Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 2, Otoño · 🧱 Calculadora integrada

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 6 laboratorios. Son los totales reales, no un programa más largo recortado.

Una comprobación es un número o un resultado de código en una página de curso que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número impreso y el recalculado tienen que coincidir.

> Este es el esquema de un curso gratuito de autoestudio escrito por Saving Planets. No es un curso universitario, no otorga créditos académicos y ninguna institución participa.
>
> Su alcance sigue el segundo semestre de física universitaria con cálculo (electricidad y magnetismo, con una primera mirada a la óptica). Se basa en los temas y la profundidad de MIT OpenCourseWare 8.02, Ph1b y Ph1c de Caltech, Georgia Tech PHYS 2212 y el libro gratuito OpenStax University Physics Volume 2, que enlazamos en todo el curso. Ninguno de esos autores o centros respalda esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula con trabajo real de energía limpia u observación de la Tierra con una fuente pública citada (generadores, paneles solares, coches eléctricos, la red eléctrica, el campo magnético terrestre, el clima espacial, sensores satelitales), cada número de la página se recalcula con un script de verificación antes de publicarse, y cada práctica tiene una versión PhET gratuita y una versión casera segura de bajo voltaje.
>
> Síguelo en orden. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas de estudio y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

Casi toda la electricidad limpia es electromagnetismo en acción. Las turbinas eólicas e hidráulicas hacen girar generadores que funcionan con la ley de Faraday, los paneles solares empujan la carga con campos eléctricos internos, los coches eléctricos convierten la corriente en movimiento con fuerzas magnéticas y la red usa transformadores y alto voltaje para transportar energía con pocas pérdidas.

Las ondas electromagnéticas también son nuestra forma de observar el planeta: satélites como Landsat 9 y GOES-19 leen luz visible, infrarroja y de microondas para cartografiar cultivos, bosques, agua y tormentas. Y el propio campo magnético de la Tierra nos protege, mientras que el clima espacial del Sol puede inducir corrientes en las líneas eléctricas. Cada unidad termina con una

breve sección con fuentes. Los valores que no provienen de una fuente se marcan como valores de ejemplo.

Para docentes

Puedes enseñar este curso o dejar que un estudiante lo haga solo. Es gratis. Saving Planets no pone nota ni da crédito escolar.

- Esta página es el curso completo: 10 unidades y 6 laboratorios (PHYS 210 + PHYS 210L).
- Calcula 15 semanas, unas 6 a 9 horas por semana, incluidas las semanas de laboratorio.
- Sigue el calendario de 15 semanas. Lee la unidad, haz la práctica en papel y luego abre la respuesta. En una semana de laboratorio, haz el laboratorio o la versión en casa.
- Una comprobación es un número o un resultado de código en la página que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número que ves y el recalculado tienen que coincidir.
- Usa Imprimir esta página, o descarga la guía de estudio en PDF. La hoja de fórmulas está cerca del final.
- Pregunta: ¿cómo ayuda esta unidad a las personas y al planeta? Cada unidad tiene un recuadro verde con un dato y su fuente.
- Copia la plantilla de guía docente y escribe el nombre de tu clase, el tiempo que tienes y las preguntas que harás. Abrir la plantilla de guía docente

Antes de empezar

Requisitos previos

- Física I: fuerzas, energía, cantidad de movimiento, movimiento circular y oscilaciones.
- Cálculo I y II: derivadas, integrales, y crecimiento y decaimiento exponencial.
- Vectores: componentes, productos escalar y vectorial (se enseñan brevemente cuando hace falta).
- Cálculo III ayuda con las leyes de Gauss y Ampère en forma integral, pero no es obligatorio.

Cómo estudiar

- Dibuja primero el campo o el circuito. La mayoría de los errores de E&M son de signo o de sentido.
- Resuelve primero con símbolos, luego sustituye números en unidades SI y comprueba las unidades del resultado.
- Usa la simetría: antes de aplicar la ley de Gauss o de Ampère, pregúntate hacia dónde debe apuntar el campo y de qué puede depender.
- Resuelve cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta.
- Predice y luego compruébalo en la simulación PhET. Una predicción errónea que corriges se recuerda mejor que un acierto por suerte.
- Repite los cuestionarios unos días después. La práctica espaciada es mejor que una sesión larga.

Qué necesitas

- Una computadora o tableta para las simulaciones PhET gratuitas (funcionan en el navegador).
- Un multímetro digital y unas pilas AA con portapilas (solo bajo voltaje).
- Un pequeño juego de resistencias (100 Ω a 10 kΩ), un condensador electrolítico de 100 µF o más con tensión nominal superior a la de las pilas, cables de puente o una protoboard.
- Un teléfono inteligente con una app de magnetómetro (la mayoría tiene el sensor), una brújula pequeña y algunos imanes de nevera.
- Una caja transparente de vidrio o plástico con agua, un puntero láser de clase 2 o inferior o un haz estrecho de linterna, y un transportador.
- Hoja de cálculo para gráficas y ajustes.

Calendario sugerido de 15 semanas

Unas 6 a 9 horas por semana: lectura, problemas de práctica y, en las semanas de laboratorio, el laboratorio.

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	Carga, ley de Coulomb y campos eléctricos	Carga, ley de Coulomb, superposición	OpenStax UP2 5.1–5.3
2	Carga, ley de Coulomb y campos eléctricos	Campos eléctricos, carga continua, líneas de campo; Práctica A	UP2 5.4–5.6
3	Ley de Gauss	Flujo y ley de Gauss; conductores	UP2 6.1–6.4
4	Potencial eléctrico y capacitancia	Energía potencial, potencial, equipotenciales	UP2 7.1–7.5
5	Potencial eléctrico y capacitancia	Capacitancia, energía, dieléctricos; Práctica B	UP2 8.1–8.4
6	Corriente, resistencia y circuitos de CC	Corriente, resistencia, potencia	UP2 9.1–9.5
7	Corriente, resistencia y circuitos de CC	Circuitos de CC, reglas de Kirchhoff, circuitos RC; Práctica C	UP2 10.1–10.5
8	Campos y fuerzas magnéticas	Fuerza magnética, órbitas de partículas, motores; práctica para el parcial	UP2 11.1–11.5
9	Fuentes de campos magnéticos: Biot–Savart y Ampère	Biot–Savart, ley de Ampère, solenoides; Práctica D	UP2 12.1–12.7
10	Inducción electromagnética: Faraday y Lenz	Leyes de Faraday y Lenz, generadores; Práctica E	UP2 13.1–13.7

Semana	Unidad	Temas	Lectura
11	Inductancia, circuitos RL y LC	Inductancia, circuitos RL y LC	UP2 14.1–14.6
12	Circuitos de CA, transformadores y la red eléctrica	Circuitos de CA, resonancia, potencia, transformadores	UP2 15.1–15.6
13	Ecuaciones de Maxwell, ondas electromagnéticas y óptica	Ecuaciones de Maxwell, ondas EM, energía y espectro	UP2 16.1–16.5
14	Ecuaciones de Maxwell, ondas electromagnéticas y óptica	Óptica: reflexión, refracción, polarización, lentes; Práctica F	UP3 1.1–1.7, 2.4
15	Repaso	Repaso y serie de práctica final	Todas las unidades

Tu progreso

Marca las unidades y los laboratorios al terminarlos y haz los cuestionarios. El progreso y las puntuaciones se guardan solo en este navegador y nunca se nos envían.

Unidades

Carga, ley de Coulomb y campos eléctricos

Carga eléctrica, conductores y aislantes, ley de Coulomb, campo eléctrico de cargas puntuales y de carga continua, líneas de campo y cargas en movimiento en campos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar la ley de Coulomb con vectores y superposición.
- Hallar el campo eléctrico de cargas puntuales y de distribuciones de carga sencillas.
- Dibujar líneas de campo e interpretarlas.
- Hallar la fuerza y la aceleración de una carga en un campo.

Conceptos clave

- La carga tiene dos signos, se conserva y está cuantizada en unidades de e = 1.602 × 10^{-19} C.
- Ley de Coulomb: F = k|q_1q_2|/r^2, a lo largo de la línea entre las cargas; cargas iguales se repelen.
- El campo eléctrico E = F/q es la fuerza por unidad de carga. Una carga puntual produce E = kq/r^2, apuntando hacia fuera de la carga positiva.
- Los campos se suman como vectores (superposición). Para carga continua, se suma dE = k dq/r^2 con una integral.
- Una carga en un campo siente F = qE, así que un electrón se acelera en sentido opuesto a E.

Ecuaciones clave

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

F=k(|q_1q_2|)/(r^2), k=14π_0

Ley de Coulomb

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad E = \frac{k|q|}{r^2}$$

E=(F)/(q), E=(k|q|)/(r^2)

Campo eléctrico de una carga puntual

$$\vec{E} = \int \frac{k\,dq}{r^2}\hat{r}$$

E=(k dq)/(r^2) r

Carga continua

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

F=q E

Fuerza sobre una carga

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Cargas de +3.0 μC y −5.0 μC están separadas 0.20 m. Halla la fuerza entre ellas.

1. $F = k|q_1 q_2|/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times (3.0 \times 10^{-6})(5.0 \times 10^{-6})/0.20^2$.
2. Los signos opuestos se atraen.

Respuesta: 3.37 N, atractiva.

Ejemplo 1.2 Halla el campo a 0.30 m de una carga puntual de 2.0 nC.

1. $E = kq/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times 2.0 \times 10^{-9}/0.09$.

Respuesta: ≈ 200 N/C, apuntando hacia fuera de la carga.

Ejemplo 1.3 Cargas de +4.0 nC y −4.0 nC están separadas 0.10 m. Halla el campo en el punto medio.

1. Cada carga está a 0.05 m y da $E = kq/r^2 = 14380$ N/C.
2. Ambos campos apuntan hacia la carga negativa, así que se suman.

Respuesta: 28760 N/C (2.88×10^4 N/C) hacia la carga negativa.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la fuerza eléctrica entre el protón y el electrón del hidrógeno ($r = 5.29 \times 10^{-11}$ m).

   $F = ke^2/r^2 \approx 8.24 \times 10^{-8}$ N.

2. ¿Cuántas veces es más fuerte la repulsión eléctrica entre dos protones que su atracción gravitatoria?

   $ke^2/(Gm_p^2) \approx 1.23 \times 10^{36}$, independiente de la distancia.

3. Un electrón está en un campo de 200 N/C. Halla la fuerza y la aceleración.

$F = eE = 3.20 \times 10^{-17}$ N; $a = F/m_e \approx 3.52 \times 10^{13}$ m/s², opuesta a E.

4. ¿Dónde es nulo el campo entre +q y +4q separadas una distancia d?

   $kq/x^2 = 4kq/(d - x)^2$ da $x = d/3$ desde +q.

Ideas erróneas comunes

Mito: Una carga mayor siente una fuerza mayor de una menor.

En realidad: Tercera ley de Newton: las fuerzas son iguales y opuestas.

Mito: Las líneas de campo son las trayectorias que siguen las cargas.

En realidad: Muestran la dirección de la fuerza; una carga en movimiento puede salirse de una línea curva.

