



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Temario de la asignatura

Ismael Sallami Moreno

Recursos Ingeniería Informática y Ade

Licencia

Este trabajo está bajo una Licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0.

Permisos: Se permite compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato.

Condiciones: Es necesario dar crédito adecuado, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado cambios. No se permite usar el material con fines comerciales ni distribuir material modificado.



Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Ismael Sallami Moreno

<https://elblogdeismael.github.io>

Índice general

1	Fundamentos de electromagnetismo	9
1.1	Carga eléctrica	9
1.2	Campo eléctrico	9
1.3	Potencial eléctrico	10
1.4	Capacidad y condensadores	10
1.5	Corriente eléctrica	11
1.6	Campo magnético	11
1.7	Autoinducción y bobinas	12
1.8	Los tres elementos pasivos	12
1.9	Las ecuaciones de Maxwell	13
2	Fundamentos de teoría de circuitos. Corriente continua	15
2.1	El modelo de circuito	15
2.2	Elementos	15
2.3	Leyes de Kirchhoff	16
2.4	Asociación de resistencias	16
2.5	Métodos sistemáticos	17
2.6	Teoremas	18
2.7	Circuitos con condensadores y bobinas en continua	19
3	Fundamentos de teoría de circuitos. Corriente alterna	21
3.1	Señales senoidales	21
3.2	Por qué se usa la alterna	21
3.3	Fasores	22
3.4	Impedancia	22
3.5	Potencia en alterna	23

3.6	Resonancia	23
3.7	Respuesta en frecuencia	24
4	Dispositivos electrónicos	27
4.1	Semiconductores	27
4.2	La unión PN	27
4.3	El diodo	28
4.4	El transistor bipolar	29
4.5	El transistor de efecto de campo	30
4.6	El amplificador operacional	31
5	Fundamentos de electrónica digital	33
5.1	De la tensión al bit	33
5.2	Parámetros de una familia lógica	33
5.3	Familias lógicas	34
5.4	Lógica CMOS	34
5.5	Consumo	35
5.6	Retardo y capacidad	36
5.7	Circuitos combinacionales y secuenciales	36
6	Circuitos electrónicos básicos	37
6.1	Fuente de alimentación lineal	37
6.2	Amplificadores	37
6.3	Filtros activos	39
6.4	De analógico a digital y al revés	39
6.5	Circuitos de interfaz	40
7	Temario práctico	41
7.1	Instrumentación	41
7.2	Práctica 1. Circuitos de corriente continua	42
7.3	Práctica 2. Circuitos de corriente alterna	42
7.4	Práctica 3. Circuitos básicos con dispositivos semiconductores	43
7.5	Práctica 4. Caracterización de circuitos para lógica digital	43
7.6	Práctica 5. Amplificador operacional	44

7.7 El informe	44
---------------------------------	-----------

Fundamentos de electromagnetismo

Tema 1 del programa. Las leyes que gobiernan la carga y el campo, y de dónde salen las magnitudes que el resto de la asignatura da por conocidas: tensión, corriente, capacidad e inductancia.

1.1 Carga eléctrica

La carga es una propiedad de la materia, cuantizada en múltiplos de la carga elemental $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Se conserva: en un sistema aislado la carga total no cambia.

La **ley de Coulomb** da la fuerza entre dos cargas puntuales:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{u}_r$$

con $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m la permitividad del vacío. La fuerza es repulsiva entre cargas del mismo signo y atractiva entre signos opuestos, y decae con el cuadrado de la distancia.

1.2 Campo eléctrico

El campo es la fuerza por unidad de carga de prueba:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad [\vec{E}] = \text{N/C} = \text{V/m}$$

Para una carga puntual, $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$.

1.2.1 Ley de Gauss

El flujo del campo a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga encerrada:

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$$

Su utilidad es práctica: cuando hay simetría —esférica, cilíndrica o plana— el campo sale del integral y se despeja sin integrar. De ahí salen dos resultados que se usan después:

Distribución	Campo
Plano infinito con densidad σ	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$, uniforme
Dos planos paralelos con cargas opuestas	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ dentro, cero fuera

El segundo es el condensador plano del apartado siguiente.

Y una consecuencia con nombre propio: en un **conductor en equilibrio**, el campo interior es nulo y toda la carga está en la superficie. Eso es la jaula de Faraday, y es la razón por la que un cable apantallado protege la señal que lleva dentro.

1.3 Potencial eléctrico

El campo electrostático es conservativo, así que deriva de un potencial:

$$V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}, \quad \vec{E} = -\nabla V$$

La **diferencia de potencial** entre dos puntos es el trabajo por unidad de carga para llevarla de uno a otro. Su unidad es el voltio, y es lo que en el resto de la asignatura se llama **tensión**.

Que el campo sea conservativo tiene una consecuencia directa sobre los circuitos: la integral en un camino cerrado es cero, y eso es exactamente la segunda ley de Kirchhoff del tema 2. Las leyes de circuitos no son reglas aparte: son estas mismas leyes en un caso particular.

1.4 Capacidad y condensadores

Dos conductores con cargas $+Q$ y $-Q$ separados por un aislante forman un condensador. Su **capacidad** es

$$C = \frac{Q}{V}, \quad [C] = \text{F (faradio)}$$

Para el condensador plano de área A y separación d :

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

con ε_r la permitividad relativa del dieléctrico. Aumentar la capacidad se consigue con más área, menos separación o un dieléctrico mejor, y esas tres vías son las que sigue la fabricación de condensadores reales.

La energía almacenada:

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

Es la energía que un condensador de desacoplo entrega cuando un circuito digital conmuta y demanda corriente de golpe, que es su función principal en una placa.

1.4.1 Asociación

Asociación	Capacidad equivalente	Qué se conserva
Serie	$\frac{1}{C_{eq}} = \sum \frac{1}{C_i}$	la carga
Paralelo	$C_{eq} = \sum C_i$	la tensión

Es al revés que con resistencias, y conviene fijarlo desde el principio.

1.5 Corriente eléctrica

La corriente es el flujo de carga:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad [I] = \text{A (amperio)}$$

Por convenio, el sentido positivo es el del movimiento de cargas positivas, que es **contrario** al de los electrones. Es una convención histórica anterior al descubrimiento del electrón, y se mantiene porque cambiarla no aportaría nada.

La **densidad de corriente** relaciona la corriente con el campo dentro del material:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

con σ la conductividad. Integrada sobre la sección de un conductor cilíndrico, esa expresión da la ley de Ohm del tema 2, y la resistencia resulta ser

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

con $\rho = 1/\sigma$ la resistividad. De ahí que un cable largo y fino tenga más resistencia que uno corto y grueso.

1.6 Campo magnético

Una carga en movimiento crea campo magnético, y una carga en movimiento dentro de un campo magnético sufre una fuerza:

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

La fuerza es perpendicular a la velocidad y al campo, así que no hace trabajo: un campo magnético curva la trayectoria y no cambia la energía cinética.

1.6.1 Ley de Ampère

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

Para un hilo recto infinito, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Para un solenoide de n espiras por unidad de longitud, $B = \mu_0 n I$ en su interior, y ese es el resultado que sostiene las bobinas.

1.6.2 Inducción

La **ley de Faraday** cierra el electromagnetismo: un flujo magnético variable induce una fuerza electromotriz.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

El signo negativo es la **ley de Lenz**: la corriente inducida se opone al cambio que la produjo. Es una consecuencia de la conservación de la energía, no una regla adicional.

Es el principio de los generadores, los transformadores y los motores. Y también la razón de un problema muy concreto de la informática: un cambio brusco de corriente en una pista induce tensión en las pistas vecinas, que es la **diafonía**. Las placas modernas se diseñan contra ese efecto.

