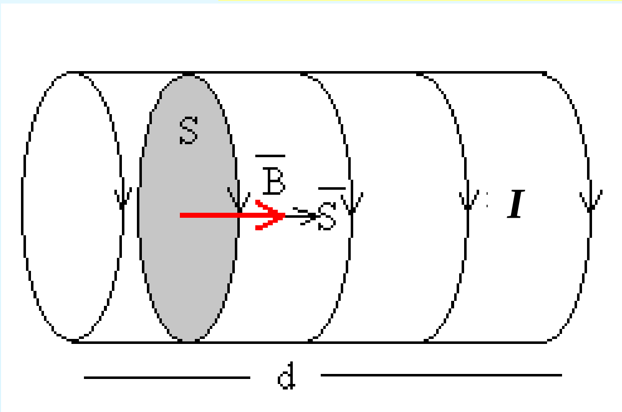
**Coeficiente de autoinducción**

Unidad en S.I.:
Henrio, H

$$\Phi = L\,I$$

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}}$$

**Ejemplo:** Solenoide de ***N*** vueltas, longitud ***d***, sección ***S***, por el que circula una corriente de intensidad ***I***




$$B_{1e} = \frac{\mu_0 N I}{d}$$

$$\Phi_{1e} = \int_S \vec{B}_{1e} \cdot d\vec{S} = B_{1e} \, . \, S$$

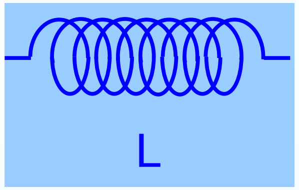
$$\Phi_T = N\,\Phi_{1e}$$

$$L = \frac{\Phi_T}{I} = \frac{\mu_0 N^2 S}{d} \quad [Henrio]$$

# Autoinducción

Comportamiento de la autoinducción en un circuito eléctrico.

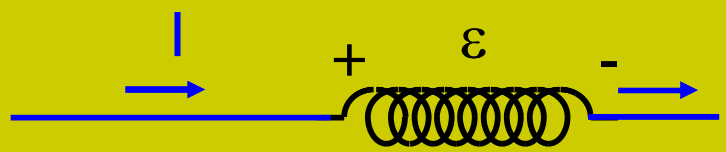
símbolo eléctrico:




Asociación de *N* autoinducciones:

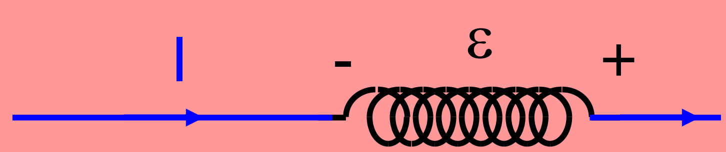
-serie: $L_{equivalente} = L_1 + L_2 + \ldots + L_N$

-paralelo: $1/L_{equiv.} = 1/L_1 + 1/L_2 + \ldots + 1/L_N$




I crece receptor

$$-L\frac{dI}{dt} < 0$$




I decrece generador

$$-L\frac{dI}{dt} > 0$$

En circuitos de corriente continua (C.C.) consideraremos sólo dos situaciones:

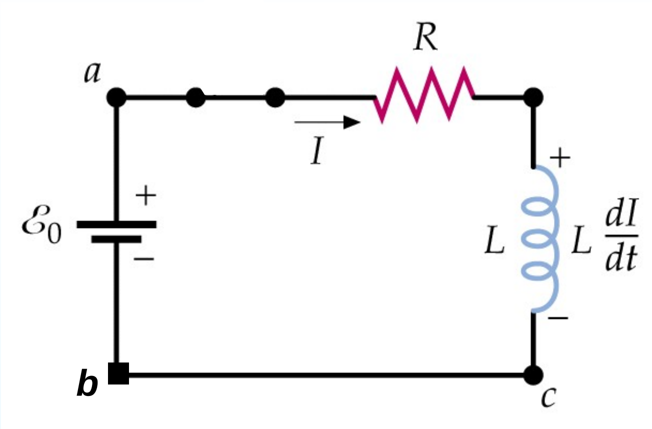
- Comienza a circular corriente: en el instante inicial la autoinducción se opone al paso de corriente (circuito abierto)
- Se estabiliza la intensidad de corriente: la f.e.m. en la autoinducción es cero (cortocircuito)

# Energía del campo magnético

**Para mantener la corriente, es necesario suministrar energía al circuito**

$$IR = \varepsilon_0 - L\frac{dI}{dt}$$

$$\varepsilon_0 = IR + L\frac{dI}{dt}$$




$$\underbrace{I\varepsilon_0}_{\text{Potencia que suministra la batería}} = \underbrace{I^2 R}_{P_{Joule}} + \underbrace{LI\frac{dI}{dt}}_{\text{Potencia para establecer una corriente de autoinducción}}$$