Mito: El campo es cero dondequiera que no hay carga.

En realidad: El espacio vacío puede tener un campo intenso; allí solo es cero la densidad de carga.

Tarjetas de estudio

Carga elemental

$e = 1.602 \times 10^{-19}$ C.

Ley de Coulomb

$F = k|q_1q_2|/r^2$.

Campo eléctrico

$E = F/q$.

Campo de una carga puntual

$E = kq/r^2$.

Superposición

Los campos de varias cargas se suman como vectores.

Líneas de campo

Empiezan en carga +, terminan en carga −; más densas significa más intenso.

Cuestionario de autoevaluación

1. Duplicar la distancia entre dos cargas cambia la fuerza en...

×2

×½

×¼

×4

×¼. Inverso del cuadrado.

2. El campo de una carga puntual positiva apunta...

hacia ella

alejándose de ella

en círculos

en ningún sitio

alejándose de ella. Dirección de la fuerza sobre una carga de prueba positiva.

3. Un electrón en un campo que apunta al este se acelera hacia el...

este

oeste

norte

nada

oeste. F = qE con q < 0.

4. La unidad SI del campo eléctrico es...

N/C

C/N

J

T

N/C. Fuerza por carga (también V/m).

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Una celda solar funciona porque la luz solar libera cargas que luego un campo eléctrico interno separa. El Departamento de Energía de EE. UU. explica que la luz absorbida en una celda FV crea cargas eléctricas que se mueven en respuesta a un campo eléctrico interno, de modo que fluye electricidad. Cada panel solar es una lámina de campos eléctricos cuidadosamente diseñados.

En Saving Planets: Física I

Fuentes: U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 5.4 Electric field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-4-electric-field): Campos y superposición.
- OpenStax UP2, 5.5 Fields of charge distributions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-5-calculating-electric-fields-of-charge-distributions): Integrales para E.
- PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law): Interactivo.

Ver la clase

Electric Fields (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-2) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Ley de Gauss

Flujo eléctrico, ley de Gauss y uso de la simetría para hallar campos de esferas, líneas y láminas; conductores en equilibrio electrostático.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el flujo eléctrico a través de una superficie.
- Enunciar la ley de Gauss y elegir una superficie gaussiana acorde con la simetría.
- Hallar campos de cargas esféricas, cilíndricas y planas.
- Explicar por qué el campo dentro de un conductor es cero y la carga queda en su superficie.

Conceptos clave

- El flujo Φ = ∮E·dA cuenta las líneas de campo que atraviesan una superficie.
- Ley de Gauss: el flujo neto que sale de cualquier superficie cerrada es igual a la carga encerrada dividida entre ε_0.
- La ley de Gauss siempre es cierta, pero solo es útil cuando la simetría hace E constante sobre la superficie: esferas, líneas largas, láminas grandes.
- Fuera de una esfera con carga uniforme, el campo es el mismo que el de una carga puntual en el centro.
- En un conductor en equilibrio E = 0 en su interior, la carga sobrante queda en la superficie y E justo fuera es perpendicular a la superficie.

Ecuaciones clave

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\varepsilon_0}$$

_E= E· d A=_enc_0

Ley de Gauss

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

E=()/(2π_0 r)

Línea de carga larga

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

E=(σ)/(2_0)

Lámina de carga grande

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Justo fuera de un conductor

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 Una superficie cerrada rodea una carga de 1.0 nC. Halla el flujo neto.

1. $\Phi = Q/\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-9}/8.854 \times 10^{-12}$; la forma no importa.

Respuesta: ≈ 113 N·m²/C.

Ejemplo 2.2 Un cable largo lleva 2.0 nC por metro. Halla E a 0.10 m.

1. Usa un cilindro: $E(2\pi rL) = \lambda L/\varepsilon_0$, así que $E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r) = 2k\lambda/r$.
2. $E = 2 \times 8.988 \times 10^{9} \times 2.0 \times 10^{-9}/0.10$.

Respuesta: ≈ 360 N/C, apuntando radialmente hacia fuera.

Ejemplo 2.3 Una lámina grande tiene $\sigma = 5.0\ \mu C/m^2$. Halla E cerca de ella.

1. Una caja cilíndrica que atraviesa la lámina: $2EA = \sigma A/\varepsilon_0$.

Respuesta: $E = \sigma/(2\varepsilon_0) \approx 2.82 \times 10^{5}$ N/C, igual a cualquier distancia cerca de la lámina.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una carga de 1.0 μC está en una esfera metálica de 0.10 m. Halla E a 0.50 m del centro y a 0.05 m.

   Fuera: $kQ/r^2 = 3.60 \times 10^{4}$ N/C. Dentro del conductor: 0.

2. ¿Por qué un coche te protege de los rayos?

   La carga se queda en la superficie metálica exterior, así que el campo interior es pequeño (una jaula de Faraday).

3. Un cubo rodea un dipolo. ¿Cuál es el flujo neto?

Cero: la carga encerrada es cero.

4. ¿Cómo disminuye con la distancia el E de una línea de carga?

   Como 1/r, más despacio que el $1/r^2$ de una carga puntual.

Ideas erróneas comunes

Mito: Flujo cero significa campo cero en toda la superficie.

En realidad: Solo el total es cero; el campo puede entrar por un lado y salir por otro.

Mito: La ley de Gauss solo funciona con cargas simétricas.

En realidad: Siempre se cumple; la simetría es lo que la hace fácil de usar.

Mito: Las cargas fuera de la superficie cambian el flujo.

En realidad: Cambian E en la superficie pero aportan flujo neto cero.

Tarjetas de estudio

Flujo eléctrico

$\Phi = \oint E \cdot dA$.

Ley de Gauss

$\Phi = Q_{enc}/\varepsilon_0$.

Línea de carga

$E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r)$.

Lámina de carga

$E = \sigma/(2\varepsilon_0)$.

Conductor

E = 0 dentro; carga en la superficie.

Jaula de Faraday

Un conductor cerrado protege su interior.

Cuestionario de autoevaluación

1. El flujo neto a través de una superficie cerrada depende de...

su forma

la carga encerrada

su área

las cargas exteriores

la carga encerrada. Q_{enc}/ε_0.

2. Dentro de un conductor en equilibrio, E es...

máximo

cero

kQ/r^2

σ/ε_0

cero. Las cargas libres se reordenan hasta que E = 0.

3. El E cerca de una lámina cargada grande varía con la distancia como...

$1/r^2$

$1/r$

constante

r

constante. $\sigma/(2\varepsilon_0)$.

4. La mejor superficie gaussiana para un cable largo es un...

esfera

cubo

cilindro coaxial

disco plano

cilindro coaxial. Coincide con la simetría.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La ley de Gauss tiene un gemelo magnético: el flujo magnético neto a través de cualquier superficie cerrada es cero, porque no existen monopolos magnéticos. El campo de la Tierra es un buen ejemplo. Los National Centers for Environmental Information de la NOAA indican que más del 90% del campo medido en la superficie se genera en el núcleo externo de la Tierra. Cada línea de campo que sale del planeta vuelve a él.

En Saving Planets: Clima espacial

Fuentes: NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 6.2 Explaining Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-2-explaining-gausss-law): El flujo y la ley.
- OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law): Esferas, líneas, láminas.
- OpenStax UP2, 6.4 Conductors in equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-4-conductors-in-electrostatic-equilibrium): Conductores.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Clases y series de problemas.

Ver la clase

Gauss's Law I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-3) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Potencial eléctrico y capacitancia

Energía potencial y potencial, equipotenciales, hallar E a partir de V, condensadores en serie y en paralelo, energía almacenada y dieléctricos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el potencial y la energía potencial de cargas puntuales.
- Relacionar E y V: E = −dV/dx.
- Hallar la capacitancia y combinar condensadores.
- Calcular la energía almacenada y el efecto de un dieléctrico.

Conceptos clave

- El potencial V es la energía potencial por carga (voltios = julios por culombio). Solo importan las diferencias.
- Una carga puntual da V = kq/r; los potenciales se suman como números, no como vectores.
- El campo apunta cuesta abajo en el potencial: E = −dV/dx. Las equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo.
- Un condensador almacena carga Q = CV. Un condensador de placas paralelas tiene C = $\varepsilon_0 A/d$.
- Energía almacenada U = ½CV². Un dieléctrico de constante κ multiplica C por κ.
- Los condensadores en paralelo se suman; en serie se suman los inversos.

Ecuaciones clave

$$V = \frac{kq}{r}, \quad \Delta U = q\,\Delta V$$

V=kq/r, Δ U=q Δ V

Potencial de una carga puntual

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

E_x=-dV/dx

Campo a partir del potencial

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa \varepsilon_0 A}{d}$$

C=Q/V=(_0A)/(d)

Condensador de placas paralelas

$$U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

U=12CV^2

Energía almacenada

$$C_{\parallel} = C_1 + C_2, \quad \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_=C_1+C_2, 1C_s=1C_1+1C_2

Combinaciones

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Halla el potencial a 0.30 m de una carga de 2.0 nC.

1. V = kq/r = 8.988 × 10⁹ × 2.0 × 10⁻⁹/0.30.

Respuesta: ≈ 59.9 V.

Ejemplo 3.2 Un electrón parte del reposo y atraviesa una diferencia de potencial de 100 V. Halla su velocidad.

1. eΔV = ½mv².
2. v = √(2 × 1.602 × 10⁻¹⁹ × 100/9.109 × 10⁻³¹).

Respuesta: ≈ 5.93 × 10⁶ m/s.

Ejemplo 3.3 Placas de 0.010 m² separadas 1.0 mm se conectan a 12 V. Halla C, Q y U.

1. C = ε_0A/d = 8.854 × 10⁻¹² × 0.010/0.001 = 88.5 pF.
2. Q = CV = 1.06 nC.
3. U = ½CV² = 6.37 nJ.

Respuesta: 88.5 pF, 1.06 nC, 6.37 nJ.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Combina 2 μF y 3 μF en serie y en paralelo.

   Serie 1.2 μF; paralelo 5 μF.

2. Llena el condensador de 88.5 pF con un dieléctrico de $\kappa = 3.4$.

   $C = 301$ pF.

3. Un supercondensador grande de 3000 F se carga a 2.7 V (valores de ejemplo). ¿Cuánta energía almacena?

   $U = \frac{1}{2}CV^2 \approx 10.9$ kJ, una fracción mínima de una batería de VE, pero entregada en segundos.

4. $V = 4x^2$ voltios. Halla E en $x = 2$ m.

   $E = -dV/dx = -16$ V/m (apuntando hacia $-x$).

Ideas erróneas comunes

Mito: El potencial y la energía potencial son lo mismo.

En realidad: $U = qV$; V es por unidad de carga.

Mito: El alto voltaje por sí solo es lo que hace peligrosa una descarga.

En realidad: Importa la corriente por el cuerpo; el voltaje la impulsa a través de la resistencia del cuerpo.

Mito: Donde $V = 0$, $E = 0$.

En realidad: A mitad de camino entre $+q$ y $-q$, $V = 0$ pero E es grande.

Tarjetas de estudio

Potencial eléctrico

$V = U/q$, en voltios.

