

08_induccion_electromagnetica

June 19, 2026

1 Tema 8 — Inducción electromagnética

Física II · GIERM (Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica)

Nota sobre la fuente. El PDF oficial «*Apuntes de Inducción electromagnética-23-24.pdf*» es un **escaneo sin capa de texto** (pdftotext devuelve ~0 caracteres). Por eso este notebook se ha redactado con el **contenido canónico estándar** del tema (Tipler–Mosca / Serway), siguiendo el plan de apuntes y respetando el alcance pedido. Contrasta con el PDF oficial como referencia visual.

Contenido 1. Flujo magnético Φ_B 2. Ley de Faraday 3. Ley de Lenz (y el signo) 4. FEM de movimiento — barra deslizante 5. Autoinducción e inductancia L 6. Energía magnética 7. Introducción al circuito RL

Enfoque (examen, Mecatrónica): *worked-example* primero, resultados y uso. Figuras con numpy/matplotlib. Autocontenido.

1.1 0. Idea central en una frase

Un campo magnético que *cambia con el tiempo* (el flujo que atraviesa un circuito) genera una fuerza electromotriz (FEM) que tiende a impulsar corriente. Lo que importa no es B , sino su *variación*.

Es la base de **dinamos, alternadores, transformadores, motores, frenos por corrientes de Foucault y carga inalámbrica**. En Mecatrónica es el puente entre lo eléctrico y lo mecánico.

1.2 1. Flujo magnético

1.2.1 Idea y porqué

El **flujo magnético** Φ_B mide *cuántas líneas de campo* $\vec{B}$ atraviesan una superficie: el “número de líneas atrapadas” por el circuito. La inducción solo aparece cuando **ese número cambia**.

1.2.2 Fórmulas

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [\text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2]$$

Campo **uniforme** sobre superficie plana de área A :

$$\Phi_B = B A \cos \theta$$

con θ = ángulo entre $\vec{B}$ y la **normal** $\hat{n}$ a la superficie.

1.2.3 Tres maneras de cambiar Φ_B (memorízalas)

Cambia...	Ejemplo físico	Aparece en
B	imán que se acerca, corriente variable	transformador, carga inalámbrica
A	barra deslizante que agranda la espira	FEM de movimiento
θ	espira que gira en un campo	alternador / dinamo

1.3 2. Ley de Faraday

1.3.1 Idea y porqué

La FEM inducida en un circuito es **menos** la rapidez con que cambia el flujo. El signo menos es la **ley de Lenz**.

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

Para una **bobina de N espiras**:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Por qué tiene sentido: si nada cambia ($d\Phi/dt = 0$) no hay FEM, aunque B sea enorme. Un imán quieto sobre una bobina no produce nada; el truco es *moverlo*.

Si el circuito está cerrado con resistencia R : $I = \varepsilon/R$.

1.4 3. Ley de Lenz — el signo (el error típico)

1.4.1 Idea

La corriente inducida circula en el sentido que se *opone al cambio* que la produjo. La naturaleza “se resiste” a que el flujo cambie.

Es **conservación de la energía**: si la corriente inducida *favoreciera* el cambio, se autoamplificaría y tendrías energía gratis.

1.4.2 Receta de signo a prueba de fallos (úsala en el examen)

1. **Fija la normal $\hat{n}$** de la espira (la que quieras) $\rightarrow$ fija el sentido “positivo” de la corriente por la **regla de la mano derecha**.
2. Calcula Φ_B y su derivada **con ese criterio**.
3. $\varepsilon = -d\Phi_B/dt$. El **signo** de ε da el sentido de la corriente respecto a tu $\hat{n}$.

1.4.3 Atajo físico (sin signos)

- ¿El flujo **aumenta**? $\rightarrow$ la corriente inducida crea un $\vec{B}$ **opuesto** para frenarlo.
- ¿El flujo **disminuye**? $\rightarrow$ la corriente inducida crea un $\vec{B}$ **a favor** para mantenerlo.

1.4.4 Errores típicos sobre el signo

1. **Olvidar que Lenz se opone al *cambio*, no al *campo*.** Si B es grande pero *decreciendo*, la corriente inducida intenta **reforzar** B (va a favor), no oponerse a él.
2. **Cambiar el sentido de la normal a mitad de problema.** Elige $\hat{n}$ al principio y NO la cambies.
3. **Poner el $-$ y además razonar el sentido por Lenz $\rightarrow$ doble negación.** O el signo formal, o el atajo físico; no los dos a la vez.
4. **Creer que la fuerza magnética sobre la barra siempre frena.** Solo se opone *al movimiento* que cambia el flujo.