1.7 Autoinducción y bobinas

Una bobina se opone a los cambios de la corriente que la atraviesa:

$$v = L \frac{di}{dt}, \quad [L] = \text{H (henrio)}$$

Para un solenoide, $L = \mu_0 \mu_r n^2 A \ell$. La energía almacenada:

$$U = \frac{1}{2} L I^2$$

De ahí un efecto que se observa a diario: cortar la corriente de una bobina de golpe produce una tensión enorme, porque di/dt es grande. Es la chispa al abrir un interruptor inductivo, y la razón por la que en electrónica se pone un diodo en antiparalelo con los relés.

1.8 Los tres elementos pasivos

Todo el tema 2 y el 3 se construyen sobre estos tres, y conviene verlos juntos:

Elemento	Relación	Almacena	En continua, en régimen permanente
Resistencia	$v = R i$	nada, disipa	se comporta como R
Condensador	$i = C \frac{dv}{dt}$	energía eléctrica	circuito abierto
Bobina	$v = L \frac{di}{dt}$	energía magnética	cortocircuito

La última columna es lo que hace resoluble un circuito en continua: pasado el transitorio, las derivadas se anulan y los dos elementos reactivos se sustituyen por un abierto y un corto.

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} R \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} & \begin{array}{c} C \\ \text{---} \text{---} \end{array} & \begin{array}{c} L \\ \text{---} \text{---} \end{array} \\
 v = R i & i = C dv/dt & v = L di/dt
 \end{array}$$

1.9 Las ecuaciones de Maxwell

Las cuatro leyes anteriores, reunidas:

Ecuación	Forma integral	Qué dice
Gauss eléctrica	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = Q/\epsilon_0$	la carga crea campo eléctrico
Gauss magnética	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	no hay cargas magnéticas aisladas
Faraday	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -d\Phi_B/dt$	un campo magnético variable crea campo eléctrico
Ampère-Maxwell	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 d\Phi_E/dt$	la corriente y el campo eléctrico variable crean campo magnético

Combinadas predicen ondas electromagnéticas que se propagan a

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Ese resultado, obtenido de constantes medidas en el laboratorio, es lo que identificó la luz como una onda electromagnética. Y para esta asignatura tiene una consecuencia práctica: dentro de un circuito integrado, una señal no llega instantáneamente al otro extremo, y a frecuencias altas la aproximación de circuitos concentrados —que el tema 2 usa— deja de valer. El desarrollo de estos fundamentos está en Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024a y en Álvarez Marquina et al., 2010.

Fundamentos de teoría de circuitos.

Corriente continua

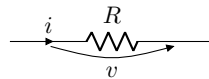
Tema 2 del programa. Las leyes de Kirchhoff, los métodos sistemáticos de análisis y los teoremas que simplifican un circuito antes de resolverlo.

2.1 El modelo de circuito

Un circuito es una idealización: se supone que los elementos son **concentrados**, es decir, que toda la resistencia está en las resistencias y toda la capacidad en los condensadores, y que la señal se propaga instantáneamente por los cables.

La aproximación vale mientras la longitud del circuito sea mucho menor que la longitud de onda de las señales que lleva. A 50 Hz eso son miles de kilómetros; a 5 GHz, unos centímetros, y por eso el diseño de una placa moderna ya no puede tratarse solo con este modelo.

2.1.1 Convenio de signos



la corriente entra por el borne +: el elemento consume

Con el **convenio de receptor**, la corriente entra por el terminal positivo y la potencia $p = v i$ es positiva cuando el elemento consume. Con el convenio de generador es al revés. Fijar uno y mantenerlo es lo que evita los errores de signo, que son la mitad de los fallos en los ejercicios de este tema.

2.2 Elementos

Elemento	Símbolo	Relación
Resistencia	R	$v = R i$
Fuente de tensión ideal	V_g	impone v , con cualquier i
Fuente de corriente ideal	I_g	impone i , con cualquier v
Fuente dependiente	—	su valor depende de otra magnitud del circuito

Las fuentes ideales son otra idealización: una fuente real tiene resistencia interna, y se modela como

una fuente ideal con una resistencia en serie —modelo de Thévenin— o en paralelo —modelo de Norton—.

2.2.1 Ley de Ohm y potencia

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

La potencia disipada crece con el **cuadrado** de la corriente, y esa es la razón de dos cosas cotidianas: que el transporte de energía eléctrica se haga a alta tensión y baja corriente, y que un procesador se caliente tanto al subirle la tensión de alimentación.

2.3 Leyes de Kirchhoff

Primera ley, de corrientes (LCK). En todo nodo, la suma de corrientes entrantes es igual a la de salientes:

$$\sum i_{\text{entrantes}} = \sum i_{\text{salientes}}$$

Es la conservación de la carga: en un nodo no se acumula.

Segunda ley, de tensiones (LTK). En toda malla, la suma algebraica de las tensiones es cero:

$$\sum v_k = 0$$

Es que el campo electrostático es conservativo, que ya se vio en el tema 1.

2.3.1 Vocabulario

Término	Definición
Nodo	punto de unión de dos o más elementos
Nodo esencial	unión de tres o más elementos
Rama	camino entre dos nodos, con un solo elemento o varios en serie
Malla	camino cerrado que no contiene otro dentro
Lazo	cualquier camino cerrado

Con n nodos y r ramas, el sistema completo son $n - 1$ ecuaciones de nodos y $r - n + 1$ de mallas: en total r ecuaciones para r corrientes incógnita.

2.4 Asociación de resistencias

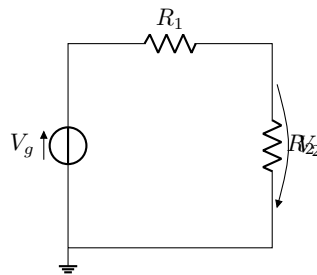
Asociación	Equivalente	Se conserva
Serie	$R_{eq} = \sum R_i$	la corriente
Paralelo	$\frac{1}{R_{eq}} = \sum \frac{1}{R_i}$	la tensión

Para dos en paralelo, $R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

2.4.1 Divisores

De tensión, con dos resistencias en serie:

$$V_2 = V_g \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



De corriente, con dos en paralelo:

$$I_1 = I_g \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Los dos son la herramienta más usada del tema, y el error habitual es aplicar el divisor de tensión cuando hay una carga conectada en paralelo con R_2 : entonces R_2 hay que sustituirla por el paralelo de las dos.

2.5 Métodos sistemáticos

2.5.1 Análisis por nodos

1. Elegir un nodo como referencia, con $V = 0$.
2. Nombrar la tensión de cada nodo esencial restante.
3. Escribir la LCK en cada uno, expresando las corrientes con la ley de Ohm.
4. Resolver el sistema.

Para un nodo A entre R_1 hacia una fuente V_g , R_2 a tierra y R_3 a otro nodo B :

$$\frac{V_A - V_g}{R_1} + \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_A - V_B}{R_3} = 0$$

Cuando una fuente de tensión está entre dos nodos y no hay ninguno a referencia, los dos se agrupan en un **supernodo**: se escribe la LCK de los dos juntos y se añade la ecuación de la fuente.

2.5.2 Análisis por mallas

1. Definir una corriente de malla por cada malla, todas en el mismo sentido.
2. Escribir la LTK en cada malla.
3. Resolver.

Si una fuente de corriente pertenece a dos mallas, se agrupan en una **supermalla**, con la misma idea.

	Nodos	Mallas
Incógnitas	tensiones de nodo	corrientes de malla
Número de ecuaciones	$n_{esenciales} - 1$	$r - n + 1$
Conviene con	muchas fuentes de corriente	muchas fuentes de tensión
Caso especial	supernodo	supermalla

Elegir el método con menos ecuaciones es lo que ahorra tiempo en el examen, y esa es la única razón para conocer los dos.

