Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 3, Otoño

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 un curso semestral de segundo año de análisis de circuitos con laboratorio. Se basa en los temas y la profundidad de MIT 6.002 Circuits and Electronics (gratuito en MIT OpenCourseWare), Georgia Tech ECE 2040 Circuit Analysis y Purdue ECE 20001 Electrical Engineering Fundamentals I, y en el libro gratuito OpenStax University Physics Volume 2 y las simulaciones PhET, que enlazamos donde ayudan. Ninguno de esos autores o centros respalda esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula a trabajo real en energía limpia con una fuente pública citada (iluminación LED, paneles solares e inversores, almacenamiento en baterías, carga de vehículos eléctricos, centros de datos y la red eléctrica), cada número de la página se recalcula con un script de comprobación antes de publicarse, y cada práctica tiene una simulación PhET gratuita o una versión casera segura de baja tensión.
>
> 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

Los circuitos son la forma en que la energía limpia llega a las personas. Los paneles solares producen corriente continua que los inversores convierten en corriente alterna, las baterías la almacenan, los transformadores y las líneas eléctricas la transportan, y las luces, motores y cargadores eficientes la usan.

Cada punto porcentual de pérdida en un cable, transformador o convertidor es energía que hubo que generar en algún sitio. El análisis de este curso es el que usan los ingenieros para reducir esas

pérdidas. Cada unidad termina con una sección breve con fuentes. Los valores que no proceden de una fuente se indican 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 (ENGR 214 + ENGR 214L).
- 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 II: carga, campo eléctrico, potencial, corriente, resistencia, capacitancia, inductancia y ley de Faraday.
- Cálculo I y II: derivadas e integrales; las unidades 7 y 8 resuelven ecuaciones diferenciales de primer y segundo orden.
- Números complejos (repasados en la unidad 9) para los fasores; Álgebra lineal ayuda con las ecuaciones nodales y de mallas.
- Ecuaciones diferenciales puede cursarse a la vez que este curso.

Cómo estudiar

- Dibuja y rotula primero el circuito: tensiones de nodo, corrientes de rama con flechas y marcas de polaridad en cada elemento.
- Usa el convenio de signos pasivo: la corriente que entra por el terminal + significa que el elemento absorbe potencia.
- Escribe la LCK en los nodos o la LTK en las mallas, cuenta incógnitas y ecuaciones y resuelve (a mano para 2 × 2, con matrices para más).

- Comprueba cada respuesta: la potencia absorbida debe igualar a la suministrada, y los límites ($t = 0$, $t \to \infty$, $\omega \to 0$ o ∞) deben tener sentido.
- Mantén las unidades en el SI: V, A, Ω, W, F, H, s, y vigila los prefijos (mA, kΩ, µF, mH).
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Una computadora o tableta para las simulaciones PhET gratuitas (funcionan en el navegador).
- Un multímetro digital (los modelos económicos miden V, A y Ω).
- Una placa de pruebas sin soldadura, cables de puente, un portapilas de 2 × AA (3 V) y pilas AA.
- Resistencias (100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ), un condensador de 1000 µF para al menos 6.3 V, y LED.
- Opcional: un medidor de potencia enchufable para comparar bombillas y aparatos (se enchufa a la pared; no lo abras).
- Gafas de seguridad, un cronómetro o teléfono y una hoja de cálculo.

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	Variables y elementos de circuito: carga, corriente, tensión, potencia, energía y ley de Ohm	Carga, corriente, tensión, potencia, convenio de signos, fuentes	MIT 6.002; OpenStax UP2 9.4
2	Variables y elementos de circuito: carga, corriente, tensión, potencia, energía y ley de Ohm	Ley de Ohm, resistividad, energía en kWh; Práctica A	UP2 9.4, 10.1
3	Leyes de Kirchhoff, resistencias en serie y en paralelo, y divisores de tensión y de corriente	LCK, LTK, serie y paralelo, divisores, medidores; Práctica B	UP2 10.2–10.3
4	Análisis sistemático: métodos de tensiones de nodo y de corrientes de malla	Método de tensiones de nodo y supernodos	MIT 6.002
5	Análisis sistemático: métodos de tensiones de nodo y de corrientes de malla	Método de corrientes de malla, supermallas, fuentes dependientes	MIT 6.002; UP2 10.3

Semana	Unidad	Temas	Lectura
6	Teoremas de circuitos: linealidad, superposición, transformación de fuentes, Thevenin, Norton y máxima transferencia de potencia	Superposición, transformación de fuentes, Thevenin, Norton, potencia máxima; Práctica C	MIT 6.002
7	Amplificadores operacionales	Amplificadores operacionales; práctica para el parcial	MIT 6.002
8	Condensadores e inductores	Condensadores, inductores, energía, integradores	UP2 8.1, 14.2
9	Circuitos de primer orden: transitorios RC y RL	Respuestas natural y al escalón RC y RL	UP2 10.5, 14.4
10	Circuitos de primer orden: transitorios RC y RL	Problemas de conmutación y energía de conmutación digital; Práctica D	MIT 6.002
11	Circuitos de segundo orden: respuestas natural y al escalón de circuitos RLC	RLC en serie y en paralelo, amortiguamiento, oscilación LC	UP2 14.5–14.6
12	Régimen sinusoidal permanente: fasores e impedancia	Senoides, fasores, impedancia	UP2 15.2–15.3
13	Régimen sinusoidal permanente: fasores e impedancia	Análisis nodal, de mallas y de Thevenin en CA, filtros; Práctica E	MIT 6.002; UP2 15.3, 15.5
14	Potencia en CA, factor de potencia, resonancia, transformadores y sistemas trifásicos	Potencia en CA, factor de potencia, transformadores, trifásica; Práctica F	UP2 15.4–15.6
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

Variables y elementos de circuito: carga, corriente, tensión, potencia, energía y ley de Ohm

Carga y corriente, la tensión como energía por unidad de carga, potencia y energía, el convenio de signos pasivo, fuentes ideales independientes y dependientes, resistencia y resistividad, ley de Ohm y potencia en resistencias.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Relacionar carga, corriente, tensión, potencia y energía con las unidades correctas.
- Aplicar el convenio de signos pasivo para decidir si un elemento absorbe o entrega potencia.
- Usar la ley de Ohm y R = ρL/A.
- Calcular el consumo de energía en kWh y comparar aparatos.

Conceptos clave

- La corriente es el ritmo de flujo de carga, i = dq/dt, en amperios (1 A = 1 C/s). La tensión es la energía por unidad de carga entre dos puntos, en voltios (1 V = 1 J/C).
- Potencia p = vi. Con el convenio de signos pasivo (la corriente entra por el terminal +), p > 0 significa que el elemento absorbe potencia y p < 0 que la entrega. En cualquier circuito, potencia total absorbida = potencia total entregada.
- Una fuente de tensión ideal mantiene su tensión sea cual sea la corriente; una fuente de corriente ideal mantiene su corriente sea cual sea la tensión. Las fuentes dependientes se controlan por una tensión o corriente de otra parte y modelan transistores y amplificadores.
- Ley de Ohm v = iR. Una resistencia siempre absorbe potencia p = i^2R = v^2/R. La resistencia de un cable R = ρL/A crece con la longitud y disminuye con la sección; la conductancia G = 1/R se mide en siemens.
- Energía w = ∫p dt; a potencia constante w = Pt. Las compañías facturan en kilovatios hora: 1 kWh = 3.6 MJ.

Ecuaciones clave

$$i = \frac{dq}{dt}$$

`i=dq/dt`

Corriente

$$p = vi$$

`p=vi`

Potencia

$$v = iR, \;\; p = i^2 R = \frac{v^2}{R}$$

v=iR,\ \ p=i^2R=(v^2)/(R)

Ley de Ohm y potencia en una resistencia

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

R=(ρ L)/(A)

Resistencia de un conductor

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Un calefactor de 4 Ω se conecta a 12 V. Halla la corriente y la potencia.

1. i = v/R = 12/4 = 3 A.
2. p = vi = 12 × 3.

Respuesta: i = 3 A, p = 36 W.

Ejemplo 1.2 Halla la resistencia de 10 m de cable de cobre de 1 mm² de sección (ρ = 1.68 × 10⁻⁸ Ω·m).

1. A = 1 mm² = 1 × 10⁻⁶ m².
2. R = ρL/A = 1.68 × 10⁻⁸ × 10/10⁻⁶.

Respuesta: R = 0.168 Ω.

Ejemplo 1.3 Una bombilla incandescente de 60 W se sustituye por un LED que usa un 75 % menos de energía. Ambos funcionan 3 horas al día durante un año. Halla la energía ahorrada.

1. Potencia del LED = 0.25 × 60 = 15 W.
2. Incandescente: 60 × 3 × 365 = 65700 Wh = 65.7 kWh; LED: 16.4 kWh.

Respuesta: Unos 49.3 kWh ahorrados por bombilla al año.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una corriente de 2 A circula durante 30 s. ¿Cuánta carga pasa?

   q = it = 60 C.

2. Una lámpara consume 0.5 A a 120 V. Halla su potencia y su resistencia.

   p = 60 W, R = 240 Ω.

3. Un elemento tiene v = 5 V e i = −2 A entrando por su terminal +. ¿Absorbe o entrega potencia?

   p = −10 W: entrega 10 W.

4. ¿Cuántos julios hay en 2 kWh?

   7.2×10^6 J.

Ideas erróneas comunes

Mito: Una resistencia consume la corriente.

En realidad: La carga se conserva; sale la misma corriente que entra. Lo que se convierte es la energía, no la corriente.

Mito: La tensión existe en un punto.

En realidad: La tensión siempre es entre dos puntos; una «tensión de nodo» se mide respecto a una tierra elegida.

Mito: La potencia siempre es vi con signo más.

En realidad: Usa el convenio de signos pasivo para acertar el signo.

Tarjetas de estudio

Corriente

i = dq/dt, en A.

Tensión

Energía por unidad de carga, en V = J/C.

Potencia

p = vi.

Convenio de signos pasivo

Corriente que entra por el terminal +: p > 0, absorbe.

Ley de Ohm

kWh

v = iR.

3.6 MJ.

Cuestionario de autoevaluación

1. 1 A equivale a...

1 J/s

1 C/s

1 V/s

1 W/V²

1 C/s. Carga por segundo.

2. Duplicar la tensión en una resistencia multiplica su potencia por...

1

2

4

½

4. $p = v^2/R$.

3. Duplicar la longitud de un cable (misma sección) cambia su resistencia en un factor de...

½

1

2

4

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

4. 1 kWh equivale a...

1000 J

3600 J

3.6 MJ

60 kJ

3.6 MJ. 1000 W × 3600 s.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La iluminación es el lugar más sencillo para ver la potencia y la energía en acción. La guía de iluminación eficiente del Departamento de Energía de EE. UU. dice que los LED usan al menos un 75 por ciento menos de energía que las bombillas incandescentes, casi no emiten calor y duran 25 veces más.

Con p = vi y w = Pt, el ejemplo resuelto muestra lo que eso significa para una bombilla: cambiar una incandescente de 60 W por un LED de 15 W, usado 3 horas al día, ahorra unos 49.3 kWh al año. Multiplica por las decenas de bombillas de una vivienda y los millones de viviendas de un país, y se hacen visibles las centrales que nunca tienen que funcionar.

En Saving Planets: Física II · Soluciones

Fuentes: U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre la abstracción de circuito y la ley de Ohm.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interactivo.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Fuentes y resistencia interna.