1.5 4. FEM de movimiento — barra deslizante (worked example)

1.5.1 Montaje

Barra conductora de longitud ℓ que desliza con velocidad constante v sobre dos raíles paralelos, en campo $\vec{B}$ **uniforme y perpendicular** al plano (entrando en el papel). La espira tiene resistencia R .

1.5.2 Deducción

El área crece: $A(t) = \ell x(t)$, con $x(t) = x_0 + vt$. El flujo:

$$\Phi_B = B A = B \ell x(t)$$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -B \ell \frac{dx}{dt} \Rightarrow \boxed{|\varepsilon| = B \ell v}$$

1.5.3 Magnitudes derivadas

$$I = \frac{|\varepsilon|}{R} = \frac{B \ell v}{R} \quad F_{\text{ext}} = I \ell B = \frac{B^2 \ell^2 v}{R} \quad P = F v = \frac{B^2 \ell^2 v^2}{R} = I^2 R$$

La potencia mecánica que aportas (Fv) **se disipa íntegramente** en R por efecto Joule ($I^2 R$): conversor electromecánico con balance perfecto.

1.5.4 Ejemplo numérico (paso a paso)

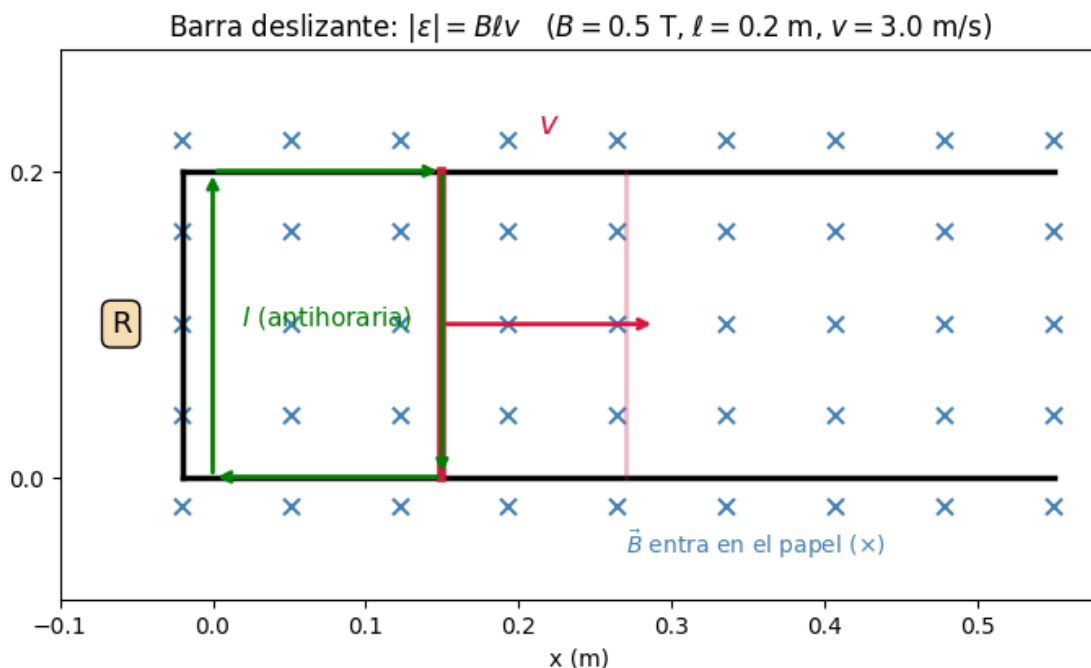
$B = 0,5 \text{ T}$, $\ell = 0,20 \text{ m}$, $v = 3 \text{ m/s}$, $R = 2 \text{ } \Omega$. - $|\varepsilon| = B \ell v = 0,5 \cdot 0,20 \cdot 3 = \mathbf{0,30 \text{ V}}$ - $I = \varepsilon/R = 0,30/2 = \mathbf{0,15 \text{ A}}$ - $F = I \ell B = 0,15 \cdot 0,20 \cdot 0,5 = \mathbf{0,015 \text{ N}}$ (fuerza para mantener v) - $P = F v = 0,015 \cdot 3 = \mathbf{0,045 \text{ W}} = I^2 R = 0,15^2 \cdot 2$

$$|\text{emf}| = B \cdot \ell \cdot v = 0.300 \text{ V}$$

$$I = \text{emf}/R = 0.150 \text{ A}$$

$$F = I \cdot \ell \cdot B = 0.0150 \text{ N} \quad (\text{fuerza para mantener } v)$$

$$P_{\text{mec}} = F \cdot v = 0.0450 \text{ W} \quad == I^2 \cdot R = 0.0450 \text{ W}$$



1.6 5. Autoinducción e inductancia

1.6.1 Idea y porqué

Una bobina con corriente I crea su **propio** flujo. Si I cambia, ese flujo cambia y, por Faraday, se **autoinduce** una FEM que (Lenz) **se opone al cambio de su propia corriente**: es una “inercia eléctrica”.