2.6 Teoremas

2.6.1 Superposición

En un circuito lineal, la respuesta a varias fuentes es la suma de las respuestas a cada una por separado, anulando las demás:

Fuente anulada	Se sustituye por
Tensión	cortocircuito
Corriente	circuito abierto

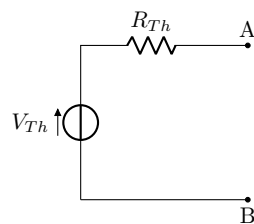
Solo vale para magnitudes lineales. La potencia no lo es —depende del cuadrado— así que no se puede superponer: hay que calcular primero la tensión o la corriente total y después la potencia. Es el error clásico del teorema.

Las fuentes dependientes **no se anulan**: dependen del circuito y siguen activas.

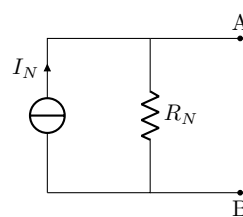
2.6.2 Thévenin y Norton

Cualquier red lineal vista desde dos terminales equivale a:

- **Thévenin**: una fuente de tensión V_{Th} en serie con R_{Th} .
- **Norton**: una fuente de corriente I_N en paralelo con R_N .



Thévenin



Norton

Relación entre los dos: $V_{Th} = I_N R_N$ y $R_{Th} = R_N$.

Cómo se calculan:

Magnitud	Cómo
V_{Th}	tensión en circuito abierto entre A y B
I_N	corriente de cortocircuito entre A y B

Magnitud	Cómo
R_{Th}	anulando las fuentes independientes, resistencia vista desde A-B
R_{Th} con fuentes dependientes	V_{Th}/I_N , o inyectando una fuente de prueba

La última fila importa: **con fuentes dependientes no se pueden anular las fuentes y mirar la resistencia**, porque las dependientes siguen actuando.

Para qué sirve: sustituir toda la red que alimenta una carga por dos elementos, de modo que estudiar cómo responde a distintas cargas deja de exigir resolver el circuito entero cada vez.

2.6.3 Máxima transferencia de potencia

Una fuente con resistencia interna R_{Th} entrega la máxima potencia a una carga cuando

$$R_L = R_{Th}$$

y el rendimiento en ese punto es del **50 %**: la mitad de la potencia se disipa dentro de la fuente.

De ahí una distinción práctica: en comunicaciones se adapta la impedancia para transferir la máxima señal, y en distribución de energía **no**, porque tirar la mitad de la energía sería inaceptable. Ahí se busca $R_L \gg R_{Th}$.

2.7 Circuitos con condensadores y bobinas en continua

En **régimen permanente**, con todas las magnitudes constantes:

- El condensador tiene $i = C dv/dt = 0$: se comporta como **circuito abierto**.
- La bobina tiene $v = L di/dt = 0$: se comporta como **cortocircuito**.

Antes de llegar a ese régimen hay un **transitorio**. Para un circuito RC en serie alimentado por un escalón:

$$v_C(t) = V_g \left(1 - e^{-t/\tau}\right), \quad \tau = RC$$

y al descargarse, $v_C(t) = V_0 e^{-t/\tau}$.

Instante	v_C como fracción del final
τ	63,2 %
2τ	86,5 %
3τ	95,0 %
5τ	99,3 %

Se considera terminado el transitorio a los 5τ . Para un circuito RL, $\tau = L/R$ y las expresiones son análogas con la corriente.

Esto no es un tecnicismo: **el tiempo de conmutación de una puerta lógica es un transitorio RC**, con R la resistencia del transistor conduciendo y C la capacidad de la puerta siguiente. El

tema 5 vuelve sobre ello, y ahí está el motivo de que reducir la capacidad y la tensión sea lo que hace más rápido un circuito digital. El desarrollo del análisis de circuitos está en Hayt et al., 2019, Nilsson y Riedel, 2008 y López Villanueva y Jiménez Tejada, 2008a.

Fundamentos de teoría de circuitos.

Corriente alterna

Tema 3 del programa. El régimen permanente senoidal, el método de los fasores, la impedancia y la respuesta en frecuencia.

3.1 Señales senoidales

Una señal senoidal se describe con tres parámetros:

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \varphi)$$

Parámetro	Nombre	Unidad
V_m	amplitud o valor de pico	V
$\omega = 2\pi f$	pulsación	rad/s
φ	fase inicial	rad

Y dos valores derivados que se usan constantemente:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (\text{valor eficaz}), \quad V_{med} = \frac{2V_m}{\pi} \quad (\text{medio en un semiciclo})$$

El **valor eficaz** es el de la señal continua que disipa la misma potencia en una resistencia, y por eso es el que dan los instrumentos y las especificaciones. Los 230 V de la red son eficaces: el pico son 325 V, que es el valor que un aislamiento tiene que soportar.

3.2 Por qué se usa la alterna

La razón es histórica y sigue vigente: **el transformador solo funciona en alterna**, porque necesita flujo variable. Elevar la tensión para transportar energía reduce la corriente y, con ella, las pérdidas Ri^2 del tema anterior. En continua no había forma sencilla de cambiar de tensión.

En electrónica hay otra razón: cualquier señal se descompone en suma de senoidales, así que analizar un circuito para una senoide de cada frecuencia describe su comportamiento ante cualquier entrada. Eso es lo que la respuesta en frecuencia del final del tema formaliza.

3.3 Fasores

Resolver un circuito en alterna con las ecuaciones diferenciales de bobinas y condensadores es laborioso. El método de los fasores lo convierte en álgebra de números complejos.

A la señal $v(t) = V_m \cos(\omega t + \varphi)$ se le asocia el fasor

$$\bar{V} = V_{ef} \angle \varphi = V_{ef} e^{j\varphi}$$

El fasor guarda amplitud y fase; la frecuencia es común a todo el circuito y no se representa. Las derivadas se convierten en productos:

$$\frac{d}{dt} \longrightarrow j\omega, \quad \int dt \longrightarrow \frac{1}{j\omega}$$

Con eso, las ecuaciones diferenciales pasan a ser ecuaciones lineales complejas, y **todos los métodos del tema 2 siguen valiendo**: Kirchhoff, nodos, mallas, superposición, Thévenin. Solo cambia que las magnitudes son complejas.

3.4 Impedancia

La impedancia generaliza la resistencia:

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}}{\bar{I}} = R + jX$$

con R la resistencia y X la reactancia.

Elemento	Impedancia	Módulo	Desfase de v respecto a i
Resistencia	R	R	0°
Bobina	$j\omega L$	ωL	$+90^\circ$: la tensión adelanta
Condensador	$\frac{1}{j\omega C}$	$\frac{1}{\omega C}$	-90° : la tensión retrasa

La regla mnemotécnica clásica: en una bobina la tensión va por delante; en un condensador, la corriente. Y el comportamiento en los extremos de frecuencia explica casi todo lo que sigue:

	$\omega \rightarrow 0$ (continua)	$\omega \rightarrow \infty$
Bobina	$Z \rightarrow 0$: cortocircuito	$Z \rightarrow \infty$: abierto
Condensador	$Z \rightarrow \infty$: abierto	$Z \rightarrow 0$: cortocircuito

La fila de la continua es exactamente lo que el tema 2 daba por sabido, ahora justificado.

La **admitancia** es su inversa, $\bar{Y} = 1/\bar{Z} = G + jB$, y simplifica las asociaciones en paralelo.

3.4.1 Asociación

Las mismas reglas que con resistencias, con números complejos:

$$\bar{Z}_{serie} = \sum \bar{Z}_i, \quad \frac{1}{\bar{Z}_{par}} = \sum \frac{1}{\bar{Z}_i}$$

3.5 Potencia en alterna

Con φ el desfase entre tensión y corriente:

Potencia	Expresión	Unidad	Qué es
Activa	$P = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi$	W	la que se consume de verdad
Reactiva	$Q = V_{ef} I_{ef} \sin \varphi$	var	va y vuelve entre fuente y carga
Aparente	$S = V_{ef} I_{ef}$	VA	la que dimensiona la instalación

Se relacionan como $S^2 = P^2 + Q^2$, y en forma compleja $\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = P + jQ$.