Ver la clase

Lecture 22: Energy and Power (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-22/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para

estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

Leyes de Kirchhoff, resistencias en serie y en paralelo, y divisores de tensión y de corriente

Nodos, ramas y lazos, leyes de Kirchhoff de corrientes y tensiones, combinaciones en serie y en paralelo, resistencia equivalente, divisores de tensión y de corriente, transformaciones triángulo–estrella y medición con voltímetros y amperímetros.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Escribir la LCK y la LTK para cualquier circuito.
- Reducir redes serie–paralelo a una resistencia equivalente.
- Usar divisores de tensión y de corriente.
- Explicar cómo se conectan los medidores y cómo cargan un circuito.

Conceptos clave

- LCK: la suma de corrientes que salen de cualquier nodo es cero (la carga se conserva). LTK: la suma de tensiones alrededor de cualquier lazo cerrado es cero (la energía se conserva).
- Los elementos en serie llevan la misma corriente; las resistencias se suman: R_eq = R_1 + R_2 + ... Los elementos en paralelo comparten la misma tensión; las conductancias se suman: 1/R_eq = 1/R_1 + 1/R_2 + ...; para dos resistencias R_1R_2/(R_1 + R_2).
- Divisor de tensión: v_2 = v·R_2/(R_1 + R_2). Divisor de corriente (dos resistencias): i_1 = i·R_2/(R_1 + R_2); la mayor parte pasa por la resistencia menor.
- La transformación triángulo–estrella (Δ–Y) resuelve puentes que no están ni en serie ni en paralelo: R_Y = (producto de las dos resistencias Δ adyacentes)/(suma de las tres).
- Un voltímetro se conecta en paralelo y debe tener una resistencia muy alta; un amperímetro se conecta en serie y debe tener una resistencia muy baja.

Ecuaciones clave

$$\sum i_{\text{out}} = 0$$

```
i_out=0
```

KCL

$$\sum v = 0 \text{ around a loop}$$

```
v=0\ around a loop
```

KVL

$$R_s = R_1 + R_2, \;\; R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

`R_s=R_1+R_2,\ \ R_p=(R_1R_2)/(R_1+R_2)`

Serie y paralelo

$$v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}, \;\; i_1 = i\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v_2=v(R_2)/(R_1+R_2),\ \ i_1=i(R_2)/(R_1+R_2)`

Divisores de tensión y de corriente

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 Resistencias de 100, 200 y 300 Ω están en serie con 12 V. Halla la corriente y la tensión en la resistencia de 200 Ω.

1. R_eq = 600 Ω; i = 12/600 = 0.02 A.
2. v = 0.02 × 200.

Respuesta: i = 20 mA, v_{200} = 4 V.

Ejemplo 2.2 Una fuente de 9 V alimenta un divisor con R_1 = 10 kΩ arriba y R_2 = 5 kΩ abajo. Halla v_out en R_2.

1. v_out = 9 × 5/(10 + 5).

Respuesta: v_out = 3 V.

Ejemplo 2.3 Una corriente de 6 A se reparte entre 2 Ω y 4 Ω en paralelo. Halla cada corriente.

1. $i_{2\Omega}$ = 6 × 4/(2 + 4) = 4 A.
2. $i_{4\Omega}$ = 6 × 2/6 = 2 A; comprobación 4 + 2 = 6.

Respuesta: 4 A por 2 Ω y 2 A por 4 Ω.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla 6 Ω ‖ 3 Ω.

   18/9 = 2 Ω.

2. Tres resistencias de 30 Ω están en paralelo. Halla R_eq.

   10 Ω.

3. Halla R_eq de 10 Ω en serie con (20 Ω ‖ 20 Ω).

   10 + 10 = 20 Ω.

4. Tres corrientes entran en un nodo: 2 A, 3 A y −1 A. ¿Qué corriente sale?

   4 A.

Ideas erróneas comunes

Mito: La resistencia en paralelo es mayor que la resistencia más pequeña.

En realidad: Siempre es menor que la más pequeña.

Mito: Un divisor de tensión funciona con cualquier carga.

En realidad: Una carga en R_2 queda en paralelo con ella y reduce v_out salvo que su resistencia sea mucho mayor.

Mito: Un amperímetro se conecta en bornes del elemento.

En realidad: En bornes, un amperímetro de baja resistencia es casi un cortocircuito; va en serie.

Tarjetas de estudio

KCL

Las corrientes que salen de un nodo suman 0.

KVL

Las tensiones alrededor de un lazo suman 0.

Serie

Las R se suman; misma corriente.

Paralelo

Las G se suman; misma tensión.

Divisor de tensión

$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$.

Divisor de corriente

$i_1 = iR_2/(R_1 + R_2)$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La LCK expresa la conservación de...

la energía

la carga

la potencia

el flujo

la carga. La carga no puede acumularse en un nodo.

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

2R

R

R/2

R^2

R/2. R·R/(2R).

3. Los elementos en serie comparten la misma...

tensión

corriente

la potencia

resistencia

corriente. Un solo camino.

4. Un voltímetro ideal tiene resistencia...

cero

infinita

1 Ω

igual a la carga

infinita. No debe tomar corriente.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los paneles solares son circuitos en serie y en paralelo. La Energy Information Administration de EE. UU. explica que una célula FV solo puede producir 1 o 2 vatios, así que las células se conectan eléctricamente en paneles estancos, los paneles se conectan en conjuntos de dos a cientos de paneles, y el número de paneles fija cuánta electricidad puede generar un conjunto. Las células producen corriente continua, y los inversores la convierten en la corriente alterna que se usa en la red.

La conexión en serie suma tensiones y la conexión en paralelo suma corrientes. Como ejemplo, células de 0.5 V y 3 A (1.5 W, dentro del rango de 1–2 W de la EIA) dan 30 V a 3 A, o 90 W, cuando se conectan 60 en serie. La LCK y la LTK también explican por qué una sola célula sombreada en una cadena en serie puede hundir toda la cadena, y por eso los paneles incluyen diodos de derivación.

En Saving Planets: Física II · Parker Solar Probe

Fuentes: U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): LCK y LTK.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases de análisis básico de circuitos.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Interactivo.

Terminé esta unidad

Análisis sistemático: métodos de tensiones de nodo y de corrientes de malla

Elegir un nodo de referencia, escribir la LCK en términos de tensiones de nodo, supernodos, corrientes de malla y LTK, supermallas, circuitos con fuentes dependientes, y resolver los sistemas lineales resultantes a mano y con matrices.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Escribir y resolver ecuaciones de tensiones de nodo, incluidos supernodos.
- Escribir y resolver ecuaciones de corrientes de malla, incluidas supermallas.
- Tratar las fuentes dependientes en ambos métodos.
- Elegir el método que da menos ecuaciones.

Conceptos clave

- Método de tensiones de nodo: elige un nodo de tierra, nombra las demás tensiones de nodo, escribe la LCK en cada nodo que no sea de referencia usando la ley de Ohm (la corriente de a a b a través de R es (v_a − v_b)/R) y resuelve.
- Una fuente de tensión entre dos nodos que no son de referencia forma un supernodo: escribe una LCK para la región combinada más la ecuación de la fuente v_a − v_b = V_s.
- Método de corrientes de malla (circuitos planos): asigna una corriente en sentido horario a cada ventana y escribe la LTK en cada malla; una resistencia compartida lleva la diferencia de las dos corrientes de malla.
- Una fuente de corriente compartida por dos mallas forma una supermalla: una LTK alrededor del lazo combinado más la ecuación de la fuente.
- Un circuito de N nodos necesita N − 1 ecuaciones de nodo; un circuito con M mallas necesita M ecuaciones de malla. Elige el conjunto menor. Las ecuaciones forman Gv = i o Ri = v, un sistema lineal.

Ecuaciones clave

$$\sum_{\text{branches}} \frac{v_n - v_k}{R_{nk}} = i_{\text{source into } n}$$

```
_branches_n-v_kR_nk=i_source into n
```

LCK en el nodo n

$$\sum_{\text{mesh}} R\,(i_m - i_{\text{adj}}) = \sum v_{\text{sources}}$$

`_mesh R (i_m-i_adj)= v_sources`

LTK en la malla m

$$G\mathbf{v} = \mathbf{i}$$

Forma matricial nodal

$$R\mathbf{i} = \mathbf{v}$$

Forma matricial de mallas

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Una fuente de 10 V alimenta el nodo 1 a través de 2 Ω. El nodo 1 tiene 4 Ω a tierra y 2 Ω al nodo 2; el nodo 2 tiene 4 Ω a tierra y una fuente de 1 A que entra en él. Halla v_1 y v_2.

1. Nodo 1 (×4): $2(v_1 - 10) + v_1 + 2(v_1 - v_2) = 0$, así que $5v_1 - 2v_2 = 20$.
2. Nodo 2 (×4): $2(v_2 - v_1) + v_2 - 4 = 0$, así que $-2v_1 + 3v_2 = 4$.
3. det = 15 − 4 = 11; $v_1 = (60 + 8)/11$, $v_2 = (20 + 40)/11$.

Respuesta: $v_1 = 6.182$ V, $v_2 = 5.455$ V.

Ejemplo 3.2 La malla 1 tiene una fuente de 10 V y 2 Ω; la malla 2 tiene 6 Ω; las mallas comparten 4 Ω. Halla las corrientes de malla y la corriente en la resistencia compartida.

1. Malla 1: $6i_1 - 4i_2 = 10$. Malla 2: $-4i_1 + 10i_2 = 0$.
2. det = 60 − 16 = 44; $i_1 = 100/44$, $i_2 = 40/44$.

Respuesta: $i_1 = 2.273$ A, $i_2 = 0.909$ A; la resistencia compartida lleva 1.364 A.

Ejemplo 3.3 Una fuente de 5 V está entre los nodos a y b ($v_a - v_b = 5$). El nodo a tiene 1 Ω a tierra, el nodo b tiene 4 Ω a tierra y se inyectan 2 A en el supernodo. Halla v_a y v_b.

1. LCK del supernodo: $v_a/1 + v_b/4 = 2$.
2. Sustituye $v_a = v_b + 5$: $v_b + 5 + v_b/4 = 2$, así que $1.25v_b = -3$.

Respuesta: $v_b = -2.4$ V, $v_a = 2.6$ V.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Cuántas ecuaciones de nodo necesita un circuito con 5 nodos?

   4.

2. Un único nodo a tensión v se conecta mediante 2 Ω a 6 V y mediante 2 Ω a tierra. Halla v.

   $(v - 6)/2 + v/2 = 0$: $v = 3$ V.

3. Dos mallas comparten una resistencia de 3 Ω; $i_1 = 2$ A e $i_2 = 0.5$ A, ambas en sentido horario. Halla la corriente en la resistencia compartida.

   1.5 A en el sentido de i_1.

4. Escribe $5v_1 - 2v_2 = 20$, $-2v_1 + 3v_2 = 4$ como $Gv = i$.

   $G = [[5, -2], [-2, 3]]$, $i = (20, 4)$.

Ideas erróneas comunes

Mito: La LCK también puede escribirse en el nodo de referencia.
En realidad: Da una ecuación dependiente; usa N − 1 nodos.

Mito: Las corrientes de malla son las corrientes de rama.
En realidad: Solo en las ramas exteriores; las ramas compartidas llevan diferencias.

Mito: La corriente de una fuente de tensión es cero porque no tiene resistencia.
En realidad: Su corriente la fija el resto del circuito; por eso se usan supernodos.

Tarjetas de estudio

Nodo de referencia

Tierra, v = 0.

Método de tensiones de nodo

LCK en N − 1 nodos.

Supernodo

Fuente de tensión entre dos nodos.

Método de corrientes de malla

LTK en cada ventana.