Potencial de carga puntual

$V = kq/r$.

Campo a partir del potencial

$E = -dV/dx$.

Capacitancia

$C = Q/V$; faradios.

Placas paralelas

$C = \kappa\varepsilon_0 A/d$.

Energía del condensador

$U = \frac{1}{2}CV^2$.

Electronvoltio

1 eV = 1.602×10^{-19} J.

Cuestionario de autoevaluación

1. 1 voltio equivale a...

1 J/C

1 C/J

1 N/C

1 W/A^2

1 J/C. Energía por carga.

2. Reducir a la mitad la separación de las placas hace que C sea...

la mitad

el doble

cuatro veces mayor

igual

el doble. $C = \varepsilon_0 A/d$.

3. Duplicar el voltaje de un condensador multiplica la energía almacenada por...

2

4

½

1

4. $U \propto V^2$.

4. Las líneas equipotenciales cortan las líneas de campo a...

0°

45°

90°

cualquier ángulo

90°. No hay trabajo a lo largo de una equipotencial.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los coches eléctricos almacenan energía en baterías, no en condensadores, porque un condensador guarda mucha menos energía por kilogramo. El supercondensador del ejercicio guarda unos 10.9 kJ, unos 3.04 vatios-hora. Los condensadores son útiles donde la potencia debe entrar o salir en segundos, como para suavizar la salida de la electrónica de potencia en VE, inversores solares y aerogeneradores.

En Saving Planets: Física I

Fuentes: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP2, 8.3 Energy stored in a capacitor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-3-energy-stored-in-a-capacitor)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 7.2 Electric potential and potential difference (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-2-electric-potential-and-potential-difference): Potencial.
- OpenStax UP2, 7.3 Calculations of electric potential (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-3-calculations-of-electric-potential): Potencial de distribuciones de carga.
- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Condensadores.
- OpenStax UP2, 8.4 Capacitor with a dielectric (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-4-capacitor-with-a-dielectric): Dieléctricos.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interactivo.

Ver la clase

The Electric Potential and Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-5) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

Corriente, resistencia y circuitos de CC

Corriente y velocidad de deriva, resistividad y ley de Ohm, potencia, fem y resistencia interna, resistencias en serie y en paralelo, reglas de Kirchhoff y circuitos RC.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Relacionar la corriente con la velocidad de deriva y la resistencia con la resistividad.
- Usar la ley de Ohm y P = IV.
- Reducir redes serie-paralelo y aplicar las reglas de Kirchhoff.
- Analizar la carga y descarga de circuitos RC.

Conceptos clave

- Corriente I = dQ/dt; en un cable I = nqv_dA, y la velocidad de deriva es diminuta aunque las señales viajan casi a la velocidad de la luz.
- Resistencia R = ρL/A. La ley de Ohm V = IR se cumple en materiales óhmicos.
- Potencia P = IV = I²R = V²/R.
- Las resistencias en serie se suman; en paralelo se suman los inversos.
- Kirchhoff: las corrientes que entran en un nodo suman cero; los cambios de voltaje alrededor de cualquier malla suman cero.
- Un circuito RC se carga como V = V_0(1 − e^(−t/RC)); la constante de tiempo es τ = RC.

Ecuaciones clave

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqv_d A$$

`I=dQ/dt=nqv_dA`

Corriente y velocidad de deriva

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad V = IR$$

`R=ρL/A, V=IR`

Resistencia y ley de Ohm

$$P = IV = I^2 R$$

`P=IV=I^2R`

Potencia eléctrica

$$\sum I = 0, \quad \sum \Delta V = 0$$

`I=0, Δ V=0`

Reglas de Kirchhoff

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`V_C=V_0(1-e^-t/RC)`

Condensador en carga

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Halla la resistencia de 100 m de cable de cobre de 1.0 mm de diámetro ($\rho = 1.68 \times 10^{-8}$ Ω·m).

1. $A = \pi(0.5 \times 10^{-3})^2 = 7.85 \times 10^{-7}$ m².
2. $R = \rho L/A = 1.68 \times 10^{-8} \times 100/7.85 \times 10^{-7}$.

Respuesta: ≈ 2.14 Ω.

Ejemplo 4.2 Dos baterías (12 V y 6 V) y tres resistencias: la malla 1 tiene 12 V, R_1 = 2 Ω y la R_3 = 6 Ω compartida; la malla 2 tiene 6 V, R_2 = 3 Ω y R_3. Halla las corrientes.

1. Nodo: $I_3 = I_1 + I_2$.
2. Malla 1: $12 = 2I_1 + 6I_3$. Malla 2: $6 = 3I_2 + 6I_3$.
3. Resolviendo: I_1 = 2 A, I_2 = −0.667 A, I_3 = 1.33 A.

Respuesta: I_1 = 2 A; I_2 = −0.667 A (el signo menos significa que la batería de 12 V empuja corriente hacia atrás por la de 6 V y la carga); I_3 = 1.33 A.

Ejemplo 4.3 Un condensador de 100 µF se carga con una batería de 9 V a través de 10 kΩ. Halla τ y el voltaje tras 1 s y 3 s.

1. $\tau = RC = 10^4 \times 10^{-4} = 1.0$ s.
2. V(1) = 9(1 − e^(−1)); V(3) = 9(1 − e^(−3)).

Respuesta: 1.0 s; 5.69 V; 8.55 V.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una bombilla de 60 W funciona a 120 V. Halla su corriente y su resistencia.

   I = 0.5 A; R = 240 Ω.

2. Halla el equivalente de 6 Ω y 3 Ω en paralelo, y luego la corriente de 12 V a través de ese par en serie con 4 Ω.

   2 Ω; I = 12/6 = 2 A.

3. Halla la velocidad de deriva para 1 A en el cable de cobre de 1.0 mm ($n = 8.5 \times 10^{28}$ m^{-3}).

   $v_d = I/(neA) \approx 9.4 \times 10^{-5}$ m/s, alrededor de un tercio de metro por hora.

4. Un panel solar tiene 60 celdas en serie, cada una de 0.6 V (valores de ejemplo). ¿Cuál es el voltaje del panel? ¿Cómo duplicarías la corriente en su lugar?

   36 V; pon dos paneles en paralelo.

Ideas erróneas comunes

Mito: La corriente se gasta en una resistencia.

En realidad: La carga se conserva; se convierte la energía, no la corriente.

Mito: Los electrones recorren los cables casi a la velocidad de la luz.

En realidad: La señal sí; los electrones derivan a fracciones de milímetro por segundo.

Mito: Una batería suministra corriente constante.

En realidad: Suministra una fem aproximadamente constante; la corriente depende del circuito.

Tarjetas de estudio

Corriente

$I = dQ/dt$; amperios.

Ley de Ohm

$V = IR$.

Resistividad

$R = \rho L/A$.

Potencia

$P = IV = I^2R = V^2/R$.

Regla de los nodos

Regla de las mallas

$\Sigma I = 0$.

$\Sigma \Delta V = 0$.

Constante de tiempo RC

$\tau = RC$.

Cuestionario de autoevaluación

1. Duplicar la longitud de un cable duplica su...

resistividad

resistencia

corriente

sección

resistencia. $R = \rho L/A$.

2. Dos resistencias iguales R en paralelo dan...

2R

R

R/2

R^2

R/2. $1/R + 1/R$.

3. Tras una constante de tiempo, un condensador en carga está al...

37%

50%

63%

100%

63%. 1 − e^(−1).

4. La regla de las mallas de Kirchhoff proviene de la conservación de...

la carga

la energía

la cantidad de movimiento

la masa

la energía. El potencial es energía por carga.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Un panel solar es un circuito de CC. Las celdas se conectan en serie para subir el voltaje y los paneles en paralelo para subir la corriente, exactamente como en los ejercicios. Una celda empuja la carga en un solo sentido, así que la salida de un panel es corriente continua; debe convertirse en corriente alterna antes de unirse a la red (unidad 9). El Departamento de Energía de EE. UU. explica cómo funcionan las propias celdas.

En Saving Planets: Observación de la Tierra

Fuentes: U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 9.1 Electrical current (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-1-electrical-current): Corriente.
- OpenStax UP2, 9.3 Resistivity and resistance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-3-resistivity-and-resistance): Resistencia.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Combinaciones.
- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Circuitos RC.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interactivo.

☐ **Terminé esta unidad**

Campos y fuerzas magnéticas

La fuerza magnética sobre cargas en movimiento y corrientes, el movimiento circular de partículas cargadas, el par sobre una espira de corriente y cómo funcionan los motores eléctricos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar F = qv × B con la regla de la mano derecha.
- Hallar el radio y la frecuencia de la órbita circular de una partícula cargada.
- Hallar la fuerza sobre un cable con corriente y el par sobre una espira.
- Explicar cómo un motor de CC convierte la corriente en rotación.

Conceptos clave

- Un campo magnético empuja a la carga en movimiento: F = qv × B, perpendicular a v y a B. No realiza trabajo, así que cambia la dirección, no la rapidez.
- Una carga que cruza un campo uniforme describe un círculo de radio r = mv/(|q|B) con frecuencia ciclotrón f = |q|B/(2πm), independiente de la velocidad.
- Un cable con corriente I en un campo B siente F = IL × B.
- Una espira de corriente tiene momento magnético μ = NIA y siente un par τ = μB sin θ. Ese par es lo que hace girar un motor eléctrico.
- Campos E y B cruzados solo dejan pasar partículas con v = E/B (un selector de velocidades).

Ecuaciones clave

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

`F=q v× B`

Fuerza magnética sobre una carga

$$r = \frac{mv}{|q|B}, \quad f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

`r=(mv)/(|q|B), f=(|q|B)/(2π m)`

Movimiento circular en un campo

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

`F=I L× B`

Fuerza sobre una corriente

$$\tau = NIAB\sin\theta$$

τ=NIABθ

Par sobre una espira

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Un protón del viento solar se mueve a 400 km/s perpendicular a un campo de 50 μT (valores de ejemplo). Halla el radio de su círculo.

1. r = mv/(eB) = 1.673 × 10⁻²⁷ × 4 × 10⁵/(1.602 × 10⁻¹⁹ × 5 × 10⁻⁵).

Respuesta: ≈ 83.5 m. Las partículas cargadas giran en espiral cerrada a lo largo de las líneas de campo en lugar de cruzarlas.

Ejemplo 5.2 Un cable de 0.20 m con 200 A está perpendicular a un campo de 0.50 T. Halla la fuerza.

1. F = ILB = 200 × 0.20 × 0.50.

Respuesta: 20 N.

Ejemplo 5.3 Una bobina de motor tiene 100 vueltas de área 0.01 m² con 2 A en un campo de 0.5 T. Halla el par máximo.

1. τ = NIAB = 100 × 2 × 0.01 × 0.5.

Respuesta: 1.0 N·m, cuando el plano de la bobina es paralelo al campo.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la frecuencia ciclotrón de un protón en un campo de 1 T.

   f = eB/(2πm$_p$) ≈ 15.2 MHz.

2. Un electrón se mueve a 1 × 10⁵ m/s a través de un campo de 50 μT. Halla r.

   r = m$_e$v/(eB) ≈ 1.14 cm.