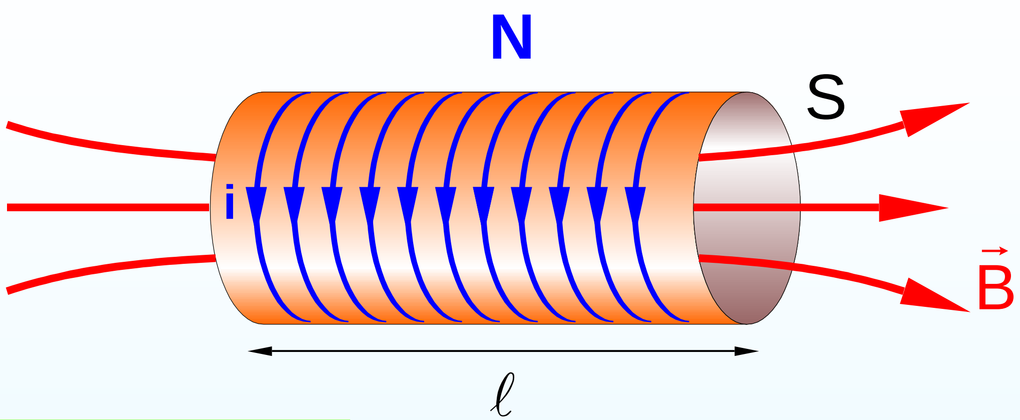
$\frac{dI}{dt} > 0$ **Almacena energía**

$\frac{dI}{dt} < 0$ **Cede energía**

$$P = \frac{dU_B}{dt} = LI\frac{dI}{dt} \Rightarrow \boxed{U_B = \frac{1}{2}LI^2}$$

Energía almacenada en una autoinducción.

# Energía del campo magnético




$$\Phi = N\,BS = \frac{\mu_0 N^2 S I}{\ell}$$

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell}$$

**Energía almacenada**

$$U = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\ell} I^2 = \left(\frac{\mu_0 N I}{\ell}\right)^2 \frac{S\ell}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} B^2.\boldsymbol{Vol}$$

Densidad de energía del campo magnético en un punto [J/m³]

$$u_B = \frac{dU}{d\,\boldsymbol{V}} = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

Energía acumulada

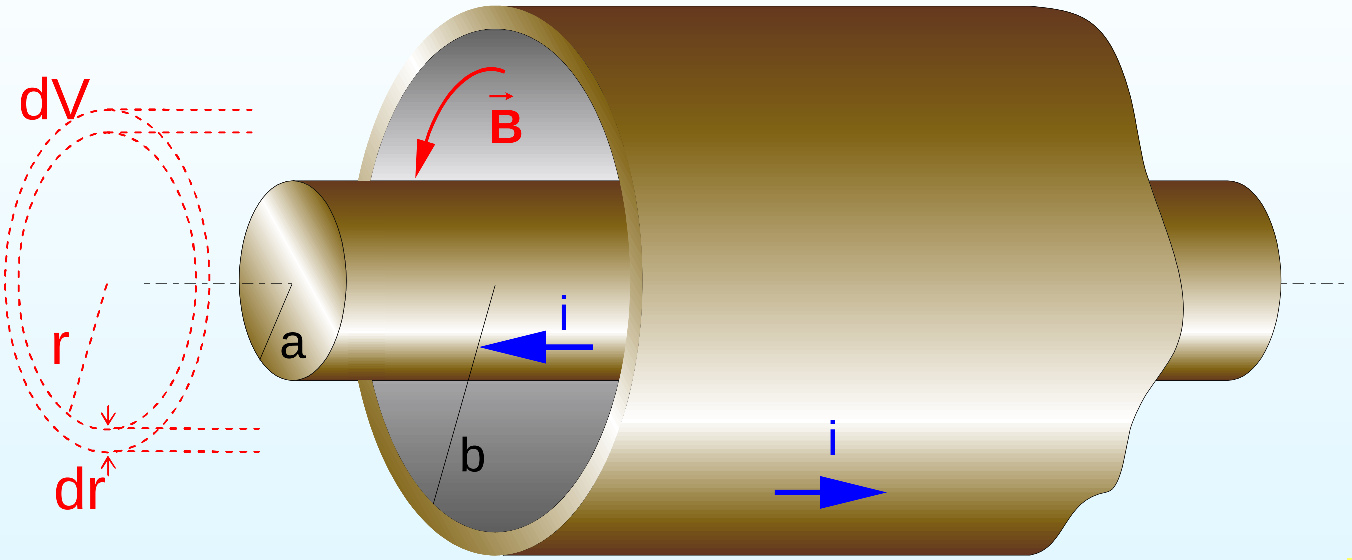
en un volumen V

$$U = \int_{Volumen} u_B \, dV$$

# Energía del campo magnético

**Ejemplo:**

Un cable coaxial está constituido por dos cilindros concéntricos de radios a y b. Su conductor central es hueco y lleva una corriente I, que retorna por el conductor exterior. Calcular: la energía magnética *U* almacenada en un tramo de longitud h, y la autoinducción *L* para este tramo.




$$u_B = \frac{1}{2\mu_0}B^2$$

$$U = \int \frac{1}{2\mu_0}B^2 dV = \frac{1}{2\mu_0}\int_a^b \left(\frac{\mu_0 i}{2\pi r}\right)^2 2\pi r h dr = \frac{\mu_0 i^2 h}{4\pi}\int_a^b \frac{dr}{r}$$

$$\boxed{U = \frac{\mu_0 i^2 h}{4\pi}\ln\frac{b}{a}}$$

$$U = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{\mu_0 i^2 h}{4\pi}\ln\frac{b}{a} \quad \rightarrow \quad \boxed{L = \frac{\mu_0 h}{2\pi}\ln\frac{b}{a}}$$