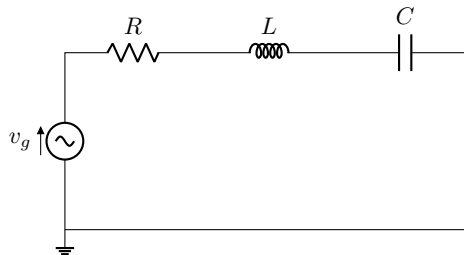
El **factor de potencia** es $\cos \varphi$. Con un factor bajo, la corriente necesaria para entregar la misma potencia activa es mayor, y esa corriente calienta los conductores igual. De ahí que las compañías eléctricas penalicen un factor de potencia bajo y que las instalaciones con muchos motores lleven condensadores para compensarlo: el condensador aporta reactiva de signo contrario a la de la bobina.

3.6 Resonancia

En un circuito RLC serie, la reactancia total es $X = \omega L - 1/(\omega C)$. Se anula cuando

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

En resonancia la impedancia es **mínima y puramente resistiva**, así que la corriente es máxima y está en fase con la tensión.



El **factor de calidad** mide lo selectiva que es la resonancia:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}$$

Un Q alto da un pico estrecho, que es lo que se busca en un sintonizador de radio: seleccionar una emisora y rechazar las vecinas.

En el circuito RLC **paralelo** ocurre lo simétrico: en resonancia la impedancia es máxima y la corriente de la fuente, mínima.

3.7 Respuesta en frecuencia

La **función de transferencia** relaciona salida y entrada en función de la frecuencia:

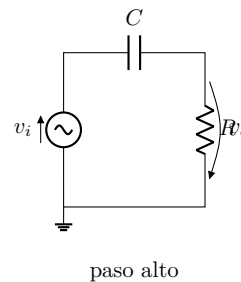
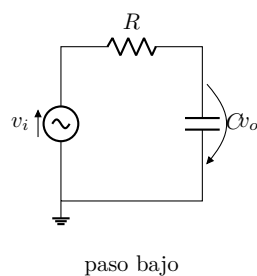
$$H(j\omega) = \frac{\bar{V}_o}{\bar{V}_i}$$

y se representa en un **diagrama de Bode**: el módulo en decibelios, $|H|_{dB} = 20 \log_{10} |H|$, y la fase, ambos frente a la frecuencia en escala logarítmica.

La **frecuencia de corte** es aquella en la que la potencia cae a la mitad, es decir $|H| = 1/\sqrt{2} = 0,707$, o -3 dB.

3.7.1 Los cuatro filtros básicos

Filtro	Deja pasar	Realización simple
Paso bajo	frecuencias bajas	RC con la salida en el condensador
Paso alto	frecuencias altas	RC con la salida en la resistencia
Paso banda	una banda	RLC serie, salida en R
Banda eliminada	todo menos una banda	RLC con salida en L y C



Para el paso bajo RC:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Por encima de f_c la respuesta cae a **20 dB por década**, que es una pendiente de -1 en el diagrama logarítmico. Cada polo añadido suma otros 20 dB por década.

3.7.2 Por qué importa en informática

Tres consecuencias directas:

- **El desacoplo de la alimentación.** Un condensador entre alimentación y tierra es un paso bajo: presenta impedancia baja a las variaciones rápidas de corriente que produce la conmutación, y las absorbe cerca del chip en vez de dejar que viajen por la pista.
- **La integridad de la señal.** Una pista es en realidad una R, una L y una C distribuidas, es decir un paso bajo. Los flancos de una señal digital se redondean, y a partir de cierta frecuencia dejan de reconocerse como niveles lógicos.
- **El muestreo.** Antes de convertir una señal a digital hay que filtrarla con un paso bajo, o las frecuencias por encima de la mitad de la de muestreo aparecen como frecuencias falsas. Es el teorema de Nyquist, y el filtro se llama antialiasing precisamente por eso.

El análisis en alterna, los fasores y la respuesta en frecuencia están desarrollados en Hayt et al., 2019, Nilsson y Riedel, 2008 y Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024a.

Dispositivos electrónicos

Tema 4 del programa. Los semiconductores y los tres dispositivos que se construyen con ellos: el diodo, el transistor bipolar y el transistor de efecto de campo.

4.1 Semiconductores

Un semiconductor tiene una conductividad intermedia entre la de un conductor y la de un aislante, y —esto es lo que lo hace útil— **modificable**.

La explicación está en la estructura de bandas. En un aislante la banda prohibida es grande y ningún electrón la salta; en un conductor las bandas se solapan; en un semiconductor la banda prohibida es pequeña, del orden de 1 eV, así que la agitación térmica basta para que algunos electrones la crucen.

Material	Banda prohibida	Uso
Silicio	1,12 eV	el 95 % de los circuitos integrados
Germanio	0,67 eV	histórico, tensión de codo menor
Arseniuro de galio	1,42 eV	alta frecuencia y optoelectrónica

Cuando un electrón salta a la banda de conducción deja un **hueco** en la de valencia. El hueco se comporta como una carga positiva móvil, y la corriente en un semiconductor la llevan los dos: electrones y huecos.

4.1.1 Dopado

Añadir impurezas controladas cambia la conductividad en varios órdenes de magnitud:

Tipo	Impureza	Portadores mayoritarios
N	pentavalente (fósforo, arsénico)	electrones
P	trivalente (boro, galio)	huecos

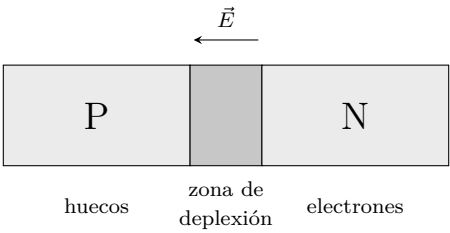
El material dopado sigue siendo **eléctricamente neutro**: se han añadido cargas móviles, no carga neta. Es la confusión más frecuente del tema.

4.2 La unión PN

Al unir un semiconductor tipo P con uno tipo N ocurren dos cosas seguidas:

1. Los electrones del lado N difunden hacia el P y los huecos al revés, y se recombinan.

2. Quedan los iones fijos, sin portadores móviles: es la **zona de deplexión**, y el campo eléctrico que crean detiene la difusión.
- En equilibrio hay una barrera de potencial de unos 0,7 V en silicio.



4.2.1 Polarización

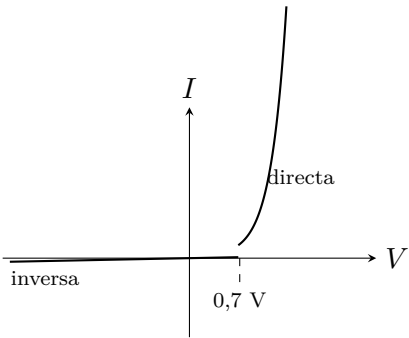
Polarización	Conexión	Efecto sobre la zona de deplexión	Corriente
Directa	+ al P, - al N	se estrecha	crece exponencialmente por encima de 0,7 V
Inversa	+ al N, - al P	se ensancha	despreciable, del orden de nA

Ese comportamiento asimétrico es lo que convierte la unión en un dispositivo útil, y es todo el contenido del diodo.