3. ¿Qué velocidad pasa sin desviarse por $E = 10^4$ V/m y $B = 0.1$ T?

   $v = E/B = 10^5$ m/s.

4. ¿Puede un campo magnético estático acelerar una carga?

   No: $F \perp v$, así que no realiza trabajo.

Ideas erróneas comunes

Mito: La fuerza magnética apunta a lo largo del campo.

En realidad: Es perpendicular a B y a v.

Mito: Una carga en reposo siente una fuerza magnética.

En realidad: Solo la sienten las cargas en movimiento.

Mito: Mayor velocidad significa mayor frecuencia ciclotrón.

En realidad: El radio crece con la velocidad, pero la frecuencia no.

Tarjetas de estudio

Fuerza de Lorentz

$F = q(E + v \times B)$.

Regla de la mano derecha

Dedos según v, curvarlos hacia B, el pulgar da F para q positiva.

Radio ciclotrón

$r = mv/(qB)$.

Fuerza sobre un cable

$F = ILB \sin \theta$.

Momento magnético

$\mu = NIA$.

Par del motor

$\tau = NIAB \sin \theta$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La fuerza magnética sobre una carga que se mueve paralela a B es...

máximo

cero

qvB

qE

cero. sin 0 = 0.

2. La unidad SI del campo magnético es el…

gauss

tesla

weber

henrio

tesla. 1 T = 1 N/(A·m); 1 G = 10^{-4} T.

3. Duplicar la velocidad de una partícula cargada en un B uniforme cambia su radio en…

×½

×1

×2

×4

×2. r = mv/(qB).

4. El par sobre una bobina de motor es máximo cuando su plano es…

perpendicular a B

paralelo a B

a 30°

cualquier ángulo

paralelo a B. μ es entonces perpendicular a B.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los coches eléctricos funcionan con par magnético: la corriente en las bobinas del motor está en un campo magnético, y $\tau = NIAB \sin\theta$ hace girar las ruedas. FuelEconomy.gov indica que los VE convierten más del 77% de la energía eléctrica de la red en potencia en las ruedas, mientras que los coches de gasolina solo convierten entre el 12% y el 30% de la energía de su combustible.

El campo terrestre, de entre 25 y 65 μT en la superficie según la NOAA, curva las partículas cargadas del viento solar en espirales cerradas, como en el primer ejemplo resuelto. Las partículas atrapadas así son guiadas a lo largo de las líneas de campo hacia los polos, donde encienden las auroras.

En Saving Planets: Clima espacial

Fuentes: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 11.3 Motion of a charged particle in a magnetic field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-3-motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field): Movimiento circular.
- OpenStax UP2, 11.4 Magnetic force on a current-carrying conductor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-4-magnetic-force-on-a-current-carrying-conductor): Fuerza sobre cables.
- OpenStax UP2, 11.5 Force and torque on a current loop (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-5-force-and-torque-on-a-current-loop): Motores.
- PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets): Interactivo.

☐ **Terminé esta unidad**

Fuentes de campos magnéticos: Biot–Savart y Ampère

Cómo las corrientes crean campos magnéticos: la ley de Biot–Savart, campos de cables, espiras y solenoides, fuerzas entre corrientes paralelas y la ley de Ampère.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar la ley de Biot–Savart para un cable y una espira.
- Aplicar la ley de Ampère a cables y solenoides.
- Hallar la fuerza entre corrientes paralelas.
- Comparar campos artificiales con el campo terrestre.

Conceptos clave

- Biot–Savart: cada elemento de corriente I dl produce dB = (μ₀/4π) I dl × r̂/r². Las líneas de campo rodean la corriente (regla de la mano derecha: pulgar según I, los dedos se curvan con B).
- Un cable recto largo: B = μ₀I/(2πr). En el centro de una espira de radio R: B = μ₀I/(2R).
- Ley de Ampère: ∮B·dl = μ₀I_enc. Como la ley de Gauss, es más fácil con simetría.
- Dentro de un solenoide largo B = μ₀nI, uniforme, donde n es el número de vueltas por metro.
- Las corrientes paralelas se atraen; las opuestas se repelen, con fuerza por longitud μ₀I₁I₂/(2πd).

Ecuaciones clave

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\vec{l}\times\hat{r}}{r^2}$$

`d B=(μ_0)/(4π)(I d l× r)/(r^2)`

Ley de Biot–Savart

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

`B=(μ_0I)/(2π r)`

Cable recto largo

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

`B· d l=μ_0I_enc`

Ley de Ampère

$$B = \mu_0 n I$$

B=μ_0nI

Solenoide largo

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

FL=(μ_0I_1I_2)/(2π d)

Cables paralelos

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 Una línea de transmisión lleva 1000 A (valor de ejemplo). Halla B a 20 m y compáralo con el campo terrestre.

1. B = $\mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000/(2\pi \times 20)$.

Respuesta: 10 μT, menos que el campo superficial terrestre de 25–65 μT.

Ejemplo 6.2 Un solenoide tiene 1000 vueltas por metro y lleva 2 A. Halla B en su interior.

1. B = $\mu_0 nI = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000 \times 2$.

Respuesta: ≈ 2.51 mT, unas 50 veces el campo terrestre.

Ejemplo 6.3 Dos cables paralelos separados 1 cm llevan cada uno 10 A en el mismo sentido. Halla la fuerza por metro.

1. F/L = $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 4\pi \times 10^{-7} \times 100/(2\pi \times 0.01)$.

Respuesta: 2.0 mN/m, atractiva.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla B en el centro de una espira de 5 cm de radio con 5 A.

   B = $\mu_0 I/(2R) \approx 62.8$ μT.

2. Un cable lleva 2 A. Halla B a 1, 2 y 4 cm.

   40, 20 y 10 μT: se reduce a la mitad cada vez que se duplica la distancia.

3. Usa la ley de Ampère para hallar B dentro de un cable grueso de radio a en r < a (corriente uniforme).

   $B(2\pi r) = \mu_0 I\, r^2/a^2$, así que $B = \mu_0 I r/(2\pi a^2)$, que crece linealmente desde el centro.

4. ¿Cuánto vale B fuera de un toroide ideal?

   Cero: el lazo no encierra corriente neta.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las líneas de campo magnético empiezan y terminan en polos.
En realidad: Forman lazos cerrados; no hay monopolos.

Mito: La ley de Ampère da B para cualquier corriente.
En realidad: Siempre se cumple, pero solo da B directamente con simetría.

Mito: El campo de un cable apunta a lo largo del cable.
En realidad: Rodea el cable.

Tarjetas de estudio

Biot–Savart

$dB = (\mu_0/4\pi)\, I\, dl \times \hat{r}/r^2$.

Campo de un cable

$B = \mu_0 I/(2\pi r)$.

Centro de una espira

$B = \mu_0 I/(2R)$.

Ley de Ampère

$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_enc$.

Solenoide

$B = \mu_0 nI$.

Corrientes paralelas

Mismo sentido: se atraen.

Cuestionario de autoevaluación

1. El B de un cable largo disminuye con la distancia como...

$1/r^2$

1/r

constante

r

1/r. $\mu_0 I/(2\pi r)$.

2. Dentro de un solenoide largo, B depende de…

el radio

las vueltas por metro y la corriente

solo la longitud

la distancia al eje

las vueltas por metro y la corriente. $B = \mu_0 nI$.

3. Dos cables con corrientes en sentidos opuestos…

se atraen

se repelen

no sienten fuerza

se retuercen

se repelen. Las corrientes opuestas se repelen.

4. μ_0 vale aproximadamente…

8.85×10^{-12}

1.26×10^{-6}

9×10^{9}

3×10^{8}

1.26×10^{-6}. $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El propio campo de la Tierra lo generan corrientes: la NOAA explica que más del 90% se genera en el núcleo externo mediante lo que llama la dinamo interna de la Tierra: material conductor en movimiento que transporta corriente. La ley de Biot–Savart es el puente entre esas corrientes y el campo que lee una brújula. El World Magnetic Model de la NOAA describe este campo principal.

En Saving Planets: Clima espacial

Fuentes: NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law): Biot–Savart.
- OpenStax UP2, 12.5 Ampère's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-5-amperes-law): Ley de Ampère.
- PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass): Interactivo.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Clases y series de problemas.

☐ **Terminé esta unidad**

Inducción electromagnética: Faraday y Lenz

Flujo magnético, ley de Faraday, ley de Lenz, fem de movimiento, campos eléctricos inducidos, corrientes de Foucault y los generadores de la energía eólica e hidráulica.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el flujo magnético y la fem de un flujo variable.
- Usar la ley de Lenz para hallar el sentido de la corriente inducida.
- Hallar la fem de movimiento de una barra en movimiento.
- Calcular la salida de un generador de CA y la potencia de una central hidroeléctrica.

Conceptos clave

- Flujo magnético Φ_B = ∫B·dA, en webers.
- Ley de Faraday: un flujo variable a través de una bobina de N vueltas induce una fem ε = −N dΦ_B/dt.
- Ley de Lenz (el signo menos): la corriente inducida se opone al cambio de flujo que la causó, lo cual es conservación de la energía.
- Una barra de longitud L que se mueve a v a través de B tiene una fem de movimiento ε = BLv.
- Una bobina que gira a velocidad angular ω en B da ε = NBAω sin ωt: corriente alterna. Hacerla girar requiere trabajo mecánico, y así es como los generadores convierten movimiento en energía eléctrica.

Ecuaciones clave

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

_B= B· d A

Flujo magnético

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

=-N(d_B)/(dt)

Ley de Faraday

$$\varepsilon = BLv$$

=BLv

Fem de movimiento

$$\varepsilon(t) = NBA\omega \sin \omega t$$

(t)=NBAωω t

Generador de CA

$$P = \eta \rho g Q h$$

P=ρ gQh

Energía hidroeléctrica

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 La bobina de un generador tiene 100 vueltas de área 0.04 m² y gira a 60 rev/s en un campo de 0.5 T. Halla la fem pico.

1. ω = 2π × 60 = 377 rad/s.
2. ε_max = NBAω = 100 × 0.5 × 0.04 × 377.

Respuesta: ≈ 754 V.

Ejemplo 7.2 Una bobina de 200 vueltas de área 0.01 m² ve subir B de 0 a 0.3 T en 0.5 s. Halla la fem media.

1. ΔΦ = BA = 0.003 Wb por vuelta.
2. ε = NΔΦ/Δt = 200 × 0.003/0.5.

Respuesta: 1.2 V.

Ejemplo 7.3 Una central hidroeléctrica turbina 100 m³/s con un salto de 50 m y una eficiencia del 90% (valores de ejemplo). Halla su potencia.

1. P = ηρgQh = 0.9 × 1,000 × 9.81 × 100 × 50.

Respuesta: ≈ 44.1 MW.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una barra de 0.2 m se mueve a 3 m/s a través de un campo de 0.5 T. Halla la fem.

   BLv = 0.3 V.

2. El polo norte de un imán se acerca a una espira. ¿En qué sentido circula la corriente inducida, visto desde el imán?

   Antihorario, creando una cara norte que repele al imán que se acerca.