Supermalla

Fuente de corriente compartida por dos mallas.

Gv = i

Ecuaciones nodales en forma matricial.

Cuestionario de autoevaluación

1. ¿Cuántas ecuaciones de tensiones de nodo necesita un circuito con 4 nodos?

2

3

4

5

3. N − 1.

2. Una fuente de tensión entre dos nodos que no son de referencia requiere...

una supermalla

un supernodo

un cortocircuito

superposición

un supernodo. Combina los dos nodos.

3. La corriente en una resistencia compartida por las mallas 1 y 2 es...

$i_1 + i_2$

$i_1 - i_2$

$i_1 i_2$

cero

$i_1 - i_2$. Ambas circulan en sentido horario en su propia malla.

4. Las ecuaciones de nodo forman...

una ecuación diferencial

un sistema lineal Gv = i

una ecuación cuadrática

solo un determinante

un sistema lineal Gv = i. Los circuitos resistivos lineales son sistemas lineales.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La red eléctrica es un enorme problema de análisis nodal. La EIA explica que la red de EE. UU. está formada por miles de millas de líneas de alta tensión y millones de millas de líneas de baja tensión que conectan miles de centrales con cientos de millones de clientes. A principios del siglo 20 funcionaban más de 4000 compañías aisladas; hoy los 48 estados contiguos operan como tres grandes interconexiones, Este, Oeste y ERCOT, enlazadas para ofrecer múltiples caminos al flujo de energía.

La EIA señala que la oferta debe igualar la demanda en todo momento y que las autoridades de balance las mantienen iguales. Los operadores de red lo hacen con modelos de flujo de potencia cuyas ecuaciones son la versión en CA del método de tensiones de nodo de esta unidad, resuelta para miles de barras, y el mismo análisis indica a los planificadores dónde hacen falta nuevas líneas para conectar la eólica y la solar lejos de las ciudades.

En Saving Planets: Álgebra lineal · Soluciones

Fuentes: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre el método de nodos y la superposición.
- OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Circuitos de varios lazos.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Comprueba tus tensiones de nodo.
- Interactive Linear Algebra (Georgia Tech) (https://textbooks.math.gatech.edu/ila/): Resolver los sistemas lineales.

Ver la clase

Lecture 2: Basic Circuit Analysis Method (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-2/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Teoremas de circuitos: linealidad, superposición, transformación de fuentes, Thevenin, Norton y máxima transferencia de potencia

Linealidad y superposición, transformaciones de fuentes, circuitos equivalentes de Thevenin y Norton, cálculo de R_Th desactivando fuentes o con una fuente de prueba, y el teorema de máxima transferencia de potencia.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar la superposición para analizar circuitos con varias fuentes.
- Convertir entre fuentes de tensión y de corriente.
- Hallar equivalentes de Thevenin y Norton.
- Elegir una carga para máxima transferencia de potencia y calcular esa potencia.

Conceptos clave

- Linealidad: en un circuito de resistencias y fuentes, toda tensión y corriente es una combinación lineal de los valores de las fuentes. Superposición: halla la respuesta a cada fuente independiente sola (las demás fuentes de tensión en cortocircuito, las de corriente en abierto) y suma.
- Transformación de fuentes: una fuente de tensión V en serie con R equivale, en sus terminales, a una fuente de corriente V/R en paralelo con R.
- Teorema de Thevenin: cualquier red lineal de dos terminales se ve como una fuente V_Th en serie con R_Th. V_Th es la tensión en circuito abierto; R_Th es la resistencia vista con las fuentes independientes apagadas (o V_oc/i_sc).
- Teorema de Norton: la misma red es una fuente de corriente I_N = i_sc en paralelo con R_N = R_Th; V_Th = I_N R_Th.
- Máxima transferencia de potencia: una carga recibe la mayor potencia cuando R_L = R_Th, y entonces P_max = V_Th²/(4R_Th). El rendimiento en ese punto es solo del 50 %, así que los sistemas eléctricos se diseñan en cambio para R_L ≫ R_source.

Ecuaciones clave

$$v = \sum_k v^{(k)}$$

v=_k v^(k)

Superposición

$$V_{Th} = v_{oc},\ \ R_{Th} = \frac{v_{oc}}{i_{sc}}$$

V_Th=v_oc,\ \ R_Th=_oci_sc

Equivalente de Thevenin

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{Th}}$$

I_N=_ThR_Th

Corriente de Norton

$$P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}} \text{ at } R_L = R_{Th}$$

P_=_Th^24R_Th\ at\ R_L=R_Th

Máxima transferencia de potencia

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Una fuente de 12 V en serie con 4 Ω alimenta los terminales a–b, con 12 Ω entre a y b. Halla los equivalentes de Thevenin y Norton.

1. V_Th = 12 × 12/(4 + 12) = 9 V (divisor).
2. R_Th = 4 ‖ 12 = 48/16 = 3 Ω (fuente en cortocircuito).
3. I_N = 9/3.

Respuesta: V_Th = 9 V, R_Th = 3 Ω; I_N = 3 A.

Ejemplo 4.2 Para ese circuito, halla la potencia en una carga de 6 Ω y la máxima potencia posible en la carga.

1. i = 9/(3 + 6) = 1 A; P = 1² × 6 = 6 W.
2. Máximo con R_L = 3 Ω: P_max = 9²/(4 × 3).

Respuesta: 6 W; P_max = 6.75 W con 3 Ω.

Ejemplo 4.3 Un nodo se conecta a una fuente de 10 V mediante 5 Ω, a tierra mediante 5 Ω, y recibe una fuente de corriente de 2 A. Halla la tensión del nodo por superposición.

1. 10 V sola (2 A en abierto): el divisor da 5 V.
2. 2 A sola (10 V en cortocircuito): 2 × (5 ‖ 5) = 5 V.
3. Suma las dos.

Respuesta: v = 10 V. Comprobación por LCK: (10 − 10)/5 + 2 = 10/5.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Convierte una fuente de 6 V en serie con 2 Ω a forma de Norton.

   3 A en paralelo con 2 Ω.

2. Una red tiene v_oc = 15 V e i_sc = 5 A. Halla R_Th.

   3 Ω.

3. ¿Qué carga recibe la máxima potencia de V_Th = 20 V, R_Th = 5 Ω, y cuánta?

   R_L = 5 Ω, P = 400/20 = 20 W.

4. ¿Puede la superposición sumar potencias?

   No: la potencia no es lineal; suma tensiones o corrientes y luego calcula la potencia.

Ideas erróneas comunes

Mito: Apagar una fuente de tensión significa quitarla.
En realidad: Sustitúyela por un cortocircuito; una fuente de corriente pasa a ser un circuito abierto.

Mito: Máxima transferencia de potencia significa máximo rendimiento.
En realidad: Con R_L = R_Th, la mitad de la potencia se pierde en R_Th.

Mito: Las fuentes dependientes se apagan para hallar R_Th.
En realidad: Mantén las fuentes dependientes; usa una fuente de prueba para hallar R_Th.

Tarjetas de estudio

Superposición

Suma las respuestas a cada fuente sola.

Transformación de fuentes

V en serie con R ↔ V/R en paralelo con R.

Thevenin

Norton

V_Th en serie con R_Th.

I_N en paralelo con R_N.

R_Th

v_oc/i_sc.

Potencia máxima

$V_{Th}^2/(4R_{Th})$ con $R_L = R_{Th}$.

Cuestionario de autoevaluación

1. Para hallar R_Th, las fuentes de tensión independientes se sustituyen por...

circuitos abiertos

cortocircuitos

resistencias

fuentes de corriente

cortocircuitos. Cero voltios es un cortocircuito.

2. V_Th es la...

corriente de cortocircuito

tensión en circuito abierto

siempre la tensión de la fuente

tensión de la carga

tensión en circuito abierto. Se mide sin nada conectado.

3. La máxima transferencia de potencia ocurre cuando...

$R_L = 0$

$R_L = R_{Th}$

$R_L \to \infty$

$R_L = 2R_{Th}$

R_L = R_Th. Carga adaptada.

4. El rendimiento en la máxima transferencia de potencia es...

25%

50%

75%

100%

50%. Igual potencia en R_Th y R_L.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Las células solares se comportan como fuentes cuyo punto de trabajo tipo Thevenin cambia con la luz solar y la temperatura, así que su electrónica busca constantemente la carga que extrae más potencia. La parte de la luz solar que convierten en electricidad ha mejorado de forma constante: la EIA informa que los paneles FV comerciales tenían de media menos del 10 % de eficiencia a mediados de los años 1980, alrededor del 15 % en 2015, y hoy se acercan al 25 % en los módulos más avanzados, mientras que células experimentales y espaciales han llegado casi al 50 %.

La EIA informa también que las plantas FV a gran escala de EE. UU. generaron unos 292 mil millones de kWh en 2025, frente a 6 millones de kWh en 2004, y los pequeños sistemas en tejado unos 93 mil millones de kWh. Ajustar cada cadena de paneles a su mejor punto de trabajo, la idea detrás de la máxima transferencia de potencia, es parte de cómo se exprimen esos kilovatios hora de cada metro cuadrado.

En Saving Planets: Física II · Espacio

Fuentes: U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre los equivalentes de Thevenin y Norton.
- OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force): Resistencia interna y tensión en bornes.

- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Mide v_oc e i_sc.
- 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): Resistencia equivalente.

Ver la clase

Lecture 3: Superposition, Thévenin and Norton (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-3/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Amplificadores operacionales

El amplificador operacional ideal y sus dos reglas, amplificadores inversor y no inversor, seguidores de tensión, amplificadores sumador y diferencial, saturación, etapas en cascada y amplificadores operacionales en sensores y medida.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Aplicar las reglas del amplificador operacional ideal con realimentación negativa.
- Analizar circuitos inversor, no inversor, seguidor, sumador y diferencial.
- Reconocer la saturación y sus límites.
- Diseñar un amplificador sencillo para la señal de un sensor.

Conceptos clave

- Un amplificador operacional amplifica la diferencia entre sus entradas con una ganancia muy grande. Con realimentación negativa, las reglas ideales son: no entra corriente en ninguna entrada, y las dos tensiones de entrada son iguales ($v_+ = v_-$).
- Amplificador inversor: v_o = −(R_f/R_in)v_in. Amplificador no inversor: v_o = (1 + R_f/R_g)v_in. Seguidor de tensión (buffer): v_o = v_in casi sin tomar corriente de la fuente.
- Amplificador sumador: v_o = −R_f(v_1/R_1 + v_2/R_2 + …). Amplificador diferencial con relaciones iguales: v_o = (R_2/R_1)(v_2 − v_1).
- La salida no puede superar las tensiones de alimentación; más allá, el amplificador se satura y las reglas lineales dejan de valer.
- Las etapas en cascada multiplican sus ganancias y, como la salida de un amplificador operacional actúa como una fuente de tensión ideal, una etapa no queda cargada por la siguiente.

Ecuaciones clave

$$v_+ = v_-,\ \ i_+ = i_- = 0$$

`v_+=v_-,\ \ i_+=i_-=0`

Reglas del amplificador operacional ideal (realimentación negativa)

$$v_o = -\frac{R_f}{R_{in}} v_{in}$$

`v_o=-_fR_inv_in`

Amplificador inversor

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) v_{in}$$

v_o=(1+(R_f)/(R_g))v_in

Amplificador no inversor

$$v_o = -R_f \sum_k \frac{v_k}{R_k}$$

v_o=-R_f_k(v_k)/(R_k)

Amplificador sumador

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Un amplificador inversor tiene R_in = 10 kΩ y R_f = 100 kΩ. Halla la ganancia y v_o para v_in = 0.2 V.