4.3 El diodo

La ecuación de Shockley describe la característica:

$$I = I_S \left(e^{V/(nV_T)} - 1 \right), \quad V_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV a } 300 \text{ K}$$



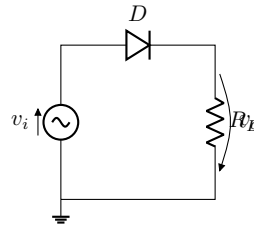
Para analizar circuitos se usan modelos simplificados, y elegir el adecuado es parte del ejercicio:

Modelo	Aproximación	Cuándo
Ideal	interruptor: 0 V en directa, abierto en inversa	estimaciones rápidas
Con tensión de codo	0,7 V constante en directa	el habitual

Modelo	Aproximación	Cuándo
Con resistencia	0,7 V más r_d en serie	corrientes altas
Exponencial	la ecuación completa	análisis preciso o simulación

4.3.1 Aplicaciones

Rectificación. Convertir alterna en continua, que es el primer paso de cualquier fuente de alimentación.



rectificador de media onda

El de **media onda** deja pasar un semiciclo; el de **onda completa** con puente de cuatro diodos aprovecha los dos, y un condensador en paralelo con la carga alisa la salida. El rizado que queda es inversamente proporcional a la capacidad, que es la razón de que las fuentes lleven condensadores grandes.

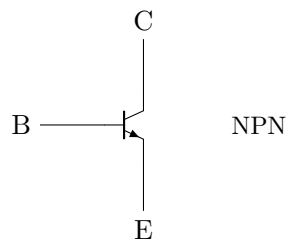
Diodo Zener. Diseñado para trabajar en ruptura inversa, donde mantiene una tensión casi constante. Sirve como referencia de tensión y como protección.

LED. La recombinación en directa emite fotones. Su tensión de codo depende del color, de 1,8 V en rojo a 3,4 V en azul, y **siempre necesita una resistencia en serie**: sin ella, la característica exponencial hace que un pequeño exceso de tensión lo destruya.

Fotodiodo y célula solar. El proceso inverso: la luz genera pares electrón-hueco.

4.4 El transistor bipolar

Tres regiones dopadas alternadamente, NPN o PNP, con dos uniones. Tres terminales: emisor, base y colector.



La relación fundamental:

$$I_E = I_B + I_C, \quad I_C = \beta I_B, \quad \beta \approx 100-300$$

Una corriente pequeña en la base controla una mucho mayor en el colector: eso es la **amplificación**.

4.4.1 Regiones de trabajo

Región	Unión BE	Unión BC	Comportamiento
Corte	inversa	inversa	no conduce: interruptor abierto
Activa	directa	inversa	$I_C = \beta I_B$: amplificador
Saturación	directa	directa	conduce al máximo: interruptor cerrado
Inversa	inversa	directa	no se usa

Las dos aplicaciones salen directamente de la tabla:

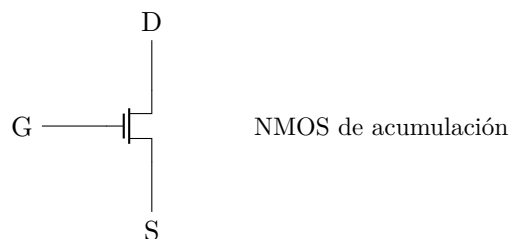
- **Amplificar:** se polariza en la región activa, en un punto de trabajo estable, y la señal se superpone.
- **Conmutar:** se alterna entre corte y saturación. Es lo que hace la lógica digital, y la razón de que la región activa se evite en un circuito digital: ahí el transistor disipa potencia.

β varía mucho entre unidades del mismo modelo y con la temperatura, así que un circuito **no debe depender de su valor exacto**. La polarización por divisor de tensión en la base con resistencia en el emisor es la configuración habitual precisamente porque estabiliza el punto de trabajo frente a esa variación.

4.5 El transistor de efecto de campo

Aquí el control es por **tensión** y no por corriente, y ese es el motivo de que domine la electrónica digital.

El MOSFET tiene puerta, drenador, surtidor y sustrato. La puerta está aislada por óxido, así que **no consume corriente en régimen permanente**.



Región	Condición	Corriente
Corte	$V_{GS} < V_T$	$I_D \approx 0$
Óhmica	$V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_T$	crece con V_{DS} : se comporta como resistencia
Saturación	$V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	$I_D \approx \frac{k}{2}(V_{GS} - V_T)^2$

4.5.1 Por qué el MOSFET desplazó al bipolar

	Bipolar	MOSFET
Control	por corriente de base	por tensión de puerta

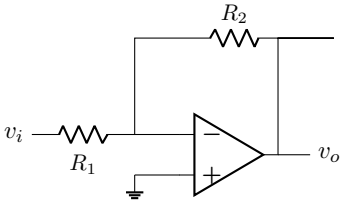
	Bipolar	MOSFET
Consumo en régimen permanente	corriente de base continua	prácticamente nulo
Integración	menos denso	mucho más denso
Simetría N y P	menos práctica	inmediata: es la base de CMOS
Velocidad de conmutación	alta	alta, y escala mejor

La segunda fila es la decisiva: con miles de millones de transistores, una corriente de control por cada uno sería inviable. La tercera y la cuarta explican por qué toda la lógica digital moderna es CMOS, que es el tema siguiente.

4.6 El amplificador operacional

Un amplificador diferencial de ganancia muy alta, empaquetado como bloque. Se analiza con dos hipótesis, el **cortocircuito virtual**:

1. La corriente por las entradas es nula, porque la impedancia de entrada es enorme.
2. Con realimentación negativa, las dos entradas están al mismo potencial.



amplificador inversor

Para el inversor de la figura:

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_i$$

La ganancia la fijan **dos resistencias**, no el operacional. Esa es la idea central: la realimentación negativa cambia una ganancia enorme, imprecisa y variable con la temperatura por una pequeña, precisa y estable.

Configuración	Ganancia
Inversor	$-R_2/R_1$
No inversor	$1 + R_2/R_1$
Seguidor	1, con impedancia de entrada altísima
Sumador	$-\sum (R_f/R_i) v_i$
Comparador	saturación, sin realimentación negativa

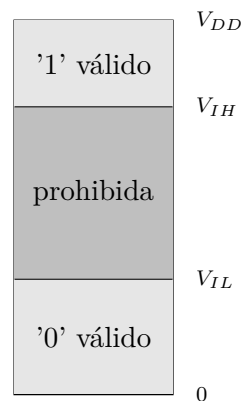
El seguidor no amplifica y sirve para lo que se llama adaptación de impedancias: permite conectar una fuente débil a una carga exigente sin que la señal se hunda. El desarrollo de los dispositivos está en Sedra y Smith, 2020, Malvino y Bates, 2007 y Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024b.

Fundamentos de electrónica digital

Tema 5 del programa. Cómo se representa un valor lógico con una tensión, qué parámetros describen una familia lógica y cómo se construye una puerta con transistores.

5.1 De la tensión al bit

Un circuito digital trabaja con dos estados, pero las tensiones son continuas. La solución es asignar rangos:



Parámetro	Qué es
V_{OH}	tensión mínima que la salida garantiza para un '1'
V_{OL}	tensión máxima que la salida garantiza para un '0'
V_{IH}	tensión mínima que la entrada reconoce como '1'
V_{IL}	tensión máxima que la entrada reconoce como '0'

Y de ahí el parámetro que hace robusta la lógica digital, el **margen de ruido**:

$$NM_H = V_{OH} - V_{IH}, \quad NM_L = V_{IL} - V_{OL}$$

Es cuánto ruido puede sumarse a una señal sin que deje de interpretarse bien. La existencia de ese margen es la razón de que un sistema digital sea fiable donde uno analógico se degrada: el ruido por debajo del margen **desaparece** al pasar por la puerta siguiente, en vez de acumularse etapa tras etapa.

5.2 Parámetros de una familia lógica

Parámetro	Definición	Se quiere
Margen de ruido	ver arriba	grande
Retardo de propagación t_p	de la entrada al 50 % de la salida	pequeño
Consumo estático	potencia en reposo	nulo
Consumo dinámico	potencia al conmutar	pequeño
Fan-out	cuántas entradas puede atacar una salida	grande
Fan-in	cuántas entradas tiene la puerta	según el diseño
Producto retardo-potencia	$t_p \cdot P$	pequeño: es la figura de mérito

El producto retardo-potencia es lo que permite comparar familias, porque casi siempre se puede cambiar velocidad por consumo y al revés.