3. ¿Por qué cuesta más girar un generador cuando se encienden lámparas?

   La corriente en la bobina siente un par magnético que se opone al movimiento (Lenz); de ahí sale la energía eléctrica.

4. Duplicar la velocidad de giro de un generador cambia su fem pico en…?

   ×2: ε_max = NBAω.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un campo intenso pero constante induce corriente.
En realidad: Solo un flujo variable induce fem.

Mito: La ley de Lenz se opone al campo.
En realidad: Se opone al cambio de flujo.

Mito: Los generadores crean energía.
En realidad: Convierten trabajo mecánico en energía eléctrica.

Tarjetas de estudio

Flujo magnético

$\Phi = BA\cos\theta$; webers.

Ley de Faraday

$\varepsilon = -N\, d\Phi/dt$.

Ley de Lenz

La corriente inducida se opone al cambio.

Fem de movimiento

$\varepsilon = BLv$.

Generador

$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t$.

Corrientes de Foucault

Lazos inducidos en metal macizo; se usan para frenar.

Cuestionario de autoevaluación

1. La ley de Faraday relaciona la fem con...

el flujo

la tasa de cambio del flujo

corriente

resistencia

la tasa de cambio del flujo. $\varepsilon = -N\, d\Phi/dt$.

2. El signo menos en la ley de Faraday es...

Ley de Ohm

Ley de Lenz

Ley de Gauss

solo una convención

Ley de Lenz. Se opone al cambio.

3. Una bobina que gira en un campo constante produce...

DC

AC

ninguna fem

carga estática

AC. $\varepsilon \propto \sin \omega t$.

4. La unidad SI del flujo magnético es el...

tesla

weber

henrio

faradio

weber. 1 Wb = 1 T·m².

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La energía eólica e hidráulica es la ley de Faraday. El Departamento de Energía de EE. UU. explica que el viento hace girar las palas de una turbina alrededor de un rotor, que mueve un generador que produce electricidad, y que las centrales hidroeléctricas usan turbinas y generadores para convertir la energía cinética del agua en movimiento en electricidad para la red.

En Saving Planets: Física I

Fuentes: DOE de EE. UU.: ¿cómo funcionan los aerogeneradores? (en inglés) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 13.1 Faraday's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-1-faradays-law): Faraday.
- OpenStax UP2, 13.2 Lenz's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-2-lenzs-law): Lenz.
- OpenStax UP2, 13.3 Motional EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-3-motional-emf): Conductores en movimiento.
- OpenStax UP2, 13.6 Electric generators and back EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-6-electric-generators-and-back-emf): Generadores.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): Interactivo.

Ver la clase

Lenz's and Faraday's Laws (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-11) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

Terminé esta unidad

Inductancia, circuitos RL y LC

Inductancia mutua y autoinductancia, energía almacenada en campos magnéticos, circuitos RL y su constante de tiempo, y oscilaciones LC.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Hallar la autoinductancia de un solenoide y la fem de un inductor.
- Analizar el crecimiento y el decaimiento de la corriente en circuitos RL.
- Calcular la energía de un inductor y la densidad de energía magnética.
- Hallar la frecuencia de un oscilador LC.

Conceptos clave

- Una corriente variable en una bobina induce fem en otra: $\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$ (inductancia mutua).
- Una bobina se opone a los cambios de su propia corriente: $\varepsilon = -L\, dI/dt$. Un solenoide largo tiene $L = \mu_0 N^2 A/l$.
- En un circuito RL la corriente crece como $I = (\varepsilon/R)(1 - e^{-t/\tau})$ con $\tau = L/R$.
- Un inductor almacena $U = \tfrac{1}{2}LI^2$; todo campo magnético almacena una densidad de energía $u = B^2/(2\mu_0)$.
- Un circuito LC intercambia energía entre condensador e inductor a $\omega = 1/\sqrt{LC}$, el gemelo eléctrico de una masa en un resorte.

Ecuaciones clave

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

=-LdI/dt, L=(μ_0N^2A)/(l)

Autoinductancia

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right),\ \tau = \frac{L}{R}$$

I=()/(R)(1-e^-t/τ),\ τ= LR

Circuito RL

$$U = \tfrac{1}{2}LI^2, \quad u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

U=12LI^2, u_B=(B^2)/(2μ_0)

Energía magnética

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Oscilación LC

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 Un solenoide tiene 500 vueltas, sección de 1.0×10^{-3} m² y longitud de 0.25 m. Halla L y luego τ con una resistencia de 10 Ω.

1. $L = \mu_0 N^2 A/l = 4\pi \times 10^{-7} \times 250{,}000 \times 10^{-3}/0.25 = 1.26$ mH.
2. $\tau = L/R = 0.126$ ms.

Respuesta: 1.26 mH; 0.126 ms.

Ejemplo 8.2 ¿Cuánta energía almacena ese inductor a 2 A?

1. $U = \tfrac{1}{2}LI^2 = \tfrac{1}{2} \times 1.257 \times 10^{-3} \times 4$.

Respuesta: ≈ 2.51 mJ.

Ejemplo 8.3 Halla la frecuencia de oscilación de un inductor de 10 mH con un condensador de 1 µF.

1. $f = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-8})})$.

Respuesta: ≈ 1.59 kHz.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Dos bobinas tienen M = 0.01 H. La corriente en una cambia a 100 A/s. Halla la fem en la otra.

   1 V.

2. ¿Qué fracción de su corriente final alcanza un circuito RL tras 1τ y 3τ?

   63% y 95%.

3. Halla la densidad de energía magnética del campo terrestre de 50 µT.

$B^2/(2\mu_0) \approx 9.9 \times 10^{-4}$ J/m³.

4. ¿Por qué apagar una carga inductiva puede producir una chispa?

   Detener I rápidamente hace enorme L dI/dt.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un inductor se opone a la corriente.

En realidad: Se opone a los cambios de corriente; con CC estable es solo un cable.

Mito: Los inductores almacenan energía en la carga.

En realidad: En el campo magnético.

Mito: Las oscilaciones LC duran para siempre.

En realidad: La resistencia real las amortigua (un circuito RLC, unidad 9).

Tarjetas de estudio

Autoinductancia

$\varepsilon = -L\, dI/dt$.

Inductancia mutua

$\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$.

Inductancia de un solenoide

$L = \mu_0 N^2 A/l$.

Constante de tiempo RL

$\tau = L/R$.

Energía del inductor

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

Frecuencia LC

$\omega = 1/\sqrt{(LC)}$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La unidad SI de inductancia es el...

faradio

henrio

tesla

ohmio

henrio. 1 H = 1 V·s/A.

2. Duplicar las vueltas de un solenoide multiplica L por…

2

4

½

1

4. $L \propto N^2$.

3. La constante de tiempo RL es…

RL

L/R

R/L

√(LC)

L/R. $\tau = L/R$.

4. Un circuito LC es el análogo eléctrico de…

la fricción

una masa en un resorte

un cuerpo en caída

una palanca

una masa en un resorte. La energía va y viene.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El clima espacial es inducción a escala planetaria. El Space Weather Prediction Center de la NOAA explica que las tormentas geomagnéticas crean corrientes geomagnéticamente inducidas dañinas en la red eléctrica y en los oleoductos, además de bellas auroras. Las tormentas las impulsan las eyecciones de masa coronal, que según la NOAA salen del Sol a velocidades desde menos de 250 km/s hasta casi 3000 km/s; las más rápidas dirigidas a la Tierra llegan en apenas 15 a 18 horas.

En Saving Planets: Clima espacial · Solar Orbiter

Fuentes: NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms) · NOAA Space Weather Prediction Center: Coronal mass ejections (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 14.1 Mutual inductance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-1-mutual-inductance): Inductancia mutua.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Inductores.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Circuitos RL.
- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-an-lc-circuit): Circuitos LC.

☐ **Terminé esta unidad**

Circuitos de CA, transformadores y la red eléctrica

Corriente alterna, valores eficaces, reactancia e impedancia, fasores, resonancia RLC, factor de potencia, transformadores y por qué la red transmite a alto voltaje.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Convertir entre valores pico y eficaces.
- Hallar reactancia, impedancia, fase y corriente en un circuito RLC en serie.
- Calcular la potencia media y el factor de potencia.
- Usar relaciones de transformación y explicar la transmisión a alto voltaje.

Conceptos clave

- La CA doméstica es sinusoidal; los medidores leen valores eficaces, con V_rms = $V_0/\sqrt{2}$.
- Los inductores tienen reactancia X_L = ωL y los condensadores X_C = 1/(ωC). En un circuito RLC en serie Z = $\sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$.
- La corriente adelanta o atrasa al voltaje en φ con tan φ = (X_L − X_C)/R. La potencia media es P = I_rms V_rms cos φ; cos φ es el factor de potencia.
- En resonancia $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$, X_L = X_C y la corriente es máxima.
- Un transformador ideal conserva la potencia: $V_2/V_1 = N_2/N_1$ e $I_2/I_1 = N_1/N_2$. Solo funciona con CA, por inducción mutua.
- La pérdida en la línea es I^2R. Enviar la misma potencia a 10 veces el voltaje reduce la corriente 10 veces y las pérdidas 100 veces.

Ecuaciones clave

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

```
V_rms=(V_0)/(2)
```

Valor eficaz

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

```
X_L=ω L, X_C=1ω C
```

Reactancia

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},\ \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Z=^2+(X_L-X_C)^2,\ =(X_L-X_C)/(R)

Impedancia y fase

$$P = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos\varphi$$

P=I_rmsV_rms

Potencia media

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

(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)

Transformador

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R$$

P_loss=I^2R=(P/V)^2R

Pérdida en la línea

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Un circuito en serie tiene R = 20 Ω, L = 0.1 H y C = 100 μF con 120 V eficaces a 60 Hz. Halla la impedancia, la corriente, la fase y la potencia.

1. $X_L = 2\pi \times 60 \times 0.1 = 37.7\ \Omega$; $X_C = 1/(2\pi \times 60 \times 10^{-4}) = 26.5\ \Omega$.
2. $Z = \sqrt{(20^2 + 11.2^2)} = 22.9\ \Omega$; $I = 120/22.9 = 5.24$ A.
3. $\tan\varphi = 11.2/20$, $\varphi = 29.2°$; $P = I^2R = 549$ W.

Respuesta: 22.9 Ω, 5.24 A, la corriente atrasa 29.2° (factor de potencia 0.873), 549 W.

Ejemplo 9.2 Envía 100 MW por una línea de 10 Ω de resistencia a 345 kV y a 34.5 kV. Compara las pérdidas.

1. 345 kV: I = 290 A, pérdida = I^2R = 0.84 MW (0.84%).
2. 34.5 kV: I = 2899 A, pérdida = 84 MW.

Respuesta: 0.84 MW frente a 84 MW. Diez veces el voltaje da una centésima parte de la pérdida, por eso las líneas largas funcionan a cientos de kilovoltios.

Ejemplo 9.3 Un transformador de poste reduce 7200 V a 240 V (valores de ejemplo). Halla la relación de vueltas y la corriente del primario cuando el secundario entrega 30 A.

1. $N_1/N_2 = 7{,}200/240 = 30$.
2. $I_1 = I_2/30$.