1. Ganancia = −100/10 = −10.
2. v_o = −10 × 0.2.

Respuesta: Ganancia −10, v_o = −2 V.

Ejemplo 5.2 Diseña un amplificador no inversor con ganancia 10 usando R_g = 1 kΩ.

1. 1 + R_f/R_g = 10, así que R_f/R_g = 9.

Respuesta: R_f = 9 kΩ.

Ejemplo 5.3 Un amplificador sumador tiene R_f = R_1 = R_2 = 10 kΩ, v_1 = 1 V y v_2 = 2 V. Halla v_o. ¿Y si la alimentación es de ±12 V y se sube la ganancia para que la respuesta ideal sea −15 V?

1. v_o = −10k(1/10k + 2/10k) = −3 V.
2. La salida no puede bajar de la alimentación de −12 V.

Respuesta: v_o = −3 V; con la ganancia mayor se satura cerca de −12 V.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la ganancia de un amplificador inversor con R_f = 47 kΩ y R_in = 4.7 kΩ.

   −10.

2. Un seguidor de tensión tiene v_in = 1.5 V. Halla v_o.

   1.5 V.

3. Dos etapas con ganancias −10 y 5 están en cascada. Halla la ganancia total.

   −50.

4. Un amplificador diferencial con $R_2/R_1 = 4$ tiene $v_2 = 1.2$ V y $v_1 = 1.0$ V. Halla v_o.

   4 × 0.2 = 0.8 V.

Ideas erróneas comunes

Mito: Las entradas del amplificador operacional toman la corriente del circuito.
En realidad: Idealmente no entra corriente en las entradas; circula por R_f.

Mito: $v_+ = v_-$ siempre.
En realidad: Solo con realimentación negativa y sin saturación.

Mito: La ganancia puede ser tan grande como quieras.
En realidad: La salida está limitada por la alimentación y el ancho de banda real del amplificador.

Tarjetas de estudio

Amplificador operacional ideal

$v_+ = v_-$, sin corriente de entrada.

Inversor

−R_f/R_in.

No inversor

1 + R_f/R_g.

Seguidor

Buffer de ganancia 1.

Sumador

−R_f Σ v_k/R_k.

Saturación

Salida limitada por la alimentación.

Cuestionario de autoevaluación

1. Con realimentación negativa, un amplificador operacional ideal crea...

$v_+ = 0$

$v_+ = v_-$

$v_o = 0$

$i_o = 0$

$v_+ = v_-$. Cortocircuito virtual.

2. Un amplificador inversor con $R_f = 20\ k\Omega$, $R_{in} = 5\ k\Omega$ tiene ganancia...

4

−4

5

−5

−4. $-R_f/R_{in}$.

3. Un seguidor de tensión se usa para...

sumar señales

aislar una fuente

invertir

integrar

aislar una fuente. Ganancia 1, sin carga.

4. La ganancia mínima de un amplificador no inversor es...

0

1

−1

10

1. 1 + R_f/R_g ≥ 1.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Una red más inteligente empieza por medir, y medir señales pequeñas es el trabajo del amplificador operacional. La EIA explica que la red inteligente combina la tecnología digital con el sistema eléctrico tradicional para que las compañías y los clientes puedan enviar y recibir información, lo que ayuda a las compañías a reducir pérdidas de electricidad y a detectar y resolver problemas más rápido, y que los dispositivos inteligentes en las líneas y subestaciones permiten gestionar la tensión de forma más eficiente y localizar rápidamente un apagón.

Cada contador inteligente y sensor de línea amplifica la diminuta señal de un sensor de corriente o de un divisor de tensión hasta un rango que un convertidor digital pueda leer, usando exactamente los amplificadores inversor, no inversor y diferencial de esta unidad. La EIA añade que los dispositivos inteligentes pueden avisar a los clientes cuando los precios son altos para que desplacen su consumo fuera de los momentos de demanda muy alta.

En Saving Planets: Introducción a la programación · Soluciones

Fuentes: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre la abstracción del amplificador operacional.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Redes de resistencias para fijar la ganancia.
- 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): Divisores usados en la realimentación.
- OpenStax UP2, 9.4 Ohm's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-4-ohms-law): Repaso.

Ver la clase

Lecture 19: The Operational Amplifier Abstraction (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-19/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

UNIDAD 6 · SEMANA 8

Condensadores e inductores

Capacitancia e inductancia, sus relaciones corriente–tensión, energía almacenada, continuidad de la tensión del condensador y de la corriente del inductor, combinaciones en serie y en paralelo, comportamiento en régimen permanente de CC, e integradores y derivadores con amplificador operacional.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Usar i = C dv/dt y v = L di/dt.
- Calcular la energía almacenada en condensadores e inductores.
- Combinar condensadores e inductores en serie y en paralelo.
- Hallar tensiones y corrientes en régimen permanente de CC en circuitos con C y L.

Conceptos clave

- Un condensador almacena energía en un campo eléctrico: q = Cv, i = C dv/dt, w = ½Cv². Su tensión no puede saltar instantáneamente; en régimen permanente de CC actúa como un circuito abierto.
- Un inductor almacena energía en un campo magnético: v = L di/dt, w = ½Li². Su corriente no puede saltar instantáneamente; en régimen permanente de CC actúa como un cortocircuito.
- Los condensadores en paralelo se suman; en serie se combinan como resistencias en paralelo. Los inductores se combinan como resistencias: en serie se suman, en paralelo se combinan los inversos.
- Un amplificador operacional con un condensador como realimentación integra: v_o = −(1/RC)∫v_in dt. Intercambiar R y C da un derivador.
- Los condensadores e inductores ideales almacenan y devuelven energía sin pérdidas; los reales tienen una pequeña resistencia y fugas.

Ecuaciones clave

$$i = C\frac{dv}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Cv^2$$

`i=Cdv/dt,\ \ w=12Cv^2`

Condensador

$$v = L\frac{di}{dt},\ \ w = \tfrac{1}{2}Li^2$$

`v=Ldi/dt,\ \ w=12Li^2`

Inductor

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

C_p=C_1+C_2,\ \ (1)/(C_s)=(1)/(C_1)+(1)/(C_2)

Combinaciones de condensadores

$$v_o = -\frac{1}{RC}\int v_{in}\, dt$$

v_o=-1/RC v_in dt

Integrador con amplificador operacional

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 La tensión de un condensador de 10 µF sube a 2 V/ms. Halla su corriente.

1. dv/dt = 2000 V/s.
2. i = 10 × 10⁻⁶ × 2000.

Respuesta: i = 20 mA.

Ejemplo 6.2 Halla la energía en un condensador de 1000 µF a 3 V y en un inductor de 0.2 H por el que circulan 3 A.

1. w_C = ½ × 10⁻³ × 3² = 4.5 × 10⁻³ J.
2. w_L = ½ × 0.2 × 3².

Respuesta: 4.5 mJ y 0.9 J.

Ejemplo 6.3 Una fuente de CC de 12 V alimenta 2 Ω en serie con un inductor, con una resistencia de 4 Ω en paralelo con un condensador en la salida (régimen permanente). Halla la corriente del inductor y la tensión del condensador.

1. En CC el inductor es un cortocircuito y el condensador un circuito abierto.
2. i = 12/(2 + 4) = 2 A; v_C = 2 × 4.

Respuesta: i_L = 2 A, v_C = 8 V.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla 6 µF y 3 µF en serie.

   2 µF.

2. La corriente de un inductor de 50 mH cambia a 100 A/s. Halla su tensión.

   5 V.

3. Halla 4 mH y 6 mH en serie.

   10 mH.

4. ¿Cuánta carga almacena un condensador de 100 µF a 9 V?

   q = 0.9 mC.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un condensador deja pasar la CC.
En realidad: En régimen permanente de CC bloquea la corriente (circuito abierto).

Mito: La corriente de un inductor puede cambiar instantáneamente.
En realidad: Haría falta una tensión infinita; la corriente es continua.

Mito: Los condensadores se combinan como las resistencias.
En realidad: Se combinan al revés: en paralelo se suman.

Tarjetas de estudio

Condensador

$i = C\,dv/dt$.

Inductor

$v = L\,di/dt$.

Energía del condensador

$\frac{1}{2}Cv^2$.

Energía del inductor

$\frac{1}{2}Li^2$.

Régimen permanente de CC

C abierto, L en cortocircuito.

Integrador

$v_o = -(1/RC)\int v_{in}\,dt$.

Cuestionario de autoevaluación

1. En régimen permanente de CC un inductor actúa como...

un circuito abierto

un cortocircuito

una resistencia

una fuente

un cortocircuito. di/dt = 0, así que v = 0.

2. Duplicar la tensión de un condensador multiplica su energía por...

2

4

½

1

4. $w \propto v^2$.

3. ¿Cuál no puede cambiar instantáneamente?

la corriente del condensador

la tensión del condensador

la tensión del inductor

la corriente de la resistencia

la tensión del condensador. Haría falta una corriente infinita.

4. Dos condensadores de 10 µF en paralelo dan...

5 µF

10 µF

20 µF

100 µF

20 µF. Los condensadores en paralelo se suman.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Almacenar energía es lo que permite usar la energía solar y eólica tras la puesta del sol o cuando amaina el viento. La EIA informó en agosto de 2026 que la capacidad de almacenamiento en baterías a gran escala de EE. UU. creció de media un 70 % anual en los últimos tres años, hasta 43.6 GW a finales de 2025, y que los operadores añadieron otros 8.3 GW en el primer semestre de 2026, hasta casi 52 GW, con unos 54 GW más previstos en los próximos dos años y medio.

La EIA señala que las plantas solares albergan las mayores unidades de baterías y que la combinación solar más almacenamiento permite guardar la energía cuando los precios son bajos y descargarla cuando son altos. Las baterías almacenan la energía químicamente, pero los condensadores e inductores de esta unidad están en cada inversor y cargador de baterías, suavizando corrientes y almacenando energía durante microsegundos mientras la potencia se convierte entre CC y CA.

En Saving Planets: Física II · Soluciones

Fuentes: U.S. EIA: Battery storage capacity averaged 70% growth over the last three years (Aug. 7, 2026) (https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67925) · OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Inductancia.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interactivo.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre condensadores y sistemas de primer orden.

☐ **Terminé esta unidad**

Circuitos de primer orden: transitorios RC y RL

Respuestas natural y al escalón de circuitos RC y RL, la constante de tiempo, la solución general x(t) = x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ), problemas de conmutación y energía en la conmutación digital.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Hallar valores iniciales y finales en una conmutación.
- Calcular constantes de tiempo τ = RC y τ = L/R.
- Escribir y usar la solución general de primer orden.
- Estimar la energía y la potencia de conmutación en circuitos digitales.

Conceptos clave

- Un circuito con un condensador o un inductor (más resistencias y fuentes de CC) obedece una ecuación diferencial de primer orden. Su respuesta pasa exponencialmente de un valor inicial a un valor final.
- Constante de tiempo: τ = R_Th C en un circuito RC y τ = L/R_Th en un circuito RL, donde R_Th es la resistencia que ve el C o el L.
- Solución general: x(t) = x(∞) + [x(0⁺) − x(∞)] e^(−t/τ). Tras una τ el cambio se ha completado en un 63.2 %; tras 5τ, en un 99.3 %.
- Usa la continuidad: v_C(0⁺) = v_C(0⁻) e i_L(0⁺) = i_L(0⁻). Halla x(∞) a partir del régimen permanente de CC (C abierto, L en cortocircuito).
- Cargar una capacitancia C hasta V a través de una resistencia toma CV² de la fuente: ½CV² se almacena y ½CV² se pierde como calor. Los chips digitales cargan capacitancias diminutas miles de millones de veces por segundo, así que su potencia dinámica es aproximadamente P = αCV²f.

