

09_ondas_electromagneticas

June 19, 2026

1 Tema 9 — Ondas electromagnéticas

Física II (GIERM) · Apuntes propios de examen

Nota sobre la fuente. El PDF oficial «*Apuntes de ondas electromagnéticas 23-24*» es un **escaneo sin capa de texto** (pdftotext devolvió vacío). Por eso este notebook se construye con el **contenido canónico estándar** del tema (síntesis de Maxwell, onda EM, vector de Poynting, espectro), siguiendo el guion del plan de la asignatura. Cuando recuperes el OCR del PDF oficial, contrasta notación y constantes.

1.1 1. Idea central (lo que tienes que llevarte al examen)

Las **cuatro ecuaciones de Maxwell** resumen *todo* el electromagnetismo. Su consecuencia más espectacular es que, **lejos de las cargas**, los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ pueden sostenerse mutuamente y propagarse por el vacío como una **onda**: un campo eléctrico variable genera campo magnético, y un campo magnético variable genera campo eléctrico. Esa onda viaja a velocidad

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

que coincide con la velocidad de la luz $\Rightarrow$ **la luz es una onda electromagnética**. Toda la radiación (radio, microondas, infrarrojo, visible, UV, rayos X y γ) es lo mismo, solo cambia la frecuencia.

1.2 2. El *porqué*: la pieza que faltaba (corriente de desplazamiento)

Antes de Maxwell, la ley de Ampère era $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc}$. **Problema:** considera un condensador cargándose. Aplica Ampère a un lazo alrededor del cable y elige dos superficies que se apoyan en él: una que el cable atraviesa (da $\mu_0 I$) y otra que pasa *entre las placas*, donde **no hay corriente de conducción** (daría 0). ¡Contradicción! El campo $\vec{B}$ no puede depender de qué superficie elijas.

Maxwell lo arregló: entre las placas hay un **campo eléctrico variable**. Definió la **corriente de desplazamiento**

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad \Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A},$$

y la añadió a la ley de Ampère. Así un $\vec{E}$ cambiante actúa como una corriente que crea $\vec{B}$. **Esta es la simetría que cierra el sistema:** un $\vec{B}$ cambiante crea $\vec{E}$ (Faraday) y un $\vec{E}$ cambiante crea $\vec{B}$ (Ampère–Maxwell). De esa retroalimentación nace la onda EM.

1.3 3. Las cuatro ecuaciones de Maxwell (forma integral)

#	Nombre	Forma integral	Qué dice en una frase
1	Gauss (eléctrica)	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$	Las cargas son fuentes y sumideros del campo $\vec{E}$ (líneas que nacen/mueren).
2	Gauss (magnética)	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	No existen monopolos magnéticos: las líneas de $\vec{B}$ siempre se cierran.
3	Faraday	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	Un campo magnético variable crea un campo eléctrico (inducido, rotacional).
4	Ampère– Maxwell	$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	Las corrientes y un campo eléctrico variable crean campo magnético.

Lectura conjunta: las dos primeras (de *flujo*, superficie cerrada) describen las **fuentes**; las dos últimas (de *circulación*, curva cerrada) describen cómo un campo **genera** al otro al variar en el tiempo. En el **vacío sin cargas ni corrientes** ($Q = 0$, $I = 0$):

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 0, \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0, \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

Combinándolas se obtiene la **ecuación de ondas** para cada componente, con velocidad $v = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = c$.

1.4 4. Estructura de la onda EM plana

Para una onda plana monocromática que viaja en $+x$:

$$\vec{E} = E_0 \cos(kx - \omega t) \hat{j}, \quad \vec{B} = B_0 \cos(kx - \omega t) \hat{k}.$$

Propiedades clave (todas caen en examen):

1. **Transversal:** $\vec{E} \perp$ dirección de propagación y $\vec{B} \perp$ dirección de propagación.
2. $\vec{E} \perp \vec{B}$ y **en fase** (sus máximos y ceros coinciden en el mismo instante y lugar).
3. La propagación va en la dirección de $\vec{E} \times \vec{B}$ (**regla de la mano derecha:** de $\vec{E}$ a $\vec{B}$).
4. **Relación de amplitudes:** $\frac{E}{B} = c \Rightarrow E_0 = c B_0$. (Por eso B parece «pequeño»: en unidades SI $B_0 = E_0/c$.)
5. **Relaciones de onda:** $\omega = ck$, con $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\omega = 2\pi f$, y $\boxed{c = \lambda f}$.

Truco mnemotécnico: $\hat{E} \times \hat{B} = \hat{v}$ (dirección de propagación). Si te dan $\vec{E}$ en $\hat{j}$ y la onda va en $+\hat{i}$, entonces $\vec{B}$ va en $\hat{k}$ porque $\hat{j} \times \hat{k} = \hat{i}$.