Respuesta: 30:1; 1.0 A.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla el voltaje pico de 120 V eficaces.

   169.7 V.

2. Halla la frecuencia de resonancia del circuito RLC anterior.

   $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) \approx 50.3$ Hz.

3. ¿Por qué un transformador no puede elevar CC?

   Una corriente constante produce un flujo constante, que no induce fem.

4. ¿Qué le pasa a X_C cuando sube la frecuencia?

   Baja: los condensadores dejan pasar las frecuencias altas.

Ideas erróneas comunes

Mito: El valor eficaz es el voltaje medio.
En realidad: La media de una onda senoidal es cero; el valor eficaz es la raíz de la media del cuadrado.

Mito: Un transformador crea potencia.
En realidad: Intercambia voltaje por corriente; potencia de salida ≤ potencia de entrada.

Mito: Las impedancias se suman como resistencias.
En realidad: Se suman como vectores (fasores), no como simples números.

Tarjetas de estudio

RMS **Reactancia inductiva**

$V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.

Reactancia capacitiva

$X_C = 1/(\omega C)$.

Factor de potencia

$\cos \varphi = R/Z$.

Pérdida en la línea

$I^2R = (P/V)^2R$.

$X_L = \omega L$.

Impedancia

$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$.

Transformador

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

Cuestionario de autoevaluación

1. En resonancia en un circuito RLC en serie...

$X_L = X_C$

$Z = 0$

$I = 0$

$R = 0$

$X_L = X_C$. Las reactancias se anulan, $Z = R$.

2. Subir 10 veces el voltaje de transmisión cambia la pérdida en la línea en...

×10

×1/10

×1/100

×100

×1/100. Pérdida $\propto I^2 \propto 1/V^2$.

3. Un transformador elevador tiene...

$N_2 > N_1$

$N_2 < N_1$

$N_2 = N_1$

ningún secundario

$N_2 > N_1$. $V_2/V_1 = N_2/N_1$.

4. Un factor de potencia de 1 significa...

corriente y voltaje en fase

ninguna corriente

inductor puro

condensador puro

corriente y voltaje en fase. cos 0 = 1.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La Energy Information Administration de EE. UU. estima que las pérdidas de transmisión y distribución promediaron cerca del 5% de la electricidad enviada por la red estadounidense entre 2018 y 2022. La EIA describe la red como miles de millas de líneas de alto voltaje y millones de millas de líneas de bajo voltaje. Alto voltaje para la distancia y luego transformadores que lo bajan a niveles seguros cerca de los clientes: es el ejemplo resuelto anterior a escala nacional. Cada punto porcentual ahorrado significa menos combustible quemado o más energía limpia entregada.

En Saving Planets: Física I

Fuentes: U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · U.S. EIA: Delivery to consumers (the power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): Fundamentos de CA.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Impedancia.
- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circuit): Factor de potencia.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Transformadores.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interactivo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 10 · SEMANAS 13–14

Ecuaciones de Maxwell, ondas electromagnéticas y óptica

La corriente de desplazamiento y las cuatro ecuaciones de Maxwell, la luz como onda electromagnética, la energía y la cantidad de movimiento de la luz, el espectro y una introducción a la óptica: reflexión, refracción, reflexión total interna, polarización y lentes delgadas.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Enunciar las ecuaciones de Maxwell y el papel de la corriente de desplazamiento.
- Deducir $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)}$ y relacionar f, λ y la energía del fotón.
- Calcular la intensidad, las amplitudes de los campos y la presión de radiación.
- Usar la ley de Snell, el ángulo crítico, la ley de Malus y la ecuación de las lentes delgadas.

Conceptos clave

- Maxwell añadió la corriente de desplazamiento $\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$ a la ley de Ampère. Con ella, las cuatro ecuaciones (Gauss para E y B, Faraday, Ampère–Maxwell) predicen ondas.
- Las ondas viajan a $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)} = 3.00 \times 10^8$ m/s, con E ⊥ B ⊥ dirección de propagación y E = cB. La luz es una de estas ondas.
- Las ondas transportan energía, intensidad $I = \tfrac{1}{2}c\varepsilon_0 E_0^2$, y cantidad de movimiento, presión I/c sobre un absorbente.
- El espectro va desde la radio, pasando por microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta y rayos X, hasta los gamma; c = fλ y la energía del fotón es E = hf.
- En una frontera, la luz se refleja con ángulos iguales y se refracta según la ley de Snell $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. Al salir de un medio más denso, más allá del ángulo crítico toda la luz se refleja.
- Un polarizador deja pasar $I = I_0\cos^2\theta$ (Malus). Una lente delgada cumple 1/f = 1/d_o + 1/d_i.

Ecuaciones clave

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

E· d A=(Q)/(_0),\ B· d A=0

Leyes de Gauss

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

E· d l=-(d_B)/(dt),\ B· d l=μ_0I+μ_0_0(d_E)/(dt)

Faraday y Ampère–Maxwell

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = f\lambda, \quad E = cB$$

`c=1μ_0_0=f, E=cB`

Ondas electromagnéticas

$$I = \tfrac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2, \quad p = \frac{I}{c}$$

`I=12c_0E_0^2, p= Ic`

Intensidad y presión de radiación

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

`n_1θ_1=n_2θ_2`

Ley de Snell

$$I = I_0 \cos^2\theta, \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

`I=I_0^2θ, 1f=1d_o+1d_i`

Malus y lente delgada

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 Calcula c a partir de μ_0 y ε_0.

1. $c = 1/\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \times 8.854 \times 10^{-12})}$.

Respuesta: 2.998×10^8 m/s, la velocidad medida de la luz, lo que le indicó a Maxwell que la luz es electromagnética.

Ejemplo 10.2 La banda de infrarrojo cercano de Landsat 9 abarca 0.85–0.88 µm y su banda roja 0.64–0.67 µm (NASA). Halla la frecuencia en el centro de cada banda (0.865 y 0.655 µm) y la energía del fotón en el rojo.

1. $f = c/\lambda$: 3.47×10^{14} Hz y 4.58×10^{14} Hz.
2. $E = hc/\lambda = 3.03 \times 10^{-19}$ J = 1.89 eV.

Respuesta: NIR 3.47×10^{14} Hz; rojo 4.58×10^{14} Hz; 1.89 eV.

Ejemplo 10.3 Luz solar intensa de 1000 W/m² (valor de ejemplo) incide en un panel. Halla E_0, B_0 y la presión sobre una superficie absorbente.

1. $E_0 = \sqrt{(2I/(c\varepsilon_0))} = 868$ V/m.
2. $B_0 = E_0/c = 2.90$ μT.
3. $p = I/c = 3.34$ μPa.

Respuesta: 868 V/m, 2.90 μT, 3.34 μPa.

Ejemplo 10.4 La luz entra en el agua (n = 1.33) a 30° de la normal. Halla el ángulo de refracción y el ángulo crítico para la luz que sale del agua.

1. $\sin \theta_2 = \sin 30°/1.33$, $\theta_2 = 22.1°$.
2. sin θ_c = 1/1.33, θ_c = 48.8°.

Respuesta: 22.1°; 48.8°.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la longitud de onda del Wi-Fi de 2.4 GHz.

   12.5 cm.

2. ¿Cuánto tarda aproximadamente la luz solar en recorrer 1.5×10^{11} m?

   ≈ 8.3 minutos.

3. Halla el ángulo crítico del vidrio (n = 1.5) al aire.

   41.8°.

4. Luz no polarizada atraviesa dos polarizadores a 60°. ¿Qué fracción de la luz que sale del primero atraviesa el segundo?

   $\cos^2 60° = 0.25$.

5. Un objeto está a 30 cm de una lente de distancia focal 10 cm. ¿Dónde está la imagen?

   1/d_i = 1/10 − 1/30, d_i = 15 cm, real e invertida.

6. La banda térmica 10 de Landsat 9 está cerca de 11 μm. Halla la energía del fotón.

   ≈ 0.113 eV, mucho menos que los fotones visibles: los sensores térmicos leen calor, no color.

Ideas erróneas comunes

Mito: La luz necesita un medio.

En realidad: Las ondas EM viajan por el vacío.

Mito: La radio y la luz son cosas distintas.

En realidad: Mismas ondas, distintas longitudes de onda.

Mito: La luz se aleja de la normal al entrar en el agua.

En realidad: Se acerca a la normal: se frena.

Tarjetas de estudio

Ecuaciones de Maxwell

Gauss (E, B), Faraday, Ampère–Maxwell.

Corriente de desplazamiento

$\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$.

Velocidad de la luz

$c = 1/\sqrt{(\mu_0 \varepsilon_0)}$.

Relación de onda

$c = f\lambda$.

Energía del fotón

$E = hf$.

Ley de Snell

$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Ángulo crítico

$\sin \theta_c = n_2/n_1$.

Ley de Malus

$I = I_0 \cos^2\theta$.

Lente delgada

$1/f = 1/d_o + 1/d_i$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El término de corriente de desplazamiento lo añadió...

Faraday

Ampère

Maxwell

Gauss

Maxwell. Ley de Ampère–Maxwell.

2. En una onda EM, E y B son...

paralelos

perpendiculares entre sí y al movimiento

a lo largo del movimiento

independientes

perpendiculares entre sí y al movimiento. Ondas transversales.

3. Mayor frecuencia significa...

λ más larga, menos energía por fotón

λ más corta, más energía por fotón

ondas más lentas

ningún cambio

λ más corta, más energía por fotón. c = fλ; E = hf.

4. La reflexión total interna ocurre cuando la luz pasa...

del aire al agua

del agua al aire más allá de θ_c

por cualquier medio

del vacío al vidrio

del agua al aire más allá de θ_c. De más denso a menos denso.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los satélites observan el planeta midiendo ondas electromagnéticas. La NASA enumera las bandas de Landsat 9, desde la banda costera/aerosoles de 0.43 µm, pasando por el visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta, hasta el infrarrojo térmico de 10.60–12.51 µm. La NASA indica que estas observaciones apoyan alertas de deforestación tropical, el monitoreo de la calidad del agua y los informes del estado de los cultivos, y que el sensor térmico mide la temperatura de la superficie terrestre para ayudar a gestionar el agua en regiones propensas a la sequía. Cada banda es una porción del espectro elegida porque el suelo, el agua y las plantas la reflejan o emiten de forma distinta.

El recorrido de la NASA por el espectro electromagnético muestra cómo se usa cada banda, desde la radio hasta los rayos gamma, para estudiar la Tierra y el espacio.

En Saving Planets: Landsat 9 · GOES-19 · Observación de la Tierra

Fuentes: NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/) · NASA Science: Tour of the electromagnetic spectrum (https://science.nasa.gov/ems/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 16.1 Maxwell's equations and electromagnetic waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-1-maxwells-equations-and-electromagnetic-waves): Maxwell.
- OpenStax UP2, 16.3 Energy carried by EM waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-3-energy-carried-by-electromagnetic-waves): Intensidad.
- OpenStax UP2, 16.5 The electromagnetic spectrum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-5-the-electromagnetic-spectrum): Espectro.
- OpenStax UP3, 1.3 Refraction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-3-refraction): Ley de Snell.
- OpenStax UP3, 1.7 Polarization (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-7-polarization): Polarización.
- OpenStax UP3, 2.4 Thin lenses (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-4-thin-lenses): Lentes.
- PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light): Interactivo.