Ecuaciones clave

$$\tau = RC, \;\; \tau = \frac{L}{R}$$

τ=RC,\ \ τ=L/R

Constantes de tiempo

$$x(t) = x(\infty) + [x(0^+) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

x(t)=x(∞)+[x(0^+)-x(∞)]e^-t/τ

Respuesta general de primer orden

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

`v_C(t)=V(1-e^-t/RC)`

Carga RC desde cero

$$P_{dyn} \approx \alpha C V^2 f$$

Potencia de conmutación digital

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Un condensador de 1000 µF se carga a través de 10 kΩ desde una fuente de 3 V, partiendo de 0 V. Halla τ, v_C en t = τ y el tiempo para llegar al 99.3 % de 3 V.

1. τ = $10^4 \times 10^{-3}$ = 10 s.
2. v_C(τ) = 3(1 − e^{-1}) = 3 × 0.632.
3. El 99.3 % requiere 5τ.

Respuesta: τ = 10 s, v_C(τ) = 1.90 V, unos 50 s.

Ejemplo 7.2 Un inductor de 0.5 H en serie con 10 Ω se conecta a 20 V en t = 0. Halla τ, la corriente final e i(0.1 s).

1. τ = 0.5/10 = 0.05 s; i(∞) = 20/10 = 2 A.
2. i(0.1) = 2(1 − e^(−0.1/0.05)) = 2(1 − e^{-2}).

Respuesta: τ = 50 ms, i(∞) = 2 A, i(0.1 s) = 1.73 A.

Ejemplo 7.3 Un condensador cargado se descarga a través de una resistencia con τ = 10 s. ¿Cuándo llega su tensión a la mitad del valor inicial?

1. V_0e^(−t/τ) = V_0/2 da t = τ ln 2.

Respuesta: t = 6.93 s.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla τ para 2 kΩ y 50 µF.

   0.1 s.

2. Tras 3τ, ¿qué fracción del cambio se ha completado?

   $1 - e^{-3} = 95.0\%$.

3. Halla τ para 20 mH y 4 Ω.

   5 ms.

4. Chip de ejemplo: C conmutada efectiva = 1 nF, V = 1 V, f = 1 GHz, α = 1. Halla P, y P a 0.8 V.

   1 W; 0.64 W, un 36 % menos.

Ideas erróneas comunes

Mito: La tensión del condensador salta al cerrarse el interruptor.
En realidad: La tensión del condensador es continua; su corriente puede saltar.

Mito: La respuesta termina tras una constante de tiempo.
En realidad: Una τ es el 63.2 %; usa unas 5τ para «terminado».

Mito: τ usa solo la resistencia de la fuente.
En realidad: Usa la resistencia de Thevenin que ve el condensador o el inductor.

Tarjetas de estudio

Constante de tiempo RC

τ = RC.

Constante de tiempo RL

τ = L/R.

Solución general

x(∞) + [x(0) − x(∞)]e^(−t/τ).

Una τ

El 63.2 % del cambio.

Cinco τ

99.3%.

Potencia de conmutación

$P \approx \alpha C V^2 f$.

Cuestionario de autoevaluación

1. τ para un circuito RC es...

R/C

RC

1/RC

√(RC)

RC. En segundos.

2. Tras una constante de tiempo, un condensador que se carga llega a aproximadamente...

37%

50%

63%

99%

63%. $1 - e^{-1}$.

3. Bajar un 20 % la tensión de alimentación de un chip reduce su potencia dinámica en aproximadamente...

20%

36%

50%

64%

36%. $0.8^2 = 0.64$.

4. La corriente del inductor en $t = 0^+$ es igual a...

siempre cero

su valor en 0^-

el valor final

V/R

su valor en 0^-. Continuidad.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Cada bit que cambia un ordenador carga y descarga una capacitancia diminuta a través de una resistencia, y por eso la computación usa tanta electricidad. Un informe del Berkeley Lab para el Departamento de Energía de EE. UU. halló que los centros de datos consumieron alrededor del 4.4 % de la electricidad total de EE. UU. en 2023, que su consumo subió de 58 TWh en 2014 a 176 TWh en 2023, y que se espera que usen de 325 a 580 TWh, o del 6.7 % al 12 % de la electricidad del país, para 2028, con un crecimiento impulsado en gran parte por los servidores de SI.

La fórmula de potencia de conmutación de esta unidad muestra la principal palanca de los diseñadores de chips: la potencia crece con el cuadrado de la tensión de alimentación, así que una tensión un 20 % menor reduce la potencia dinámica un 36 % (ejemplo). El investigador principal del informe dice que saber qué impulsa el crecimiento ayuda a identificar oportunidades de eficiencia.

En Saving Planets: Introducción a la programación · Ecuaciones diferenciales

Fuentes: Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/) · OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Transitorios en inductores.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre transitorios de primer orden y la energía en circuitos digitales.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Observa cómo se cargan los condensadores.

Ver la clase

Lecture 12: Capacitors and First-Order Systems (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-12/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Circuitos de segundo orden: respuestas natural y al escalón de circuitos RLC

Circuitos RLC en serie y en paralelo, la ecuación característica, la frecuencia neperiana α y la frecuencia de resonancia ω_0, respuestas sobreamortiguada, críticamente amortiguada y subamortiguada, factor de calidad e intercambio de energía LC.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Escribir la ecuación de segundo orden de circuitos RLC en serie y en paralelo.
- Calcular α, ω_0 y ω_d y clasificar el amortiguamiento.
- Hallar la forma de la respuesta y sus constantes a partir de las condiciones iniciales.
- Relacionar Q con las oscilaciones y la pérdida de energía.

Conceptos clave

- Un circuito con un inductor y un condensador obedece una ecuación de segundo orden. Para un RLC en serie: α = R/(2L), ω_0 = 1/√(LC). Para un RLC en paralelo: α = 1/(2RC), mismo ω_0.
- Raíces s = −α ± √(α² − ω_0^2). Sobreamortiguado (α > ω_0): dos raíces reales, sin oscilación. Críticamente amortiguado (α = ω_0): retorno más rápido sin sobreimpulso. Subamortiguado (α < ω_0): oscilación amortiguada a ω_d = √(ω_0^2 − α²).
- Un circuito LC ideal (R = 0) intercambia energía entre el campo eléctrico del condensador y el campo magnético del inductor indefinidamente a ω_0.
- Factor de calidad de un RLC en serie: Q = ω_0L/R = (1/R)√(L/C). Un Q alto significa resonancia aguda y oscilaciones largas.
- Resistencia crítica de un RLC en serie: R = 2√(L/C).

Ecuaciones clave

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \;\; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

α=R/2L,\ \ ω_0=1

Parámetros del RLC en serie

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

s_1,2=-αα^2-ω_0^2

Raíces características

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

ω_d=ω_0^2-α^2

Frecuencia amortiguada

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}$$

Q=(ω_0L)/(R)

Factor de calidad (serie)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 Un RLC en serie tiene R = 10 Ω, L = 10 mH y C = 10 μF. Halla ω_0, f_0, α y el tipo de amortiguamiento.

1. $\omega_0 = 1/\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})} = 1/\sqrt{10^{-7}} = 3162$ rad/s; $f_0 = \omega_0/2\pi$.
2. $\alpha = 10/(2 \times 0.01) = 500\ s^{-1} < \omega_0$.

Respuesta: $\omega_0 = 3162$ rad/s, $f_0 = 503.3$ Hz, $\alpha = 500\ s^{-1}$: subamortiguado.

Ejemplo 8.2 Para el mismo circuito halla ω_d y Q.

1. $\omega_d = \sqrt{(3162^2 - 500^2)} = \sqrt{(10^7 - 2.5 \times 10^5)}$.
2. $Q = 3162 \times 0.01/10$.

Respuesta: ω_d = 3122.5 rad/s, Q = 3.16.

Ejemplo 8.3 ¿Qué resistencia haría ese circuito críticamente amortiguado?

1. $R = 2\sqrt{(L/C)} = 2\sqrt{(0.01/10^{-5})} = 2\sqrt{1000}$.

Respuesta: R = 63.2 Ω.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un RLC en serie tiene $\alpha = 200\ s^{-1}$ y $\omega_0 = 100$ rad/s. Clasifícalo.

Sobreamortiguado.

2. Halla ω_0 para L = 1 mH, C = 1 µF.

   31623 rad/s (5.03 kHz).

3. Un RLC en paralelo tiene R = 1 kΩ y C = 1 µF. Halla α.

   $1/(2 \times 10^3 \times 10^{-6}) = 500\ s^{-1}$.

4. Duplicar R en un RLC en serie cambia Q en un factor...

   Un factor ½.

Ideas erróneas comunes

Mito: α tiene la misma fórmula para RLC en serie y en paralelo.
En realidad: Serie α = R/2L; paralelo α = 1/(2RC).

Mito: Críticamente amortiguado significa que oscila.
En realidad: Es la frontera: sin oscilación, asentamiento más rápido.

Mito: ω_d es igual a ω_0.
En realidad: ω_d es menor siempre que hay amortiguamiento.

Tarjetas de estudio

Frecuencia neperiana

α = R/2L (serie).

Frecuencia de resonancia

$\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

Sobreamortiguado

$\alpha > \omega_0$.

Subamortiguado

$\alpha < \omega_0$, oscila a ω_d.

R crítica

$2\sqrt{(L/C)}$ (serie).

Q

$\omega_0 L/R$.

Cuestionario de autoevaluación

1. Subamortiguado significa...

$\alpha > \omega_0$

$\alpha = \omega_0$

$\alpha < \omega_0$

solo R = 0

$\alpha < \omega_0$. Raíces complejas.

2. ω_0 para un circuito LC es...

LC

1/LC

$1/\sqrt{(LC)}$

$\sqrt{(L/C)}$

$1/\sqrt{(LC)}$. Frecuencia de resonancia.

3. Aumentar R en un RLC en serie hace que la respuesta sea...

más oscilatoria

más amortiguada

igual

inestable

más amortiguada. α crece.

4. En un circuito LC ideal la energía...

se pierde como calor

se intercambia entre C y L

permanece en C

crece

se intercambia entre C y L. Sin resistencia.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Los circuitos resonantes permiten que los vehículos eléctricos se carguen sin cable. El Alternative Fuels Data Center del Departamento de Energía de EE. UU. explica que la carga inductiva usa un campo electromagnético para transferir electricidad a un VE, que algunas estaciones inalámbricas ya funcionan con potencias comparables al nivel 2, que es más común en transporte público y flotas a mayor potencia, y que el DOE investiga la carga inalámbrica de alta potencia.

Los cargadores inalámbricos sintonizan una bobina (L) y un condensador (C) en cada lado a la misma $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$ para que la energía se intercambie eficientemente a través del entrehierro, y un Q alto mantiene bajas las pérdidas. Esa es la idea de circuito detrás de los cargadores inalámbricos para transporte público y flotas que describe el AFDC.

En Saving Planets: Física II · Ecuaciones diferenciales

Fuentes: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 14.6 RLC series circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-6-rlc-series-circuits): Oscilaciones amortiguadas.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre sistemas de segundo orden.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Construye un circuito LC.