1.5 5. Energía y vector de Poynting

La onda transporta energía. La **densidad de energía** instantánea es

$$u = \underbrace{\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2}_{\text{eléctrica}} + \underbrace{\frac{B^2}{2\mu_0}}_{\text{magnética}} = \epsilon_0 E^2 \quad (\text{ambas contribuciones son iguales, porque } E = cB).$$

El **vector de Poynting** da el flujo de energía (potencia por unidad de área) y **su dirección es la de propagación**:

$$\boxed{\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}} \quad [\text{W/m}^2].$$

Como E y B oscilan, lo útil es el **promedio temporal**, la **intensidad**:

$$I = \langle S \rangle = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0} = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2.$$

(El factor $\frac{1}{2}$ viene del promedio de $\cos^2$.) La onda también ejerce **presión de radiación** $P_{\text{rad}} = I/c$ (absorción total) o $2I/c$ (reflexión total).

1.6 6. Ejemplos resueltos (worked examples)

1.6.1 Ejemplo 1 — Frecuencia, número de onda y amplitud de B

Una onda EM en el vacío tiene longitud de onda $\lambda = 600$ nm (luz visible naranja) y amplitud de campo eléctrico $E_0 = 50$ V/m. Halla f , k , ω y B_0 .

Solución paso a paso:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8}{600 \times 10^{-9}} = 5.0 \times 10^{14} \text{ Hz.}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{600 \times 10^{-9}} \approx 1.05 \times 10^7 \text{ rad/m,} \quad \omega = ck \approx 3.14 \times 10^{15} \text{ rad/s.}$$

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{50}{3.00 \times 10^8} \approx 1.67 \times 10^{-7} \text{ T.}$$

(Lo verificamos numéricamente más abajo.)

1.6.2 Ejemplo 2 — Intensidad de un láser

Un haz con $E_0 = 100$ V/m. ¿Cuál es su intensidad media?

$$I = \frac{1}{2}\epsilon_0 c E_0^2 = \frac{1}{2}(8.85 \times 10^{-12})(3.00 \times 10^8)(100)^2 \approx 13.3 \text{ W/m}^2.$$

1.6.3 Ejemplo 3 — De la corriente de desplazamiento al B en un condensador

Un condensador plano de placas circulares (radio R) se carga con corriente I . Entre las placas no hay corriente de conducción, pero sí $I_d = \varepsilon_0 d\Phi_E/dt = I$. Aplicando Ampère–Maxwell a un lazo de radio $r < R$ centrado en el eje:

$$B(2\pi r) = \mu_0 I_d \frac{r^2}{R^2} = \mu_0 I \frac{r^2}{R^2} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2}.$$

El campo magnético entre las placas es **idéntico** al que crearía esa corriente si fuera de conducción: esa es la prueba física de que I_d es real.

1.7 7. Errores típicos (evítalos en el examen)

- **Confundir flujo y circulación.** Gauss usan superficie cerrada ($\oint \vec{F} \cdot d\vec{A}$); Faraday/Ampère usan curva cerrada ($\oint \vec{F} \cdot d\vec{l}$). No mezcles.
 - **Olvidar el término de desplazamiento.** En la ley de Ampère «clásica» falta $\mu_0 \varepsilon_0 d\Phi_E/dt$; sin él no hay ondas.
 - **Creer que B es despreciable porque su número es pequeño.** $B_0 = E_0/c$ es pequeño en teslas, pero su contribución energética $B^2/2\mu_0$ es **igual** a la eléctrica.
 - **Poner $\vec{E}$ y $\vec{B}$ desfasados 90° .** En una onda EM en el vacío están **en fase** (no como en un circuito LC).
 - **Equivocar la dirección de propagación.** Es la de $\vec{E} \times \vec{B}$ (no la de $\vec{B} \times \vec{E}$, que es la opuesta).
 - **Usar $c = \lambda f$ en un medio sin corregir.** En un medio $v = c/n < c$, cambia λ pero **no** f .
 - **Olvidar el factor $\frac{1}{2}$ del promedio** al pasar de S instantáneo a intensidad $I = \langle S \rangle$.
-