Ver la clase

Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-14) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

Estos problemas están dentro de cada unidad. Hazlos en papel y luego abre la respuesta.

1. Carga, ley de Coulomb y campos eléctricos
   4 problemas
2. Ley de Gauss
   4 problemas
3. Potencial eléctrico y capacitancia
   4 problemas
4. Corriente, resistencia y circuitos de CC
   4 problemas
5. Campos y fuerzas magnéticas
   4 problemas
6. Fuentes de campos magnéticos: Biot–Savart y Ampère
   4 problemas
7. Inducción electromagnética: Faraday y Lenz
   4 problemas
8. Inductancia, circuitos RL y LC
   4 problemas
9. Circuitos de CA, transformadores y la red eléctrica
   4 problemas
10. Ecuaciones de Maxwell, ondas electromagnéticas y óptica
    6 problemas

El laboratorio (PHYS 210L)

El laboratorio es la parte práctica del curso, un componente de 1 crédito en un plan universitario típico. Aquí es gratuito y solo para practicar.

Cada práctica puede hacerse por completo en una simulación PhET gratuita, y la mayoría también tiene una versión casera que solo usa pilas de 9 V o menos. Nunca uses la corriente de la pared, nunca abras un aparato que se enchufe y nunca pongas una pila en cortocircuito.

Referencia de seguridad: OSHA: Electrical safety (https://www.osha.gov/electrical)

Práctica A: mapa de campos eléctricos y equipotenciales

SEMANA 2

Objetivo: Mide cómo disminuye con la distancia el campo de una carga puntual, confirma la ley del inverso del cuadrado con un ajuste log-log y traza las equipotenciales alrededor de un dipolo.

$$E = \frac{kq}{r^2} \;\Rightarrow\; \log E = \log(kq) - 2\log r$$

E=(kq)/(r^2)\ \ E=(kq)-2 r

Una recta de pendiente −2 en una gráfica log-log

Procedimiento

1. Abre PhET Charges and Fields. Coloca una sola carga de +1 nC y activa los valores y la cuadrícula.
2. Usa el sensor de campo E a 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 m y registra E.
3. Grafica log E frente a log r y ajusta una recta; compara la pendiente con −2 y la ordenada al origen con log(kq).
4. Añade una carga de −1 nC a 1 m, usa el voltímetro para trazar las equipotenciales de 0 V y ±10 V, y dibuja las líneas de campo perpendiculares a ellas.

Tabla de datos

r (m)	E (V/m)
0.5	35.95
1.0	8.99
1.5	3.99
2.0	2.25

Valores calculados con E = kq/r² para q = 1 nC; las lecturas de tu simulación deberían coincidir salvo redondeo.

Cálculo de ejemplo

1. De 0.5 m a 2.0 m (×4 en r), E baja de 35.95 a 2.25 V/m (×1/16), así que la pendiente log-log es −2.
2. La equipotencial de 0 V del dipolo es la mediatriz de las dos cargas, y aun así el campo allí no es cero.

> **Seguridad**
>
> - Ninguna más allá del uso normal de una computadora.

Alternativa en casa o virtual

- Frota un globo en el pelo y observa cómo levanta trocitos de papel a distintas distancias: una mirada cualitativa a un campo que decae rápido con la distancia.

PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields) · PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law)

Vínculo con el planeta: Con mapas de campo como estos diseñan los ingenieros los campos eléctricos dentro de las celdas solares y los equipos de alto voltaje. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica B: capacitancia y separación de placas

SEMANA 5

Objetivo: Mide cómo depende la capacitancia de un condensador de placas paralelas de la separación entre placas y obtén ε_0 de los datos.

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

`C=(_0A)/(d)`

Grafica C frente a 1/d; la pendiente es $\varepsilon_0 A$

Procedimiento

1. Abre PhET Capacitor Lab: Basics. Fija el área de las placas en 400 mm² y conecta la batería a 1.5 V.
2. Lee C con separaciones de 2, 4, 6, 8 y 10 mm.
3. Grafica C frente a 1/d y ajusta una recta por el origen; divide la pendiente entre A para obtener ε_0.
4. Con d = 5 mm, registra la energía almacenada y compárala con ½CV².

Tabla de datos

d (mm)	C (pF)
2	1.77
4	0.885
6	0.590
8	0.443
10	0.354

Valores calculados con $C = \varepsilon_0 A/d$; la simulación los redondea.

Cálculo de ejemplo

1. C × d es constante: 1.77 pF × 2 mm = 0.354 pF × 10 mm, así que $C \propto 1/d$.
2. Pendiente $\varepsilon_0 A = 3.54 \times 10^{-15}$ F·m, así que $\varepsilon_0 = 3.54 \times 10^{-15}/(4 \times 10^{-4}) = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.
3. A 5 mm, C = 0.708 pF y U = ½CV² = 0.797 pJ a 1.5 V.

> **Seguridad**
>
> - Ninguna más allá del uso normal de una computadora.

Alternativa en casa o virtual

- Opcional: con un multímetro que mida capacitancia, mide dos trozos de papel de aluminio separados por una, dos y tres hojas de papel. C debería bajar a medida que crece la pila.

PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Vínculo con el planeta: Los condensadores suavizan la potencia en coches eléctricos, inversores solares y la red; la misma $C = \kappa\varepsilon_0 A/d$ fija su tamaño. FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

☐ **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica C: ley de Ohm, reglas de Kirchhoff y una constante de tiempo RC

SEMANA 7

Objetivo: Confirma la ley de Ohm, comprueba las reglas de Kirchhoff en un circuito de dos mallas y mide la constante de tiempo de un condensador en carga.

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`V_C=V_0(1-e^-t/RC)`

Curva de carga; ln(1 − V_C/V_0) = −t/RC es una recta

Procedimiento

1. Ley de Ohm: conecta una resistencia de 1 kΩ a 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 y 9.0 V (pilas AA en serie o la batería de PhET) y registra la corriente; grafica I frente a V.
2. Kirchhoff: en PhET Circuit Construction Kit: DC, arma el circuito de la unidad 4 (12 V, 6 V, 2 Ω, 3 Ω, 6 Ω) y mide las tres corrientes; comprueba las sumas en el nodo y en las mallas.
3. RC: carga un condensador de 100 µF desde 9 V a través de 10 kΩ, leyendo V_C cada segundo; grafica ln(1 − V_C/9) frente a t y obtén RC de la pendiente.

Tabla de datos

t (s)	V_C (V), 10 kΩ y 100 µF desde 9 V
0	0.00
1	5.69
2	7.78
3	8.55
5	8.94

Valores calculados para componentes ideales; los condensadores reales suelen desviarse ±20% de su etiqueta, así que tu τ puede variar.

Cálculo de ejemplo

1. Ley de Ohm: la pendiente de I frente a V es 1 mA/V, así que R = 1.00 kΩ; a 9 V la resistencia disipa solo 81 mW.
2. Kirchhoff: 2 A − 0.667 A = 1.33 A en el nodo, y 12 − 2(2) − 6(1.33) = 0 en la malla 1.
3. RC: la recta de ln(1 − V_C/9) tiene pendiente −1.0 s^{-1}, así que τ = 1.0 s = (10 kΩ)(100 µF).

> **Seguridad**

- Usa solo pilas de 9 V o menos; nunca la corriente de la pared.
- Nunca conectes un cable directamente entre los bornes de una pila: se calienta rápido y puede quemar.
- Los condensadores electrolíticos tienen una pata +; conéctala hacia el lado + de la pila y usa uno con tensión nominal superior a 9 V.

Alternativa en casa o virtual

- Todo funciona con un multímetro, pilas AA, una pila de 9 V, resistencias y un condensador en una protoboard; cronometra las lecturas RC grabando el multímetro con el teléfono.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Resistance in a Wire (https://phet.colorado.edu/en/simulations/resistance-in-a-wire)

Vínculo con el planeta: Los parques solares se cablean con las mismas reglas: las cadenas en serie suben el voltaje y las cadenas en paralelo suben la corriente. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica D: medir campos magnéticos, incluido el de la Tierra

SEMANA 9

Objetivo: Mide el campo magnético terrestre con el magnetómetro de un teléfono, traza el campo de un cable en simulación y compara ambos con la teoría.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

B=(μ_0I)/(2π r)

Campo de un cable largo

Procedimiento

1. Abre una app de magnetómetro lejos de metales y aparatos electrónicos. Registra la magnitud total del campo en cinco puntos y promedia.
2. Compara con el rango que indica la NOAA, de unos 25000–65000 nT en la superficie terrestre.
3. En PhET Magnets and Electromagnets, observa cómo cambia el campo con la corriente y el número de espiras; luego calcula B para un cable largo con I = 2 A a r = 1, 2 y 4 cm y grafica B frente a 1/r.
4. Acerca un imán de nevera al teléfono y anota la distancia a la que su campo iguala al de la Tierra.

Tabla de datos

r (cm)	B para un cable de 2 A (μT)
1	40
2	20
4	10

Valores del cable calculados con $\mu_0 I/(2\pi r)$. Las lecturas del campo terrestre dependen de tu ubicación; la calculadora de la NOAA da el total esperado para tu lugar.

Cálculo de ejemplo

1. B ∝ 1/r: duplicar la distancia reduce el campo a la mitad, así que la gráfica de B frente a 1/r es una recta por el origen con pendiente $\mu_0 I/(2\pi) = 0.4$ μT·m.
2. Un cable de 2 A iguala el campo terrestre de 50 μT a $r = \mu_0 I/(2\pi \times 50\ \mu T) = 0.8$ cm.

> **Seguridad**
>
> - Mantén los imanes fuertes lejos de las ranuras de tarjeta de los teléfonos, los marcapasos y las tarjetas de crédito.

- No hagas pasar corriente alta por un cable desnudo en casa; la parte del cable de esta práctica se hace en simulación.

Alternativa en casa o virtual

- Los pasos del magnetómetro y del imán de nevera son la versión casera.

PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets) · PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass) · NOAA magnetic field calculators (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml)

Vínculo con el planeta: Conocer el campo normal es la referencia para detectar tormentas geomagnéticas, que según advierte la NOAA pueden inducir corrientes dañinas en las redes eléctricas. NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms)

☐ **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica E: inducción y un generador a escala

SEMANA 10

Objetivo: Demuestra que la fem inducida depende de la tasa de cambio del flujo y que la fem pico de un generador crece en proporción a su velocidad de giro.

$$\varepsilon_{\max} = NBA\omega$$

_=NBAω

Fem pico de una bobina giratoria

Procedimiento

1. En PhET Faraday's Law, pasa el imán por la bobina despacio y luego rápido; registra la lectura de voltaje pico cada vez y observa el cambio de signo al salir.
2. En PhET Faraday's Electromagnetic Lab (pestaña Generator), cambia la velocidad de la turbina y registra la respuesta pico de la bombilla o del voltímetro.
3. Calcula ε_max para una bobina modelo con N = 200, A = 0.01 m² y B = 0.05 T a 1, 2 y 3 revoluciones por segundo.
4. En casa: enrolla 100 vueltas de cable fino aislado en un tubo de papel higiénico, conecta un multímetro en mV y deja caer un imán potente a través de él.