Ver la clase

Lecture 15: Second-Order Systems (part 1) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-15-part-1/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 9 · SEMANAS 12–13

Régimen sinusoidal permanente: fasores e impedancia

Sinusoides, amplitud, frecuencia, fase y valores eficaces, números complejos, fasores, impedancia y admitancia de R, L y C, análisis de circuitos de CA con la ley de Ohm, LCK, LTK, métodos nodal y de Thevenin en forma fasorial, y fundamentos de la respuesta en frecuencia.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Convertir entre sinusoides en el dominio del tiempo y fasores.
- Calcular las impedancias de R, L y C a una frecuencia dada.
- Analizar circuitos de CA con versiones fasoriales de los métodos de CC.
- Describir cómo cambia la impedancia con la frecuencia en filtros sencillos.

Conceptos clave

- Una sinusoide v(t) = V_m cos(ωt + φ) tiene amplitud V_m, frecuencia angular ω = 2πf y fase φ. Su valor eficaz es V_m/√2; los 120 V domésticos de EE. UU. son un valor eficaz a 60 Hz, con un pico de unos 170 V.
- Un fasor es el número complejo V = V_m∠φ que lleva la amplitud y la fase. En régimen sinusoidal permanente, d/dt se convierte en multiplicar por jω.
- Impedancia Z = V/I: Z_R = R, Z_L = jωL, Z_C = 1/(jωC) = −j/(ωC). Los inductores parecen cortocircuitos a baja frecuencia y circuitos abiertos a alta frecuencia; los condensadores hacen lo contrario.
- Todas las herramientas de CC (serie/paralelo, divisores, análisis nodal y de mallas, Thevenin y Norton) funcionan con impedancias y aritmética compleja.
- Un filtro pasabajos RC deja pasar las frecuencias bajas y atenúa las altas; su frecuencia de corte (de media potencia) es ω_c = 1/(RC).

Ecuaciones clave

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

`V_rms=(V_m)/(2)`

Valor eficaz de una sinusoide

$$Z_R = R,\ Z_L = j\omega L,\ Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

`Z_R=R,\ Z_L=jω L,\ Z_C=(1)/(jω C)`

Impedancias

$$\mathbf{V} = \mathbf{I}Z$$

Ley de Ohm fasorial

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

ω_c=1/RC

Corte de un filtro RC

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Expresa v(t) = 170 cos(377t) V como fasor y halla su valor eficaz y su frecuencia.

1. V = 170∠0° V (pico).
2. V_rms = 170/√2; f = 377/(2π).

Respuesta: V_rms = 120.2 V a f = 60.0 Hz.

Ejemplo 9.2 A 60 Hz halla la impedancia de un inductor de 0.1 H y de un condensador de 100 μF.

1. ω = 2π × 60 = 377.0 rad/s.
2. Z_L = j × 377.0 × 0.1; Z_C = −j/(377.0 × 10^{-4}).

Respuesta: Z_L = j37.70 Ω, Z_C = −j26.53 Ω.

Ejemplo 9.3 Una fuente de 120 V (eficaces) y 60 Hz alimenta 30 Ω en serie con 0.1 H. Halla la corriente y su fase.

1. Z = 30 + j37.70 Ω; |Z| = √(30^2 + 37.70^2) = 48.18 Ω, ∠51.49°.
2. I = 120/48.18 a −51.49°.

Respuesta: I = 2.491 A eficaces, retrasada 51.49° respecto a la tensión.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla el valor eficaz de una sinusoide de 10 V de pico.

7.071 V.

2. Halla la impedancia de 1 μF a ω = 1000 rad/s.

   −j1000 Ω.

3. Halla la frecuencia de corte de un filtro RC con R = 1 kΩ y C = 1 μF.

   ω_c = 1000 rad/s (159.2 Hz).

4. Convierte 3 + j4 a forma polar.

   5∠53.13°.

Ideas erróneas comunes

Mito: 120 V de CA significa 120 V de pico.
En realidad: Es el valor eficaz; el pico es de unos 170 V.

Mito: Las impedancias se suman como magnitudes.
En realidad: Suma números complejos: 30 + j40 tiene magnitud 50, no 70.

Mito: Los fasores sirven para cualquier forma de onda.
En realidad: Se aplican al régimen sinusoidal permanente a una sola frecuencia.

Tarjetas de estudio

Fasor

V_m∠φ.

RMS

V_m/√2.

Z_L

jωL.

Z_C

1/(jωC).

Ley de Ohm fasorial

V = IZ.

Corte RC

ω_c = 1/RC.

Cuestionario de autoevaluación

1. La impedancia de un inductor es...

$j\omega L$

$1/(j\omega L)$

ωL

L/ω

$j\omega L$. $v = L\, di/dt \rightarrow j\omega L$.

2. A muy alta frecuencia un condensador se comporta como...

un circuito abierto

un cortocircuito

una resistencia

un inductor

un cortocircuito. $|Z_C| = 1/(\omega C) \rightarrow 0$.

3. El valor eficaz de una onda senoidal es su pico multiplicado por...

0.5

0.637

0.707

1.414

0.707. $1/\sqrt{2}$.

4. En un circuito RL la corriente...

adelanta a la tensión

se retrasa respecto a la tensión

está en fase

es cero

se retrasa respecto a la tensión. Ángulo de fase inductivo.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

Cargar un VE en casa es un problema de circuitos de CA. El Alternative Fuels Data Center explica que la carga de CA de nivel 1 usa un enchufe de 120 V, supone unos 1.9 kW y añade unas 5 millas de autonomía por hora, de modo que 8 horas pueden reponer unas 40 millas en un VE mediano. El nivel 2 de CA usa 240 V (hogares) o 208 V (comercial); la mayoría de los cargadores residenciales de nivel 2 funcionan hasta 30 A, entregan 7.2 kW y unas 25 millas de autonomía por hora, y necesitan un circuito dedicado de 40 A según el artículo 625 del National Electrical Code.

Son valores eficaces: 1.9 kW a 120 V son unos 15.8 A, y 7.2 kW a 240 V son 30 A. El AFDC añade que en 2023 casi el 80 % de los puntos de carga públicos eran de nivel 2, y que los equipos de nivel 2 van de 2.9 a 19.2 kW. La mayoría de los propietarios de VE hacen casi toda su carga en casa.

En Saving Planets: Física II · Soluciones

Fuentes: U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations) · OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits)

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): Sección de libro de texto gratuita.
- 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 y fase.
- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Clases sobre régimen sinusoidal permanente e impedancia.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interactivo.

Ver la clase

Lecture 16: Sinusoidal Steady State (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/resources/lecture-16/) (en inglés)

MIT 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 10 · SEMANA 14

Potencia en CA, factor de potencia, resonancia, transformadores y sistemas trifásicos

Potencia instantánea y media, potencias activa, reactiva y aparente, el triángulo de potencias, el factor de potencia y su corrección, resonancia en serie y ancho de banda, transformadores ideales, sistemas trifásicos equilibrados y por qué la red transmite en alta tensión.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular las potencias activa, reactiva y aparente y el factor de potencia.
- Dimensionar un condensador para corregir el factor de potencia.
- Analizar transformadores ideales y cargas trifásicas equilibradas.
- Explicar las pérdidas de transmisión con I^2R.

Conceptos clave

- Potencia media (activa) $P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta$ en vatios, donde θ es el ángulo entre tensión y corriente. Potencia reactiva $Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$ en VAR. Potencia aparente $S = V_{rms} I_{rms}$ en VA, y $S^2 = P^2 + Q^2$.
- Factor de potencia $\text{fp} = \cos\theta = P/S$. Los motores son inductivos (fp en retraso). Un condensador en paralelo aporta potencia reactiva localmente, lo que eleva el fp y reduce la corriente que debe entregar la compañía eléctrica: $C = Q/(\omega V^2)$ para corrección completa.
- En la resonancia en serie $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ las reactancias se anulan, la impedancia es solo R y la corriente es máxima; el ancho de banda es ω_0/Q.
- Un transformador ideal con relación de vueltas $N_1{:}N_2$ tiene $V_2/V_1 = N_2/N_1$ e $I_2/I_1 = N_1/N_2$, así que la potencia de entrada es igual a la de salida.
- Trifásico equilibrado: tres sinusoides desfasadas 120°. Potencia total $P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\theta$, constante en el tiempo. Las pérdidas en la línea son I^2R, así que subir la tensión k veces para la misma potencia reduce la corriente k veces y las pérdidas k^2.

Ecuaciones clave

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos\theta, \quad Q = V_{rms} I_{rms} \sin\theta$$

`P=V_rmsI_rmsθ,\ \ Q=V_rmsI_rmsθ`

Potencia activa y reactiva

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad \text{pf} = \frac{P}{S}$$

`S^2=P^2+Q^2,\ \ pf=P/S`

Triángulo de potencias

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)=(I_1)/(I_2)

Transformador ideal

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\theta$$

P_3=3 V_LI_Lθ

Potencia trifásica equilibrada

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 Un motor consume 20 A eficaces de 240 V eficaces con un factor de potencia de 0.8 en retraso. Halla S, P y Q.

1. S = 240 × 20 = 4800 VA.
2. P = 4800 × 0.8; sin θ = 0.6, así que Q = 4800 × 0.6.

Respuesta: S = 4.8 kVA, P = 3.84 kW, Q = 2.88 kVAR.

Ejemplo 10.2 ¿Qué condensador en paralelo corregiría ese motor a factor de potencia unitario a 60 Hz?

1. El condensador debe aportar Q = 2880 VAR.
2. C = Q/(ωV²) = 2880/(377.0 × 240²).

Respuesta: C = 132.6 μF; la corriente de línea baja de 20 A a 16 A.

Ejemplo 10.3 Una línea con 5 Ω de resistencia entrega 10 MW. Compara la pérdida I²R a 100 kV y a 20 kV (factor de potencia unitario, ejemplo monofásico).

1. A 100 kV: I = $10^7/10^5$ = 100 A, pérdida = 100^2 × 5 = 50 kW (0.5 %).
2. A 20 kV: I = 500 A, pérdida = 500^2 × 5 = 1.25 MW (12.5 %).

Respuesta: 5 veces más tensión reduce las pérdidas 25 veces.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una carga tiene P = 6 kW y Q = 8 kVAR. Halla S y fp.

   S = 10 kVA, pf = 0.6.

2. Un transformador reduce 7200 V a 240 V. Halla N_1:N_2.

   30:1.

3. Halla la potencia de una carga trifásica equilibrada de 480 V que consume 100 A con fp 0.9.

   $\sqrt{3} \times 480 \times 100 \times 0.9 = 74.8$ kW.

4. Un RLC en serie tiene $\omega_0 = 1000$ rad/s y Q = 20. Halla el ancho de banda.

   50 rad/s.

Ideas erróneas comunes

Mito: La potencia reactiva no realiza trabajo, así que no importa.
En realidad: Aun así eleva la corriente, y la corriente causa pérdidas I^2R en cables y transformadores.

Mito: Un transformador funciona con CC.
En realidad: Necesita un flujo variable; la CC no lo produce.

Mito: La potencia trifásica es tres veces la monofásica con la tensión de línea.
En realidad: P = √3 V_L I_L cos θ.

Tarjetas de estudio

Potencia activa

P = VI cos θ (W).

Potencia reactiva

Q = VI sin θ (VAR).

Potencia aparente

S = VI (VA).

Factor de potencia

P/S.

Transformador

Trifásica

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

$P = \sqrt{3}\, V_L\, I_L \cos\theta$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El factor de potencia es igual a...

Q/S

P/S

S/P

P/Q

P/S. cos θ.

2. Multiplicar por 10 la tensión de transmisión (misma potencia) reduce las pérdidas I^2R en...

10×

100×

√10×

ninguna

100×. La corriente baja 10×; pérdida ∝ I^2.

3. Una carga inductiva se corrige con...

una resistencia en serie

un condensador en paralelo

un inductor en paralelo

un transformador

un condensador en paralelo. Los condensadores aportan potencia reactiva.