1.8 8. Figuras generadas con Python

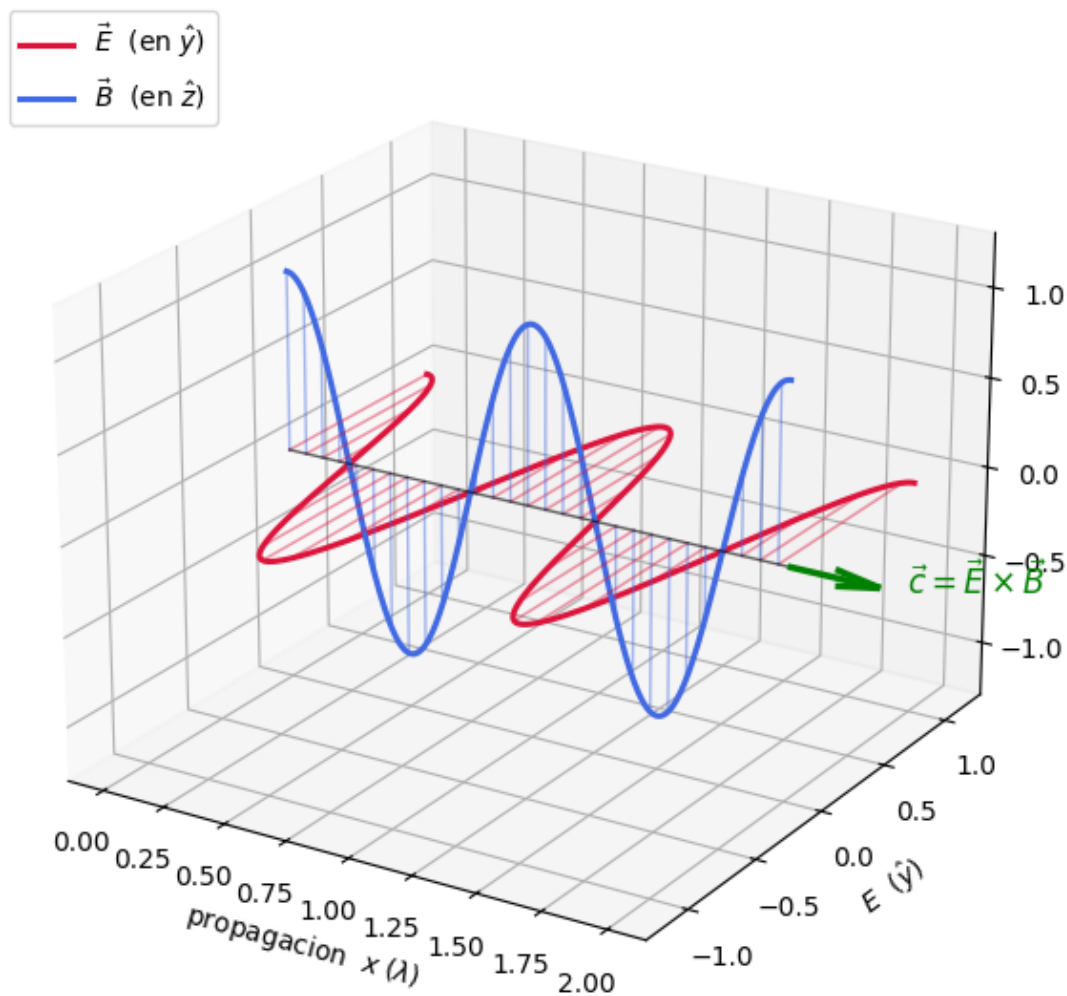
Solo numpy y matplotlib (con mplot3d). Primero las constantes y la comprobación numérica del Ejemplo 1.

```
c = 1/sqrt(mu0*eps0) = 2.9979e+08 m/s (valor exacto ~ 2.9979e8)
f = 4.997e+14 Hz
k = 1.047e+07 rad/m
w = 3.139e+15 rad/s
B0 = E0/c = 1.668e-07 T
Intensidad (E0=100 V/m): I = 13.27 W/m^2
```

1.8.1 Figura 1 — Onda EM plana en 3D: $\vec{E}$, $\vec{B}$ y dirección de propagación

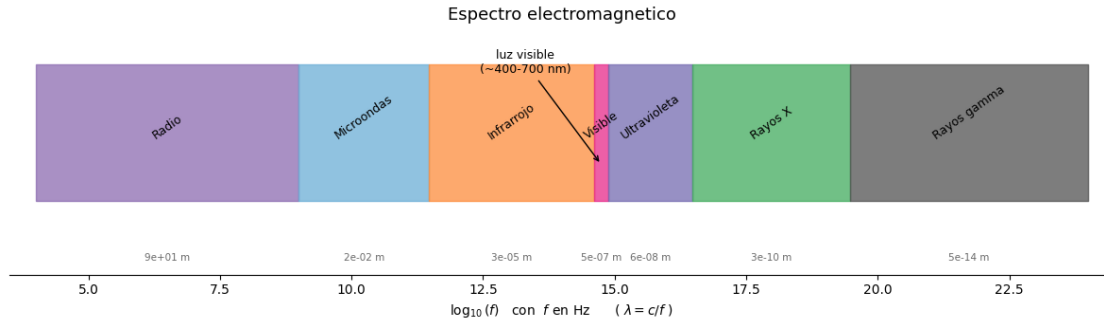
El campo $\vec{E}$ oscila en el plano vertical ($\hat{j}$, eje y), $\vec{B}$ en el plano horizontal ($\hat{k}$, eje z), y la onda se propaga a lo largo de $+x$. Observa que **comparten ceros y máximos** (están en fase) y que son **mutuamente perpendiculares**.