La **inductancia** L relaciona flujo concatenado y corriente:

$$N\Phi_B = LI \quad \Rightarrow \quad \boxed{\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}} \quad [L] = \text{henrio (H)} = \text{Wb/A}$$

Solenoides ideales ($n = N/\ell$ espiras/m, área A , longitud ℓ):

$$L = \mu_0 n^2 A \ell = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

L depende **solo de la geometría** (y del núcleo, vía μ), no de I — igual que C depende solo de la geometría.

1.6.2 Analogía mecánica (Mecatrónica)

L es a la corriente lo que la **masa** a la velocidad: se opone a cambios bruscos. $U = \frac{1}{2}LI^2$ es el análogo de $\frac{1}{2}mv^2$.

1.7 6. Energía magnética

1.7.1 Idea

Establecer una corriente I en una inductancia exige **trabajar contra** la FEM autoinducida. Ese trabajo queda **almacenado en el campo magnético**:

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

Densidad de energía del campo magnético:

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad [\text{J/m}^3]$$

(Compara con la eléctrica $u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$: misma estructura.)

1.7.2 Ejemplo numérico

$$L = 50 \text{ mH}, I = 2 \text{ A} \rightarrow U = \frac{1}{2}(0,05)(2)^2 = \mathbf{0,10 \text{ J}}.$$

1.8 7. Introducción al circuito RL

1.8.1 Ecuación

Fuente V_0 , resistencia R e inductancia L en serie. Al cerrar el interruptor, la KVL da:

$$V_0 = IR + L \frac{dI}{dt}$$

1.8.2 Solución (crecimiento de corriente)

$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad \tau = \frac{L}{R} \text{ [s]}$$

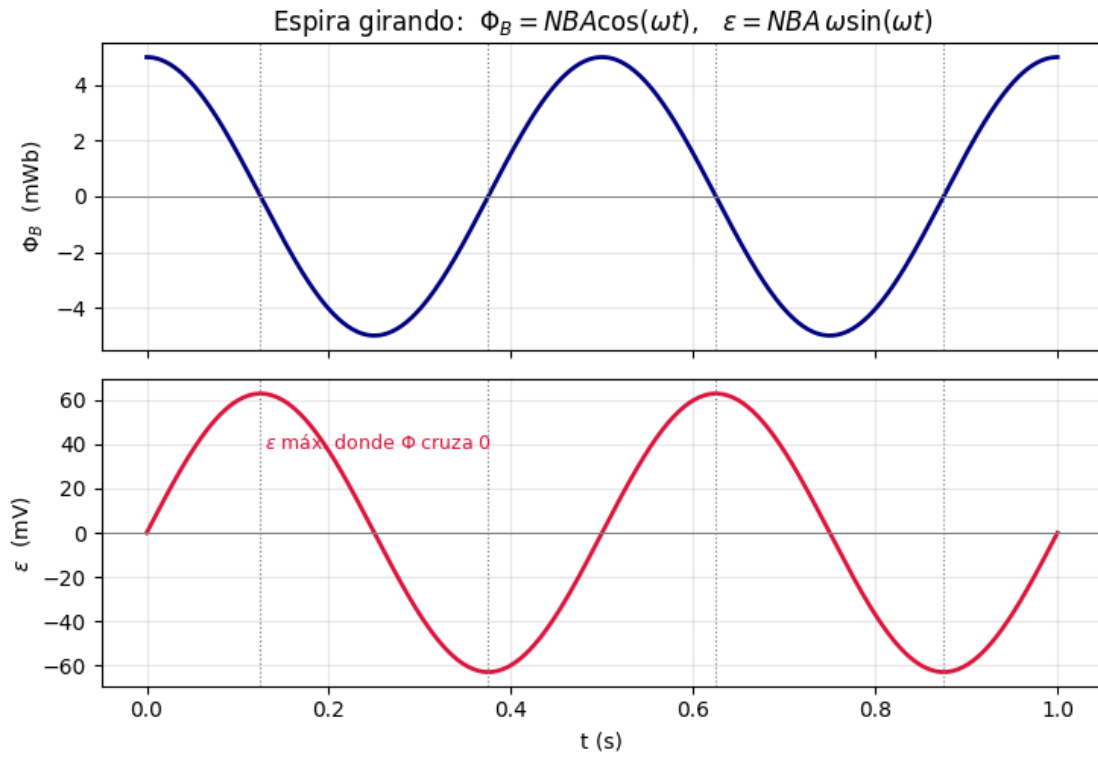
- En $t = 0$: $I = 0$. La inductancia **se opone** al cambio brusco; al principio actúa como *circuito abierto*.
- En $t \rightarrow \infty$: $I \rightarrow V_0/R$. Ya no “siente” cambios $\rightarrow$ actúa como *cortocircuito* (cable).
- $\tau = L/R = \mathbf{\text{constante de tiempo}}$: en $t = \tau$ alcanza el 63% del valor final; en 5τ , régimen permanente ($> 99\%$).