5.3 Familias lógicas

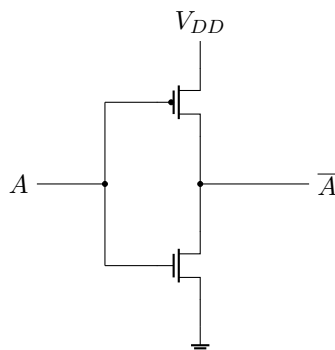
Familia	Tecnología	Consumo estático	Velocidad	Estado
RTL, DTL	resistencias y diodos	alto	baja	histórica
TTL	bipolar	apreciable	media	histórica
ECL	bipolar sin saturar	muy alto	muy alta	nichos
NMOS	solo transistores N	apreciable	media	superada
CMOS	N y P complementarios	casi nulo	alta	la vigente

La columna del consumo estático explica el resultado. En NMOS hay siempre un camino resistivo entre alimentación y tierra en uno de los dos estados, y con millones de puertas eso es insostenible. CMOS no lo tiene.

5.4 Lógica CMOS

La idea: **dos redes complementarias**. Una de transistores P entre la alimentación y la salida, y otra de N entre la salida y tierra, construidas de forma que en cada combinación de entradas conduzca exactamente una.

5.4.1 El inversor



A	PMOS	NMOS	Salida
0	conduce	corte	1
1	corte	conduce	0

En los dos estados **uno de los dos está cortado**, así que no circula corriente de la alimentación a tierra. De ahí que el consumo estático sea prácticamente nulo: solo las corrientes de fuga.

5.4.2 Reglas de construcción

Para cualquier función:

- La red N implementa la función complementada: **serie es AND, paralelo es OR**.
- La red P es su dual: serie es OR, paralelo es AND.
- La salida está **siempre** negada. Una puerta CMOS natural es NAND o NOR, no AND ni OR.

Una NAND de dos entradas son dos N en serie y dos P en paralelo. Una AND se construye como NAND seguida de inversor, así que cuesta **más** transistores que la NAND: en CMOS, negar es gratis y no negar es caro. Es lo contrario de la intuición del álgebra de Boole, y explica por qué los circuitos reales están llenos de NAND y NOR.

Puerta	Transistores
Inversor	2
NAND o NOR de 2 entradas	4
AND u OR de 2 entradas	6
XOR de 2 entradas	8 a 12

5.5 Consumo

$$P = \underbrace{\alpha C_L V_{DD}^2 f}_{\text{dinámico}} + \underbrace{I_{corto} V_{DD}}_{\text{cortocircuito}} + \underbrace{I_{fuga} V_{DD}}_{\text{estático}}$$

Término	De dónde sale
Dinámico	cargar y descargar la capacidad de salida en cada conmutación
Cortocircuito	el instante de la transición en que los dos conducen
Fuga	corriente que atraviesa el transistor cortado

El dinámico domina, y su dependencia **cuadrática con la tensión** es el resultado que ha gobernado el diseño de circuitos integrados durante décadas: bajar la tensión de alimentación de 5 V a 1 V divide el consumo por 25.

Esa es también la conexión con Arquitectura de Computadores: cuando la tensión dejó de poder bajar —porque las corrientes de fuga crecían— la frecuencia dejó de poder subir, y la industria pasó a los procesadores multinúcleo.

5.6 Retardo y capacidad

El retardo de una puerta es el tiempo que tarda en cargar la capacidad que ve a la salida, y esa capacidad es la de las puertas que alimenta:

$$t_p \approx \frac{C_L V_{DD}}{2 I_D}$$

De ahí tres consecuencias prácticas:

- **El fan-out afecta a la velocidad.** Más entradas conectadas es más capacidad, y por tanto más retardo. No es un límite abrupto sino una degradación.
- **Una pista larga es capacidad.** En un circuito integrado moderno, el retardo de las interconexiones supera al de los transistores.
- **Un camino con muchas puertas en serie limita la frecuencia.** El más lento se llama camino crítico, y es lo que fija el periodo de reloj.

5.7 Circuitos combinacionales y secuenciales

	Combinacional	Secuencial
La salida depende de	solo de las entradas actuales	también del estado
Tiene memoria	no	sí
Ejemplos	multiplexor, sumador, decodificador	biestable, registro, contador

Un **biestable** se construye con dos inversores realimentados: cada uno mantiene la entrada del otro, así que el par tiene dos estados estables. Es la celda de memoria estática, y es lo que hay dentro de una caché.

En un sistema síncrono, los biestables se actualizan con el flanco del reloj y la lógica combinacional entre ellos tiene que estabilizarse antes del flanco siguiente:

$$T_{reloj} \geq t_{clk \rightarrow Q} + t_{lógica} + t_{setup}$$

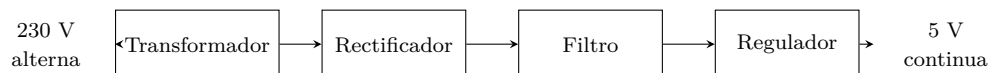
Esa desigualdad es la que define la frecuencia máxima de un circuito digital, y resume por qué este tema termina donde empiezan Estructura de Computadores y Arquitectura de Computadores. El desarrollo de las familias lógicas y de CMOS está en Sedra y Smith, 2020, Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024b y Hambley, 2001.

Circuitos electrónicos básicos

Tema 6 del programa. Los bloques que se construyen con los dispositivos del tema 4: fuentes de alimentación, amplificadores, filtros activos y las interfaces entre el mundo analógico y el digital.

6.1 Fuente de alimentación lineal

Convierte la red alterna en continua estable. Cuatro etapas, y cada una resuelve un problema del tema anterior:



Etapa	Qué hace	Con qué
Transformador	baja la tensión y aísla de la red	inducción del tema 1
Rectificador	elimina el semiciclo negativo	puente de cuatro diodos
Filtro	reduce el rizado	condensador en paralelo
Regulador	fija la salida pese a la carga	Zener, o integrado

El **rizado** que deja el condensador es aproximadamente

$$V_r \approx \frac{I_{carga}}{2fC}$$

con $2f$ porque el rectificador de onda completa recarga dos veces por ciclo. Reducirlo exige más capacidad, y de ahí que las fuentes lineales lleven condensadores voluminosos.

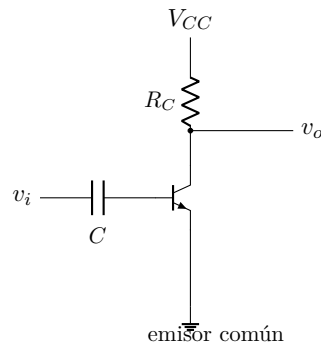
La alternativa moderna es la **fente conmutada**: en vez de disipar el exceso en un regulador lineal, conmuta a alta frecuencia y filtra. Su rendimiento supera el 90 % frente al 40-60 % de la lineal, y sus componentes son mucho más pequeños porque el filtrado a decenas de kilohercios necesita bobinas y condensadores menores. Es lo que hay dentro de cualquier cargador actual.

6.2 Amplificadores

6.2.1 Con transistor bipolar

Las tres configuraciones, según qué terminal es común a entrada y salida:

Configuración	Ganancia de tensión	Ganancia de corriente	Impedancia de entrada	Uso
Emisor común	alta, e invierte	alta	media	amplificación general
Colector común	≈ 1	alta	alta	adaptación de impedancias
Base común	alta	≈ 1	baja	alta frecuencia



El emisor común amplifica y **invierte**: la ganancia es negativa. El colector común no amplifica en tensión y sirve para lo contrario, que una fuente débil pueda atacar una carga exigente sin que la señal se hunda.