Onda electromagnetica plana: E y B perpendiculares y en fase



1.8.2 Figura 2 — El espectro electromagnético

Todas las ondas EM son la misma física; solo cambia la frecuencia f (y por tanto $\lambda = c/f$). Banda visible resaltada para escala humana.



1.8.3 Figura 3 — E , B y vector de Poynting S en función del tiempo (en un punto fijo)

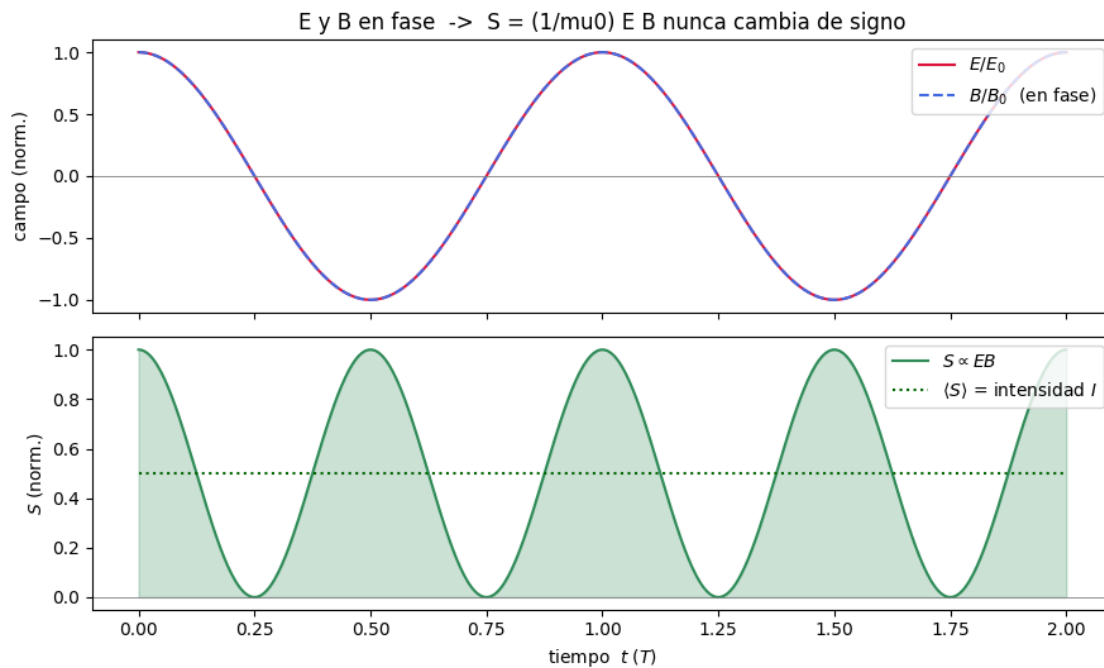
$S = \frac{1}{\mu_0} EB \geq 0$ siempre apunta en la dirección de propagación; su **promedio** es la intensidad.

```
<>:21: SyntaxWarning: invalid escape sequence '\;'
```

```
<>:21: SyntaxWarning: invalid escape sequence '\;'
```

```
/tmp/ipykernel_1226237/2036245925.py:21: SyntaxWarning: invalid escape sequence '\;'
```

```
axes[1].set_xlabel('tiempo $t\;(T)$')
```



Promedio de $E \cdot B$ (factor del $1/2$ del $\cos^2$): 0.501 (teorico 0.5)

1.9 9. Resumen de fórmulas (chuleta)

Magnitud	Fórmula
Velocidad en el vacío	$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \lambda f$
Relación E-B	$E = cB$
Relaciones de onda	$\omega = ck, k = 2\pi/\lambda, \omega = 2\pi f$
Corriente de desplazamiento	$I_d = \varepsilon_0 d\Phi_E/dt$
Densidad de energía	$u = \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{2\mu_0}$
Vector de Poynting	$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$
Intensidad (media)	$I = \frac{1}{2}\varepsilon_0 c E_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}$
Presión de radiación	$P_{rad} = I/c$ (absorción), $2I/c$ (reflexión)

Conexiones: [[09_ondas_electromagneticas]] cierra el Bloque I de electromagnetismo; se apoya en Faraday/Lenz (tema 8) y en la ley de Ampère (tema 7). Ver 00_PLAN_apuntes_fisica_II.md.