4. Un transformador reductor con relación 10:1 hace que la corriente del secundario sea...

10× menor

10× mayor

iguales

100× mayor

10× mayor. La potencia se conserva.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La red transporta la energía en alta tensión para reducir las pérdidas I^2R. La EIA explica que las líneas de transmisión de alta tensión llevan la electricidad a largas distancias porque una tensión mayor hace la transmisión a larga distancia más eficiente y más barata, que las líneas de distribución de menor tensión la entregan a los clientes, y que los transformadores de las subestaciones suben y bajan la tensión entre etapas. La EIA estima que las pérdidas de transmisión y distribución promediaron alrededor del 5 % de la electricidad transmitida y distribuida en Estados Unidos entre 2018 y 2022.

El ejemplo resuelto muestra la física: cinco veces más tensión reduce las pérdidas veinticinco veces. La corrección del factor de potencia, los transformadores eficientes y las nuevas líneas de larga distancia para llegar a los recursos eólicos y solares, que la EIA cita entre los retos de la red, van recortando ese 5 %. El AFDC señala que las tensiones trifásicas habituales en EE. UU. son 208/120 V y 480/277 V, comunes en instalaciones comerciales e industriales, y que los cargadores rápidos de CC suelen tomar una entrada de CA trifásica.

En Saving Planets: Soluciones · Física II

Fuentes: U.S. EIA: Delivery to consumers (the electric power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 15.5 Resonance in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-5-resonance-in-an-ac-circuit): Resonancia y ancho de banda.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Transformadores y transmisión.

- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): La inducción detrás de los transformadores.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

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

1. Variables y elementos de circuito: carga, corriente, tensión, potencia, energía y ley de Ohm
   4 problemas
2. Leyes de Kirchhoff, resistencias en serie y en paralelo, y divisores de tensión y de corriente
   4 problemas
3. Análisis sistemático: métodos de tensiones de nodo y de corrientes de malla
   4 problemas
4. Teoremas de circuitos: linealidad, superposición, transformación de fuentes, Thevenin, Norton y máxima transferencia de potencia
   4 problemas
5. Amplificadores operacionales
   4 problemas
6. Condensadores e inductores
   4 problemas
7. Circuitos de primer orden: transitorios RC y RL
   4 problemas
8. Circuitos de segundo orden: respuestas natural y al escalón de circuitos RLC
   4 problemas
9. Régimen sinusoidal permanente: fasores e impedancia
   4 problemas
10. Potencia en CA, factor de potencia, resonancia, transformadores y sistemas trifásicos
    4 problemas

El laboratorio (Circuits lab)

El laboratorio es la parte práctica del curso. Aquí es gratuito y solo para practicar, sin créditos.

Todas las prácticas pueden hacerse en una simulación gratuita de PhET o con un portapilas de 3 V. Nunca trabajes en el cableado doméstico ni en los enchufes de pared: la tensión de red puede matar. No cortocircuites una pila y coloca los condensadores electrolíticos con la polaridad correcta.

Referencia de seguridad: OpenStax University Physics Volume 2, 10.6 Household wiring and electrical safety (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-6-household-wiring-and-electrical-safety)

Práctica A: ley de Ohm y el multímetro

SEMANA 2

Objetivo: Medir correctamente tensión, corriente y resistencia, mostrar que la corriente es proporcional a la tensión en una resistencia y hallar R a partir de la pendiente.

$$v = iR, \quad p = vi$$

```
v=iR, p=vi
```

Ley de Ohm y potencia

Procedimiento

1. Abre PhET Ohm's Law y Circuit Construction Kit: DC; monta una pila y una resistencia y añade un voltímetro (en paralelo) y un amperímetro (en serie).
2. En casa: en una protoboard, conecta una resistencia de 1 kΩ a una pila AA (1.5 V) y luego a dos (3 V). Mide v en la resistencia e i en serie con el multímetro en su escala de mA.
3. Mide la resistencia sola con la escala de Ω (sin alimentación) y compárala con v/i.
4. Representa i frente a v; la pendiente es 1/R. Calcula la potencia en cada caso.

Tabla de datos

v (V)	i (mA) para 1 kΩ	p (mW)
1.5	1.5	2.25
3.0	3.0	9.0

Valores ideales para una resistencia de 1 kΩ; las pilas nuevas marcan algo más de 1.5 V cada una y las resistencias están dentro de su tolerancia (a menudo ±5 %).

Cálculo de ejemplo

1. R = v/i = 3.0/0.003 = 1000 Ω.
2. p = vi = 3.0 × 0.003 = 9 mW, muy por debajo de la potencia nominal de una resistencia de ¼ W.

> **Seguridad**
>
> - Usa solo portapilas de 1.5–3 V; nunca conectes nada a un enchufe de pared.
> - Nunca conectes el multímetro en su escala de corriente directamente sobre una pila: es un cortocircuito.

Alternativa en casa o virtual

- La versión en protoboard es la práctica en casa.

PhET: Ohm’s Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Vínculo con el planeta: La misma medida v·i es la que hace un medidor de enchufe o un contador inteligente para mostrar adónde va la energía; el DOE dice que los LED consumen al menos un 75 % menos que las bombillas incandescentes. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf)

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

Práctica B: leyes de Kirchhoff, serie y paralelo, y divisores

SEMANA 3

Objetivo: Verificar la LTK y la LCK midiendo, comprobar la resistencia equivalente en serie y en paralelo, y ver cómo cae un divisor de tensión con carga.

$$\sum v = 0, \quad \sum i = 0, \quad v_2 = v\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

`v=0, i=0, v_2=v(R_2)/(R_1+R_2)`

LTK, LCK y el divisor

Procedimiento

1. Monta 1 kΩ y 2 kΩ en serie con 3 V (PhET o protoboard). Mide la corriente y cada tensión; comprueba que las tensiones suman la de la fuente.
2. Vuelve a montar dos resistencias de 1 kΩ en paralelo con 3 V. Mide la corriente en cada rama y en el cable de la fuente; comprueba la LCK.
3. Trata el par en serie como un divisor y mide v en la resistencia de 2 kΩ.
4. Conecta una «carga» de 2 kΩ en paralelo con la resistencia de 2 kΩ y mide de nuevo; explica la caída con la combinación en paralelo.

Tabla de datos

Circuito	Corriente	Tensiones
1 kΩ + 2 kΩ en serie	1.0 mA	1.0 V y 2.0 V
1 kΩ ‖ 1 kΩ	3.0 mA cada una, 6.0 mA en total	3.0 V
Divisor cargado con 2 kΩ	1.5 mA desde la fuente	1.5 V de salida

Valores ideales para una fuente de 3 V.

Cálculo de ejemplo

1. Serie: i = 3/3000 = 1 mA; 1 V + 2 V = 3 V (LTK).
2. Divisor cargado: 2 kΩ ‖ 2 kΩ = 1 kΩ, así que v_out = 3 × 1/(1 + 1) = 1.5 V en lugar de 2 V.

> **Seguridad**
>
> - Solo portapilas de baja tensión; quita la pila antes de recablear.

Alternativa en casa o virtual

- La versión en protoboard es la práctica en casa.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc)

Vínculo con el planeta: La EIA explica que las células fotovoltaicas se conectan formando paneles y conjuntos; las cadenas en serie suman tensión y las cadenas en paralelo suman corriente, como aquí. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

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

Práctica C: el equivalente de Thevenin de una pila y la máxima potencia

SEMANA 6

Objetivo: Modelar una pila real como V_Th en serie con R_Th midiendo su tensión en circuito abierto y con carga, y luego predecir la carga para máxima potencia.

$$R_{Th} = \frac{v_{oc} - v_L}{i_L}, \quad P_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}}$$

R_Th=_oc-v_Li_L, P_=_Th^24R_Th

Thevenin a partir de dos medidas

Procedimiento

1. En PhET Circuit Construction Kit: DC, da a la pila una resistencia interna y mide su tensión sin carga y con una resistencia de carga.
2. En casa: mide la tensión en circuito abierto de un portapilas de 2 × AA. Luego conecta una resistencia de 22 Ω de al menos 1 W solo unos segundos y lee la tensión.
3. Calcula i_L = v_L/22 Ω y R_Th, y predice P_max.
4. En PhET, varía la resistencia de carga y confirma que la potencia es máxima cuando R_L = R_Th.

Tabla de datos

Magnitud	Valor de ejemplo
v_oc	3.20 V
v_L (22 Ω)	3.10 V
i_L	0.141 A
R_Th	0.71 Ω

Valores de ejemplo para pilas alcalinas nuevas; las pilas gastadas muestran una R_Th mucho mayor.

Cálculo de ejemplo

1. i_L = 3.10/22 = 0.1409 A; R_Th = 0.10/0.1409 = 0.71 Ω.
2. Potencia en la carga = 3.10 × 0.1409 = 0.437 W, así que usa una resistencia de 1 W. Adaptar R_L = 0.71 Ω sería casi un cortocircuito y calentaría las pilas: no lo intentes en casa, solo en PhET.

> **Seguridad**
>
> - Conecta la carga de 22 Ω solo unos segundos; la resistencia y las pilas se calientan.

- Nunca cortocircuites los bornes de la pila.

Alternativa en casa o virtual

- El paso de las dos medidas es la práctica en casa; el barrido de potencia es solo en PhET.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · OpenStax UP2, 10.1 Electromotive force (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-1-electromotive-force)

Vínculo con el planeta: La EIA informa que la eficiencia de los módulos fotovoltaicos subió de menos del 10 % a mediados de los años 1980 a casi el 25 % hoy; hacer funcionar cada panel con su carga óptima es parte de aprovechar esa producción. U.S. EIA: Photovoltaics and electricity (https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php)

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

Práctica D: carga RC y la constante de tiempo

SEMANA 10

Objetivo: Observar cómo se carga un condensador a través de una resistencia, medir la constante de tiempo y compararla con τ = RC.

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

`v_C(t)=V(1-e^-t/RC)`

Carga RC

Procedimiento

1. En PhET Circuit Construction Kit: AC, monta una pila, una resistencia, un condensador y un interruptor; usa el gráfico de tensión para observar v_C.
2. En casa: coloca un condensador de 1000 µF (de 6.3 V o más, terminal negativo al − de la pila) en serie con 10 kΩ sobre 3 V. Lee v_C con el multímetro cada 10 s.
3. Halla el instante en que v_C alcanza el 63.2 % de la tensión final; ese es τ.
4. Representa ln(1 − v_C/V) frente a t; la pendiente es −1/τ. Descarga el condensador a través de la resistencia antes de guardarlo.

Tabla de datos

t (s)	0	10	20	30	50
v_C (V)	0	1.90	2.59	2.85	2.98

Valores ideales para R = 10 kΩ, C = 1000 µF y V = 3 V. Los condensadores electrolíticos suelen tener ±20 %, y el propio multímetro carga ligeramente el circuito.

Cálculo de ejemplo

1. τ = 10^{4} × 10^{-3} = 10 s.
2. v_C(10 s) = 3(1 − e^{-1}) = 1.90 V; v_C(50 s) = 3(1 − e^{-5}) = 2.98 V.

> **Seguridad**
>
> - Coloca los condensadores electrolíticos con la polaridad correcta y por debajo de su tensión nominal; al revés pueden reventar. Usa gafas.