1.8.3 Apertura (decaimiento)

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

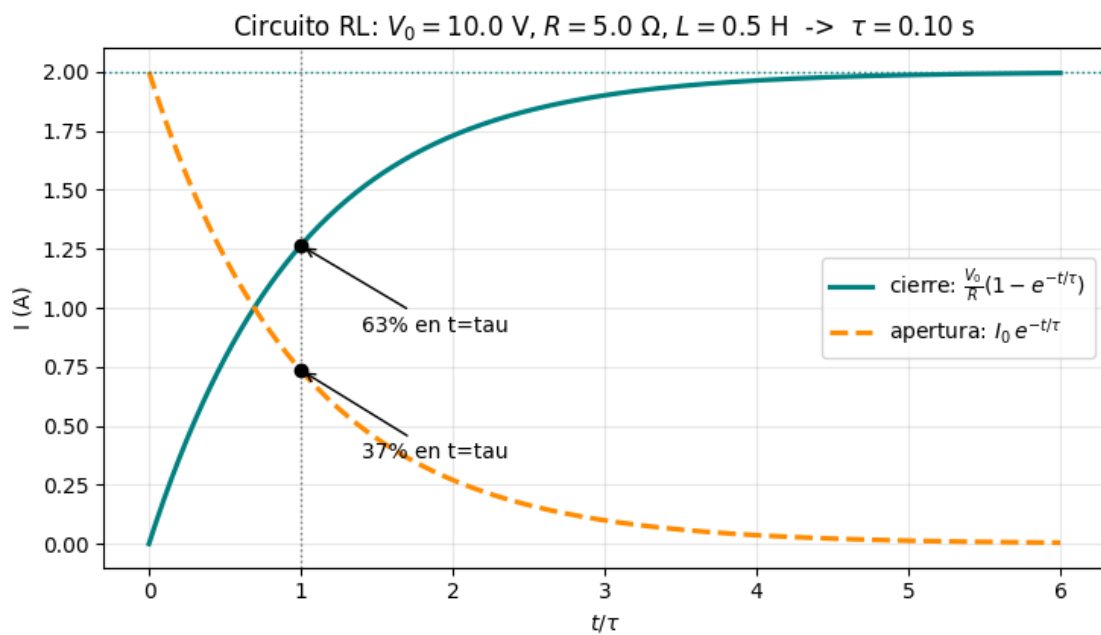
1.8.4 Errores típicos

- Confundir $\tau = L/R$ (RL) con $\tau = RC$ (RC). En RL, **más $L \rightarrow$ más lento; más $R \rightarrow$ más rápido**.
- Olvidar que en $t = 0^+$ la corriente por L es **continua** (no salta).



Desfase de 90: la FEM es máxima cuando el flujo cambia más rápido ($\Phi=0$).

$\tau = L/R = 0.100$ s, $I_{\text{inf}} = V_0/R = 2.00$ A



1.9 8. Resumen de fórmulas (chuleta de examen)

Concepto	Fórmula	Notas
Flujo magnético	$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA \cos \theta$	Wb
Ley de Faraday	$\varepsilon = -N d\Phi_B/dt$	el signo = Lenz
FEM de movimiento	$ \varepsilon = B\ell v$	barra deslizante
Corriente / fuerza	$I = \varepsilon/R, F = I\ell B = B^2\ell^2 v/R$	la fuerza frena
Potencia	$P = Fv = I^2 R$	balance de energía
Inductancia	$N\Phi = LI, \varepsilon_L = -L dI/dt$	henrio
Solenoides	$L = \mu_0 N^2 A/\ell$	solo geometría
Energía magnética	$U = \frac{1}{2} LI^2, u_B = B^2/2\mu_0$	en el campo
RL (cierre)	$I = \frac{V_0}{R}(1 - e^{-t/\tau}), \tau = L/R$	63% en τ

1.9.1 Las 3 trampas que más caen

1. **Lenz se opone al *cambio* de flujo, no a B .** Si el flujo decrece, la corriente inducida va *a favor* de B .
2. $\tau_{RL} = L/R$ (no RC): más $L \rightarrow$ más lento.
3. **Sin variación, no hay FEM:** un imán quieto, por intenso que sea, no induce nada.