La polarización es lo que decide si el circuito funciona. Hay que fijar un punto de trabajo en la región activa que no se desplace con la temperatura ni con la dispersión de β . La solución habitual es el divisor de tensión en la base con una resistencia en el emisor, que introduce realimentación negativa: si la corriente sube, la tensión del emisor sube y la de base-emisor baja, lo que compensa.

Los condensadores de acoplo separan la continua de la polarización de la señal alterna, y por eso el circuito se analiza dos veces: en continua para el punto de trabajo y en alterna para la ganancia.

6.2.2 Con amplificador operacional

Es lo que se usa en la práctica, porque la ganancia la fijan resistencias en vez de un dispositivo. Las configuraciones del tema 4 más las que faltan:

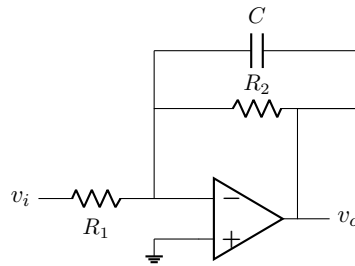
Circuito	Salida
Inversor	$-\frac{R_2}{R_1} v_i$
No inversor	$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_i$
Sumador	$-R_f \sum \frac{v_i}{R_i}$
Restador	$\frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$
Integrador	$-\frac{1}{RC} \int v_i dt$
Derivador	$-RC \frac{dv_i}{dt}$

El **restador**, o amplificador diferencial, es el que se usa con sensores: amplifica la diferencia entre sus entradas y rechaza lo que es común a las dos, que suele ser el ruido captado por igual en los dos cables. Esa capacidad se mide con la relación de rechazo en modo común.

Y una limitación real que hay que conocer: el operacional no tiene ganancia infinita a cualquier frecuencia. El **producto ganancia-ancho de banda** es constante, así que pedir más ganancia reduce el ancho de banda en la misma proporción. Un operacional con producto de 1 MHz y ganancia 100 solo llega a 10 kHz.

6.3 Filtros activos

Un filtro RC pasivo tiene dos problemas: no puede amplificar, y **la carga conectada a su salida cambia su respuesta**. Añadir un operacional resuelve los dos.



paso bajo activo de primer orden

$$H(j\omega) = -\frac{R_2/R_1}{1 + j\omega R_2 C}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

Amplifica en la banda de paso y atenúa por encima de f_c , y como la salida del operacional tiene impedancia baja, conectar una carga no altera la respuesta. Los filtros de orden superior se construyen encadenando etapas.

6.4 De analógico a digital y al revés

La frontera entre este tema y la informática.

6.4.1 Conversión analógico-digital

Tres pasos, y cada uno introduce su propia limitación:

Paso	Qué hace	Limitación
Muestreo	toma valores a intervalos regulares	debe cumplir Nyquist
Cuantificación	asigna a cada muestra un nivel de un conjunto finito	error de cuantificación
Codificación	escribe el nivel en binario	número de bits

El **teorema de Nyquist** exige muestrear a más del doble de la frecuencia máxima de la señal. Si no se cumple, las frecuencias altas aparecen como frecuencias bajas falsas, y el efecto es irreversible: por eso se filtra con un paso bajo **antes** de muestrear, y no después.

Con n bits hay 2^n niveles, y la relación señal-ruido de cuantificación es aproximadamente

$$\text{SNR} \approx 6,02 n + 1,76 \text{ dB}$$

Cada bit añade unos 6 dB. De ahí que el audio de 16 bits dé unos 98 dB, que es suficiente para el oído, y que el audio profesional use 24.

6.4.2 Conversión digital-analógica

La inversa. La más directa es la **red R-2R**, una escalera de resistencias que pesa cada bit según su posición, seguida de un operacional sumador. Su salida es escalonada, así que se filtra con un paso bajo para reconstruir la señal.

Es la conexión de toda la asignatura con la informática: un sensor entrega una magnitud física continua, el circuito la acondiciona y la convierte a números, el ordenador la procesa, y el camino inverso devuelve una señal al mundo. El primer y el último tramo son este tema.

6.5 Circuitos de interfaz

Circuito	Para qué
Divisor de tensión con sensor resistivo	convertir resistencia en tensión
Puente de Wheatstone	medir variaciones pequeñas de resistencia
Amplificador de instrumentación	amplificar la diferencia y rechazar el ruido común
Comparador con histéresis	convertir una señal lenta en un flanco limpio
Optoacoplador	aislar galvánicamente dos partes del circuito

El **comparador con histéresis**, o disparador de Schmitt, merece detalle: un comparador sin histéresis conmuta varias veces cuando la señal cruza el umbral con ruido, y produce una ráfaga de flancos falsos. La histéresis separa el umbral de subida del de bajada, así que una vez conmutado hace falta una excursión apreciable para volver. Es lo que hay a la entrada de cualquier circuito digital que reciba una señal del exterior, y también lo que elimina los rebotes de un pulsador mecánico.

Y el **optoacoplador** resuelve un problema de seguridad: un LED y un fototransistor en el mismo encapsulado transmiten la señal sin conexión eléctrica, así que un fallo en la parte de potencia no alcanza a la parte lógica. El desarrollo de estos circuitos está en Sedra y Smith, 2020, Malvino y Bates, 2007 y Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024b.

Temario práctico

Las cinco prácticas de laboratorio del programa. La parte de la asignatura donde lo medido no coincide con lo calculado, y hay que explicar por qué.

7.1 Instrumentación

Instrumento	Mide o genera	Cómo se conecta
Multímetro	tensión, corriente, resistencia, continuidad	tensión en paralelo, corriente en serie
Osciloscopio	forma de onda en el tiempo	sonda en paralelo, masa a la referencia
Generador de funciones	señales senoidales, cuadradas, triangulares	a la entrada del circuito
Fuente de alimentación	continua, con límite de corriente	a la alimentación

Cuatro cosas que se aprenden equivocándose, y conviene no equivocarse:

- **El amperímetro va en serie.** Conectarlo en paralelo con una fuente pone un cortocircuito a través de un instrumento de resistencia casi nula, y funde su fusible.
- **Las masas del osciloscopio y del generador están unidas a tierra.** Conectar la pinza de masa a un punto que no sea la referencia común cortocircuita parte del circuito. Para medir entre dos puntos flotantes hay que usar dos canales y restar.
- **Poner el límite de corriente antes de conectar.** Es lo que evita que un error de montaje destruya los componentes.
- **Comprobar el acoplo del osciloscopio.** En modo CA se pierde la componente continua, y una señal digital medida así parece centrada en cero.

7.1.1 Incertidumbre

Ninguna medida vale sin su incertidumbre. Las tres fuentes:

Fuente	De dónde viene
Del instrumento	su especificación, típicamente un porcentaje más unos dígitos
De carga	el instrumento altera el circuito que mide
De los componentes	la tolerancia: $\pm 5\%$ en una resistencia corriente

El **error de carga** es el que más sorprende: un voltímetro con $10\text{ M}\Omega$ de resistencia de entrada, midiendo sobre una resistencia de $1\text{ M}\Omega$, altera el circuito lo suficiente para que la lectura no sea la tensión que había. Se corrige teniendo en cuenta la resistencia del instrumento en el cálculo.

Y la tolerancia explica por sí sola la mayor parte de las diferencias entre lo calculado y lo medido: con resistencias al 5 %, un divisor puede desviarse un 10 % sin que nada esté mal.

7.2 Práctica 1. Circuitos de corriente continua

Objetivo: comprobar experimentalmente las leyes y los teoremas del tema 2.