Tabla de datos

Velocidad de giro (rev/s)	Fem pico (V)
1	0.628
2	1.26
3	1.88

Valores calculados para la bobina modelo (valores de ejemplo).

Cálculo de ejemplo

1. ε_max = NBA(2πf) = 200 × 0.05 × 0.01 × 2π f = 0.628 V por rev/s, así que duplicar la velocidad duplica la fem.
2. Un imán más rápido da un pulso más alto y más corto; el área bajo la curva fem-tiempo (cambio total de flujo × N) se mantiene igual.

> **Seguridad**
>
> - Los imanes potentes de neodimio se juntan con fuerza y pueden pellizcar la piel o romperse; manipúlalos de uno en uno.

- Mantén los imanes lejos de marcapasos y aparatos electrónicos.

Alternativa en casa o virtual

- El paso de la bobina y el imán es la versión casera; sirve cualquier multímetro en su escala de milivoltios.

PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab) · PhET: Generator (https://phet.colorado.edu/en/simulations/generator)

Vínculo con el planeta: Cada aerogenerador y central hidroeléctrica realiza esta práctica a escala de megavatios: la turbina hace girar un generador para producir electricidad. DOE de EE. UU.: ¿cómo funcionan los aerogeneradores? (en inglés) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica F: refracción y ley de Snell

SEMANA 14

Objetivo: Mide ángulos de refracción del aire al agua, halla el índice de refracción y observa la reflexión total interna.

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

`n=(θ_1)/(θ_2)`

Pendiente de sin θ_1 frente a sin θ_2

Procedimiento

1. En PhET Bending Light, pon agua como medio inferior y dirige el láser de 10° a 60° respecto a la normal en pasos de 10°; lee el ángulo de refracción con el transportador.
2. Grafica sin θ_1 frente a sin θ_2 y ajusta una recta por el origen; la pendiente es n.
3. Pon el láser dentro del agua y aumenta el ángulo hasta que desaparezca el haz refractado; registra el ángulo crítico.
4. En casa: dirige un láser de baja potencia o un haz estrecho de linterna a una caja transparente con agua y una gota de leche, y mide los ángulos en un transportador impreso.

Tabla de datos

θ_1 en el aire (°)	θ_2 en el agua (°)
10	7.5
20	14.9
30	22.1
40	28.9
50	35.2
60	40.6

Valores calculados con la ley de Snell y n = 1.33.

Cálculo de ejemplo

1. sin 30°/sin 22.1° = 0.500/0.376 = 1.33, y cada fila da el mismo cociente.
2. Ángulo crítico del agua al aire: $\sin^{-1}(1/1.33) = 48.8°$.

> **Seguridad**

- Usa solo un puntero láser de clase 2 (menos de 1 mW), nunca mires el haz ni lo apuntes a los ojos de nadie; cuidado con los reflejos en el agua y el vidrio.

Alternativa en casa o virtual

- El paso de la caja de agua es la versión casera.

PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light)

Vínculo con el planeta: Los sensores satelitales se construyen con lentes, espejos y filtros diseñados con estas mismas leyes de refracción y reflexión. NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/)

☐ **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Series de práctica para exámenes

Cronométrate: unos 10 minutos por problema. Luego compara con las soluciones completas.

Ejercicios de práctica para el parcial (unidades 1–5)

1. Cargas de +2.0 μC y +8.0 μC están separadas 0.30 m. Halla la fuerza entre ellas y el punto entre ellas donde E = 0.

    1. $F = k(2 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})/0.09$.
    2. $k(2)/x^2 = k(8)/(0.3 - x)^2$ da $x = 0.10$ m.

    Respuesta: 1.60 N, repulsiva; a 0.10 m de la carga de 2.0 μC.

2. Una superficie cerrada rodea una carga de 3.0 nC. Halla el flujo neto.

    1. $\Phi = Q/\varepsilon_0$.

    Respuesta: ≈ 339 $N \cdot m^2/C$.

3. Un condensador de 10 μF se carga a 12 V. Halla Q y U.

    1. $Q = CV$; $U = \frac{1}{2}CV^2$.

    Respuesta: 120 μC; 0.72 mJ.

4. Una pila de 9 V alimenta 3 Ω en serie con un par en paralelo de 6 Ω y 3 Ω. Halla la corriente y la potencia total.

    1. Par en paralelo = 2 Ω; total 5 Ω.
    2. $I = 9/5$; $P = IV$.

Respuesta: 1.8 A; 16.2 W.

5. Un protón se mueve a 1.0 × 10^6 m/s a través de un campo de 0.20 T. Halla el radio de la órbita.

    1. r = mv/(eB).

    Respuesta: ≈ 5.22 cm.

Serie de práctica final (todas las unidades)

1. Halla B a 0.10 m de un cable largo con 50 A.

    1. B = $\mu_0 I/(2\pi r)$.

    Respuesta: 100 μT, aproximadamente el doble del campo terrestre.

2. Una bobina de 50 vueltas de área 0.05 m^2 gira a 50 rev/s en un campo de 0.20 T. Halla la fem pico.

    1. ε = NBAω, ω = 2π × 50.

    Respuesta: ≈ 157 V.

3. Un circuito RL tiene L = 0.5 H y R = 100 Ω. Halla τ y la fracción de la corriente final tras 5 ms.

    1. τ = L/R.

    Respuesta: 5 ms; 63%.

4. Envía 50 MW a 230 kV por una línea con 5 Ω de resistencia. Halla la corriente y la pérdida.

    1. I = P/V; pérdida = I^2R.

    Respuesta: 217 A; 0.236 MW (0.47%).

5. Halla la frecuencia y la energía del fotón de luz de 500 nm.

    1. f = c/λ; E = hf.

    Respuesta: 6.00 × 10^{14} Hz; 2.48 eV.

6. La luz entra en vidrio (n = 1.5) a 45°. Halla el ángulo de refracción.

    1. sin θ_2 = sin 45°/1.5.

    Respuesta: 28.1°.

Hoja de fórmulas

$$F = k|q_1 q_2|/r^2 \qquad \vec{E} = \vec{F}/q$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q_{\text{enc}}/\varepsilon_0$$

$$V = kq/r,\ E_x = -dV/dx$$

$$C = \kappa\varepsilon_0 A/d,\ U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

$$V = IR,\ R = \rho L/A,\ P = IV$$

$$\tau = RC,\ \tau = L/R$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},\ r = mv/(qB)$$

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B},\ \tau = NIAB\sin\theta$$

$$B = \mu_0 I/(2\pi r),\ B = \mu_0 nI$$

$$\varepsilon = -N\, d\Phi_B/dt,\ \varepsilon = BLv$$

$$L = \mu_0 N^2 A/l,\ U = \tfrac{1}{2}LI^2$$

$$X_L = \omega L,\ X_C = 1/(\omega C),\ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)}$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = f\lambda,\ E = hf$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2,\ 1/f = 1/d_o + 1/d_i$$

Constantes

Constante	Valor
Carga elemental, e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Constante de Coulomb, k = 1/(4πε₀)	8.988 × 10⁹ N·m²/C²
Permitividad del vacío, ε₀	8.854 × 10⁻¹² F/m
Permeabilidad del vacío, μ₀	1.257 × 10⁻⁶ T·m/A (≈ 4π × 10⁻⁷)
Velocidad de la luz, c	2.998 × 10⁸ m/s
Masa del electrón, mₑ	9.109 × 10⁻³¹ kg
Masa del protón, mₚ	1.673 × 10⁻²⁷ kg
Constante de Planck, h	6.626 × 10⁻³⁴ J·s

Fuente: NIST: constantes físicas fundamentales (en inglés) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

Textos y simulaciones gratuitos

Usa estos libros, clases y simulaciones gratuitos junto con el curso.

- OpenStax University Physics Volume 2 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-introduction): Libro de texto gratuito y completo para este curso.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Clases, series de problemas y exámenes del MIT, gratis.
- OpenStax University Physics Volume 3 (optics) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-2-the-law-of-reflection): Capítulos de óptica gratuitos para la unidad 10.
- PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields): Coloca cargas y traza campos y equipotenciales.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Construye y mide circuitos.
- PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab): Imanes, bobinas, generadores y transformadores.

Glosario

Ley de Ampère
$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_enc$.

Capacitancia
Carga almacenada por voltio, $C = Q/V$.

Ley de Coulomb
Fuerza entre cargas puntuales, $F = k|q_1 q_2|/r^2$.

Ángulo crítico
Ángulo a partir del cual la luz se refleja totalmente dentro de un medio más denso.

Corriente de desplazamiento
$\varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt$, el añadido de Maxwell a la ley de Ampère.

EMF
Energía por carga que entrega una fuente como una batería o un generador.

Campo eléctrico
Fuerza por unidad de carga.

Potencial eléctrico
Energía potencial por unidad de carga, en voltios.

Ley de Faraday
Un flujo magnético variable induce fem.

Ley de Gauss
El flujo eléctrico neto que sale de una superficie cerrada es igual a Q_enc/ε_0.

Corriente geomagnéticamente inducida
Corriente que las tormentas geomagnéticas inducen en redes y oleoductos.

Impedancia
Oposición total a la CA, Z.

Inductancia

Fem por tasa de cambio de la corriente, en henrios.

Ley de Lenz
La corriente inducida se opone al cambio de flujo.

Flujo magnético
$\Phi_B = \int B \cdot dA$, en webers.

Ecuaciones de Maxwell
Cuatro leyes que unifican electricidad, magnetismo y luz.

Factor de potencia
$\cos \varphi$, la fracción de la potencia aparente que realiza trabajo.

Valor eficaz
Valor eficaz (media cuadrática), $V_0/\sqrt{2}$ para una onda senoidal.

Resistividad
Propiedad del material ρ en $R = \rho L/A$.

Ley de Snell
$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Transformador
Dos bobinas acopladas que cambian el voltaje de CA.

Rúbrica de autoevaluación

No se otorga nota ni crédito. Úsala para valorar con honestidad dónde estás en cada unidad.

Nivel	Cómo se ve
4 · Dominio	Plantea campos y circuitos a partir de una descripción, elige la ley correcta, maneja signos y sentidos, y comprueba unidades y límites.
3 · Competente	Resuelve los ejercicios con algún error ocasional de signo o de unidades.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero le cuesta elegir una superficie gaussiana, un lazo o la regla de la mano derecha.
1 · Inicial	Sustituye números en fórmulas sin hacer un dibujo; debe repasar la unidad.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	25%
Prácticas (PHYS 210L)	20%

Parte	Peso
Serie de práctica de mitad de curso	25%
Serie de práctica final	30%

Apunta al nivel 3 o superior en cada unidad antes de pasar al siguiente curso.

Cursos relacionados

- Ecuaciones diferenciales MATH 220
- Estática ENGR 211
- Cálculo III MATH 210
- Todos los cursos