Alternativa en casa o virtual

- La versión en protoboard es la práctica en casa.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Vínculo con el planeta: El Berkeley Lab informa que los centros de datos usaron alrededor del 4.4 % de la electricidad de EE. UU. en 2023; cada conmutación lógica dentro de ellos es una diminuta carga RC como esta. Berkeley Lab: Report evaluates increase in electricity demand from data centers (Jan. 2025) (https://newscenter.lbl.gov/2025/01/15/berkeley-lab-report-evaluates-increase-in-electricity-demand-from-data-centers/)

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

Práctica E: resonancia RLC

SEMANA 13

Objetivo: Alimentar un circuito RLC en serie con una fuente de CA a distintas frecuencias, hallar el pico de resonancia y compararlo con $\omega_0 = 1/\sqrt{(LC)}$.

$$|I| = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

`|I|=^2+(ω L-1/ω C)^2`

Corriente en un RLC en serie

Procedimiento

1. En PhET Circuit Construction Kit: AC (o su Virtual Lab), monta una fuente de CA, una resistencia, un inductor y un condensador en serie con un amperímetro.
2. Fija R = 10 Ω, L = 10 mH y C = 10 µF si es posible, o anota los valores que usa PhET, y calcula f_0.
3. Recorre la frecuencia de la fuente alrededor de f_0 y anota la amplitud de la corriente.
4. Representa |I| frente a f, halla el pico y los puntos de media potencia, y compara el ancho de banda con ω_0/Q.

Tabla de datos

f (Hz)	400	503	600
|I| (A) para 10 V	0.563	1.000	0.667

Valores calculados para R = 10 Ω, L = 10 mH, C = 10 µF y una fuente de 10 V de amplitud.

Cálculo de ejemplo

1. $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-2} \times 10^{-5})}) = 503.3$ Hz; en f_0, $|Z| = R = 10$ Ω, así que $|I| = 1$ A.
2. At 400 Hz: X_L = 25.13 Ω, X_C = 39.79 Ω, |Z| = 17.76 Ω, |I| = 0.563 A.

> **Seguridad**
>
> - Solo simulación: no montes circuitos de CA con la red eléctrica.

Alternativa en casa o virtual

- Esta práctica es solo en PhET por seguridad; nada de cableado en casa.

PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac) · PhET: Circuit Construction Kit: AC – Virtual Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab)

Vínculo con el planeta: El AFDC dice que los cargadores inductivos de VE transfieren potencia mediante un campo electromagnético; circuitos LC sintonizados como este hacen eficiente esa transferencia. U.S. DOE Alternative Fuels Data Center: Electric vehicle charging stations (https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-stations)

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

Práctica F: medir la potencia activa en casa y transformadores en PhET

SEMANA 14

Objetivo: Usar un medidor de potencia de enchufe para comparar la potencia activa de bombillas y aparatos, estimar la energía anual y explorar las relaciones de tensión de los transformadores en PhET.

$$w = Pt, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

```
w=Pt, (V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)
```

Energía y el transformador ideal

Procedimiento

1. Enchufa un medidor de potencia a una toma de pared y una lámpara al medidor (nunca abras el medidor ni la lámpara). Anota los vatios con una bombilla incandescente o halógena y luego con un LED de brillo similar.
2. Si el medidor muestra VA y factor de potencia, anótalos también para un cargador de teléfono y un ventilador.
3. Estima los kWh anuales con 3 horas al día y compara.
4. En PhET Faraday's Law, cambia el número de espiras de la bobina y la velocidad del imán, y relaciona la tensión inducida con N y la rapidez de cambio del flujo.

Tabla de datos

Bombilla	**P (W)**	**kWh/año con 3 h/día**
Incandescente	60	65.7
LED (luz similar)	9	9.9

Lecturas de ejemplo; la guía del DOE dice que los LED usan al menos un 75 % menos de energía que las incandescentes. Tus bombillas darán tus propios números.

Cálculo de ejemplo

1. 60 W × 3 h × 365 = 65.7 kWh; 9 W dan 9.86 kWh.
2. Ahorro = 85 % con este LED de ejemplo, coherente con «al menos un 75 %».

> **Seguridad**
>
> - Usa solo un medidor de enchufe comercial y aparatos enchufables; nunca toques los contactos de la toma ni abras aparatos. Deja enfriar las bombillas calientes antes de manipularlas.

Alternativa en casa o virtual

- El paso del medidor de enchufe es la práctica en casa; los transformadores se exploran en PhET.

PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers)

Vínculo con el planeta: La EIA estima las pérdidas de transmisión y distribución en alrededor del 5 %; cada vatio ahorrado en la bombilla también evita esas pérdidas aguas arriba. U.S. DOE: Guide to energy-efficient lighting (PDF) (https://www.energy.gov/sites/prod/files/guide_to_energy_efficient_lighting.pdf) · U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3)

☐ **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. Halla la resistencia equivalente de 12 Ω en paralelo con (4 Ω + 2 Ω).
    1. 12 × 6/(12 + 6).

    Respuesta: 4 Ω.

2. Una fuente de 24 V alimenta 3 kΩ y 1 kΩ en serie. Halla la tensión en 1 kΩ.
    1. Divisor: 24 × 1/4.

    Respuesta: 6 V.

3. Un nodo se conecta a 12 V a través de 4 Ω, a tierra a través de 12 Ω, y recibe 2 A de una fuente de corriente. Halla su tensión.
    1. (v − 12)/4 + v/12 = 2, así que 4v = 60.

    Respuesta: 15 V.

4. Una red tiene v_oc = 18 V e i_sc = 6 A. Halla R_Th y la potencia máxima que puede entregar.
    1. R_Th = 3 Ω; P = $18^2/(4 \times 3)$.

    Respuesta: 3 Ω y 27 W.

5. Un amplificador inversor tiene R_f = 33 kΩ y R_in = 3.3 kΩ. Halla v_o para v_in = −0.4 V.

    1. Ganancia = −10.

    Respuesta: +4 V.

Serie de práctica final (todas las unidades)

1. Un condensador de 20 μF se carga desde 0 V a través de 5 kΩ hacia 10 V. Halla τ y v_C en 0.2 s.

    1. τ = 0.1 s; $10(1 - e^{-2})$.

    Respuesta: τ = 0.1 s, v_C = 8.65 V.

2. Un RLC en serie tiene R = 40 Ω, L = 0.1 H y C = 100 μF. Clasifica la respuesta y halla ω_d si oscila.

    1. $\alpha = 200\ s^{-1}$; $\omega_0 = 316.2$ rad/s.

    Respuesta: Subamortiguado, ω_d = 244.9 rad/s.

3. Halla la impedancia de 20 Ω en serie con 100 μF a 60 Hz.

    1. Z_C = −j26.53 Ω.

    Respuesta: $Z = 20 - j26.53\ \Omega = 33.22\angle -52.99^\circ\ \Omega$.

4. Una carga consume 12 A eficaces de 120 V eficaces con fp 0.85 en retraso. Halla P y Q.

    1. S = 1440 VA; sin θ = 0.5268.

    Respuesta: P = 1224 W, Q = 758.6 VAR.

5. Un transformador 20:1 tiene 2400 V en el primario y una carga de 10 A en el secundario. Halla V_2 e I_1.

    1. $V_2 = 2400/20$; $I_1 = 10/20$.

    Respuesta: 120 V y 0.5 A.

6. Halla la potencia de una carga trifásica equilibrada de 208 V que consume 50 A con factor de potencia unitario.

    1. √3 × 208 × 50.

    Respuesta: 18.01 kW.

Hoja de fórmulas

$$i = dq/dt,\ p = vi,\ v = iR \qquad R = \rho L/A,\ p = i^2R = v^2/R$$

$$\sum i = 0,\ \sum v = 0$$

$$R_s = \sum R,\ 1/R_p = \sum 1/R$$

$$v_2 = vR_2/(R_1 + R_2)$$

$$V_{Th} = v_{oc},\ R_{Th} = v_{oc}/i_{sc},\ P_{\max} = V_{Th}^2/(4R_{Th})$$

$$v_o = -(R_f/R_{in})v_{in},\ v_o = (1 + R_f/R_g)v_{in}$$

$$i = C\,dv/dt,\ v = L\,di/dt,\ w = \tfrac{1}{2}Cv^2,\ \tfrac{1}{2}Li^2$$

$$\tau = RC,\ L/R;\ x(t) = x(\infty) + [x(0) - x(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$\alpha = R/2L,\ \omega_0 = 1/\sqrt{LC},\ \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$Z_L = j\omega L,\ Z_C = 1/(j\omega C),\ V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$$

$$P = VI\cos\theta,\ Q = VI\sin\theta,\ S^2 = P^2 + Q^2$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1,\ P_{3\phi} = \sqrt{3}V_L I_L\cos\theta$$

Constantes

Constante	Valor
1 kilovatio-hora (kWh)	3.6 × 10⁶ J
1 caballo de fuerza (eléctrico)	746 W
Carga elemental e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Suministro doméstico en EE. UU.	120 V y 240 V a 60 Hz
Valor eficaz de una onda senoidal	V_rms = V_peak/√2 ≈ 0.7071 V_peak
1 amperio-hora (Ah)	3600 C

Fuente: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Textos y simulaciones gratuitos

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

- MIT OpenCourseWare 6.002 Circuits and Electronics (Spring 2007) (https://ocw.mit.edu/courses/6-002-circuits-and-electronics-spring-2007/): Videos de clases, apuntes, problemas y prácticas gratuitos del MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules): Capítulo de libro gratuito sobre circuitos de CC.
- OpenStax University Physics Volume 2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Capítulo de libro gratuito sobre circuitos de CA.

- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Monta y mide circuitos de CC.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Condensadores, inductores y fuentes de CA.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): V = IR de forma interactiva.

Glosario

Potencia aparente
S = V_rms I_rms, en VA.

Condensador
Elemento con i = C dv/dt que almacena energía en un campo eléctrico.

Impedancia
Cociente complejo V/I en régimen sinusoidal permanente.

Inductor
Elemento con v = L di/dt que almacena energía en un campo magnético.

KCL
Las corrientes que salen de un nodo suman cero.

KVL
Las tensiones alrededor de un lazo suman cero.

Malla
Un lazo que no contiene ningún otro lazo.

Nodo
Un punto donde se conectan dos o más elementos.

Equivalente de Norton
Fuente de corriente I_N en paralelo con R_N.

Amplificador operacional
Amplificador diferencial de alta ganancia que se usa con realimentación.

Convenio de signos pasivo
La corriente entra por el terminal + de un elemento que absorbe potencia.

Fasor
Número complejo que da la amplitud y la fase de una sinusoide.

Factor de potencia
cos θ = P/S.

Factor de calidad
Q = ω_0L/R, agudeza de la resonancia.

RMS
Valor cuadrático medio; V_m/√2 para una sinusoide.

Potencia reactiva

Q = V_rms I_rms sin θ, en VAR.

Supernodo
Dos nodos unidos por una fuente de tensión, tratados juntos en la LCK.

Equivalente de Thevenin
Fuente de tensión V_Th en serie con R_Th.

Constante de tiempo
τ = RC o L/R.

Transformador
Bobinas acopladas que cambian la tensión de CA según la relación de vueltas.

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	Rotula los circuitos por completo, elige un método eficiente (divisores, nodal, mallas, Thevenin, fasores), comprueba el balance de potencia y los casos límite, y trabaja con seguridad en el laboratorio.
3 · Competente	Resuelve los ejercicios con algún error ocasional de signo o de unidades.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero confunde serie y paralelo, o el convenio de signos.
1 · Inicial	Sustituye números en fórmulas sin un diagrama rotulado; necesita repasar la unidad.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	20%
Prácticas	25%
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

- Álgebra lineal MATH 230

- Aerodinámica I AERO 310
- Cálculo III MATH 210
- Todos los cursos