Montajes:

- Divisor de tensión: medir y comparar con $V_2 = V_g R_2 / (R_1 + R_2)$.
- Asociaciones serie y paralelo, midiendo la resistencia equivalente.
- Un circuito con dos fuentes, para comprobar la superposición midiendo la contribución de cada una por separado.
- Thévenin: medir la tensión en circuito abierto y la corriente de cortocircuito entre dos terminales, y comprobar que la red se comporta como el equivalente.
- Máxima transferencia de potencia: variar R_L y representar P frente a R_L .

Lo que se observa y hay que explicar:

Observación	Causa
El divisor no da exactamente lo calculado	tolerancia de las resistencias
Con R grandes la desviación crece	el voltímetro carga el circuito
La fuente no da exactamente la tensión ajustada	su resistencia interna
El máximo de P es plano alrededor de $R_L = R_{Th}$	la curva tiene derivada nula en el máximo

La última fila es la que conviene mirar: el máximo es plano, así que una desadaptación moderada apenas pierde potencia.

7.3 Práctica 2. Circuitos de corriente alterna

Montajes:

- Medir amplitud, periodo y valor eficaz de una senoide con el osciloscopio.
- Circuito RC: medir el desfase entre tensión y corriente, y comprobar que se acerca a -90° al bajar la frecuencia.
- Respuesta en frecuencia de un filtro RC: barrer frecuencias, medir la ganancia, representar el diagrama de Bode y localizar f_c .
- Circuito RLC serie: encontrar la resonancia y medir el ancho de banda.
- Transitorio RC con entrada cuadrada: medir τ sobre la pantalla.

Cómo se mide el desfase. Con las dos señales en pantalla, se mide el desfase temporal Δt entre pasos por cero y se convierte:

$$\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t}{T}$$

Cómo se mide f_c . Es la frecuencia a la que la amplitud de salida cae a 0,707 de la de entrada. En decibelios, -3 dB .

Cómo se mide τ . El tiempo que tarda en alcanzar el 63,2 % del valor final, o el 37 % descargando. Con una onda cuadrada de periodo mucho mayor que 5τ , cada semiciclo es una carga o una descarga completa.

Observación	Causa
f_c medida distinta de $1/(2\pi RC)$	tolerancia, y la capacidad de la sonda
La resonancia sale a frecuencia algo menor	resistencia y capacidad parásitas de la bobina
El pico de resonancia es menos alto de lo previsto	la resistencia interna de la bobina baja el Q

7.4 Práctica 3. Circuitos básicos con dispositivos semiconductores

Montajes:

- Característica I - V del diodo: variar la tensión y medir la corriente. Representarla y localizar la tensión de codo.
- Rectificador de media onda y de onda completa, con el osciloscopio a la salida.
- Efecto del condensador de filtro: medir el rizado con varias capacidades.
- Diodo Zener como regulador: variar la entrada y comprobar que la salida se mantiene.
- Transistor en conmutación: llevarlo de corte a saturación y medir V_{CE} en cada estado.

Lo que hay que retener de la práctica:

- La tensión de codo **no es exactamente 0,7 V**: depende de la corriente y de la temperatura. Se mide, no se supone.
- La salida del rectificador de media onda tiene un pico de $V_m - 0,7$, no V_m .
- El rizado baja al aumentar la capacidad, y sigue $V_r \approx I/(2fC)$.
- En saturación, V_{CE} está en torno a 0,2 V y no en cero. Multiplicado por la corriente, esa es la potencia que un transistor de conmutación disipa.

7.5 Práctica 4. Caracterización de circuitos para lógica digital

Montajes:

- Función de transferencia de un inversor: barrer la tensión de entrada y medir la de salida. Sale la curva con la transición brusca del tema 5.
- Determinar V_{IL} , V_{IH} , V_{OL} y V_{OH} sobre esa curva, en los puntos de pendiente -1 .
- Calcular los márgenes de ruido.
- Retardo de propagación: con una entrada cuadrada, medir el desplazamiento entre el 50 % de la entrada y el 50 % de la salida.
- Efecto del fan-out: conectar varias entradas a la salida y medir cómo crece el retardo.
- Comparar el consumo en reposo con el consumo conmutando.

Lo que la práctica demuestra:

Medida	Lo que confirma
Consumo en reposo casi nulo	en CMOS no hay camino de V_{DD} a tierra en régimen permanente
El consumo crece con la frecuencia	el término dinámico $\alpha CV^2 f$
El retardo crece con el fan-out	más entradas es más capacidad que cargar
Los márgenes de ruido son amplios	por qué un sistema digital tolera ruido

7.6 Práctica 5. Amplificador operacional

Montajes:

- Inversor y no inversor: medir la ganancia y compararla con el cociente de resistencias.
- Seguidor: comprobar que la salida sigue a la entrada y que conectar una carga no hunde la señal.
- Sumador: comprobar que la salida es la suma ponderada.
- Integrador con entrada cuadrada: la salida debe ser triangular.
- Comprobar la saturación: subir la amplitud hasta que la salida quede recortada por la alimentación.
- Medir el ancho de banda a dos ganancias distintas y comprobar que el producto ganancia-ancho de banda es aproximadamente constante.

Lo que hay que observar:

- **La salida no puede superar la alimentación.** Un inversor de ganancia 100 con entrada de 1 V y alimentación de ± 12 V no da 100 V: satura en 12.
- **A frecuencia alta la ganancia cae.** Es el producto ganancia-ancho de banda del tema 6, y se mide.
- **La velocidad de subida está limitada.** Con un escalón grande, la salida sube con una rampa y no instantáneamente.
- El integrador **deriva** si la entrada tiene componente continua, porque la integra indefinidamente. Se corrige con una resistencia en paralelo con el condensador.

7.7 El informe

Lo que se entrega por práctica:

1. Objetivo y fundamento teórico, con las expresiones que se van a comprobar.
2. Esquema del montaje y lista de componentes, con sus valores nominales y su tolerancia.
3. Valores calculados de antemano.
4. Valores medidos, **con su incertidumbre**.
5. Comparación entre calculado y medido, con el error relativo.
6. **Explicación de las diferencias**, y conclusiones.

El punto 6 es el que se evalúa de verdad. Las causas posibles son casi siempre las mismas —tolerancia de los componentes, carga del instrumento, resistencia interna de las fuentes, elementos parásitos, temperatura—, y lo que se pide es identificar cuál explica lo observado y en qué medida. Una diferencia del 4 % con resistencias al 5 % no necesita más explicación; una del 40 % sí. Los guiones de laboratorio y sus problemas están en López Villanueva y Jiménez Tejada, 2008b y Padilla de la Torre y Tienda Luna, 2024b.

Bibliografía

- Álvarez Marquina, A., et al. (2010). *Fundamentos Físicos y Tecnológicos de la Informática*. Pearson.
- Hambley, A. R. (2001). *Electrónica* (2.^a ed.). Prentice-Hall.
- Hayt, W. H., Kemmerly, J. E., & Durbin, S. M. (2019). *Análisis de Circuitos en Ingeniería* (9.^a ed.). McGraw Hill.
- López Villanueva, J. A., & Jiménez Tejada, J. A. (2008a). *Fundamentos de Teoría de Circuitos para Electrónica*. Universidad de Granada.
- López Villanueva, J. A., & Jiménez Tejada, J. A. (2008b). *Problemas de Electrónica Básica*. Universidad de Granada.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2007). *Principios de Electrónica* (7.^a ed.). McGraw Hill.
- Nilsson, J. W., & Riedel, S. A. (2008). *Circuitos Eléctricos* (8.^a ed.). Pearson.
- Padilla de la Torre, M., & Tienda Luna, I. M. (2024a). *Fundamentos Físicos y Tecnológicos. Parte I*. Editorial Técnica Avicam.
- Padilla de la Torre, M., & Tienda Luna, I. M. (2024b). *Fundamentos Físicos y Tecnológicos. Parte II*. Editorial Técnica Avicam.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2020). *Microelectronic Circuits* (8.^a ed.). Oxford University Press.