

FutFi: Tema 2

Definiciones

Circuito eléctrico: conjunto de elementos o dispositivos eléctricos o electrónicos interconectados con el objetivo de transportar energía o información.

Corriente eléctrica: flujo de partículas cargadas que circulan por el interior de un material conductor.

Densidad de corriente: magnitud vectorial que expresa la dirección, sentido y cantidad de cargas que atraviesan un conductor por unidad de área y tiempo.

Ley de Ohm: la relación entre la diferencia de potencial entre dos puntos de un conductor y la intensidad que circula por él es constante.

Red: sistema de conductores eléctricos que forman un circuito cerrado.

Nudo: terminal en el que confluyen 3 o más elementos.

Rama: conjunto de elementos entre dos nudos.

Lazo: conjunto de ramas que forman un camino cerrado.

Malla: lazo que no contiene ningún otro lazo en su interior.

Ley de los nudos: en todo instante de tiempo, la suma de las corrientes que concurren a un nudo es igual a cero.

Ley de las mallas: en todo instante de tiempo, la suma de subidas y caídas de tensión a lo largo de un lazo es igual a cero.

Principio de superposición: dado un circuito lineal que contenga múltiples fuentes independientes, la corriente y la tensión en cualquier punto del circuito se corresponde con la suma de las contribuciones de cada fuente por separado.

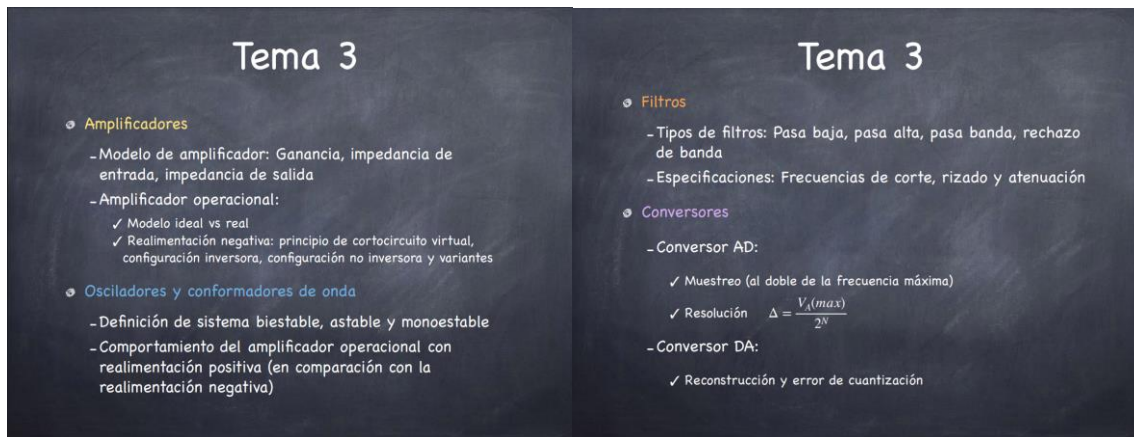
Teorema de Thévenin: toda red formada por generadores y resistencias que tengan dos terminales de salida A y B, puede sustituirse por la combinación en serie de un generador de tensión V_{th} y una resistencia R_{eq} .

Teorema de Norton: toda red formada por generadores y resistencias que tengan terminales de salida A y B, puede sustituirse por la combinación en paralelo de un generador de corriente I_n y una resistencia R_{eq} .

Funciones sinusoidales: modo en el que se transporta la corriente desde las centrales hasta los terminales de usuario. Permite un transporte eficaz y seguro.

Ley de Joule: cuando fluye una corriente en el interior de un conductor se producen pérdidas de energía en forma de calor debido a las colisiones de los electrones contra los átomos del material conductor.

FutFi: Tema 3



Tipos de señales electrónicas

Señales continuas en el tiempo y en intensidad: comúnmente conocidas como señales analógicas, el mundo físico es inherentemente analógico.

Señales discretas en el tiempo y continuas en intensidad: son también señales analógicas en el sentido de que pueden tomar cualquier valor (sensores de temperatura, presión...).

Señales discretas en tiempo y en intensidad: son las señales digitales convencionales. Pueden tomar solo 2 valores simbólicos: '0' o '1'.

Señales analógicas

Son la traducción a señal eléctrica (tensión, corriente o incluso carga) de alguna magnitud física externa.

- Pros: mucha información, sistemas con pocos componentes.
- Contras: son muy sensibles al ruido, diseño difícil de automatizar.

Señales digitales

Permiten una representación simbólica de la información.

- Pros: robustez frente al ruido, diseño fácil de automatizar.
- Contras: sistemas con muchos componentes.

¿Qué es un sistema electrónico?

Es un sistema destinado a extraer, almacenar, transportar o procesar información mediante señales eléctricas.

- Amplificadores: incrementan la intensidad de señales débiles.
- Filtros: separan las señales deseadas de las no deseadas.
- Osciladores y conformadores de onda: generan o cambian la forma de las señales.
- Sistemas digitales: procesan y almacenan información en formato digital.

Estos bloques se combinan en sistemas de procesamiento de señal, comunicaciones, instrumentación, sistemas de control o sistemas informáticos.

Amplificadores

Un amplificador es un sistema que genera una réplica de la señal de entrada pero con una mayor amplitud.

Tiene 3 parámetros característicos: (***importante**)

- Ganancia(A): relación de amplitud entre la entrada y la salida.
- Impedancia de entrada(Ri): modela la absorción de corriente de la fuente.
- Impedancia de salida(RO): modela el efecto de la carga en la salida.

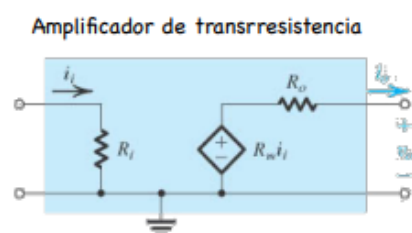
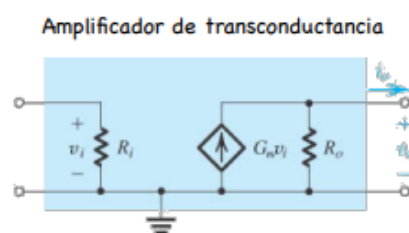
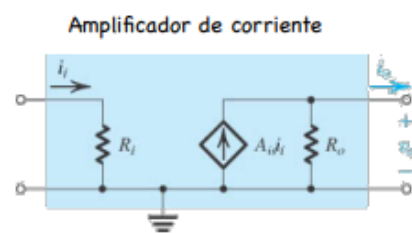
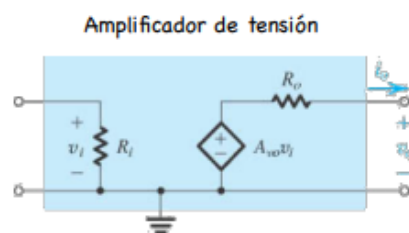
Si conectamos una fuente Vs (con resistencia Rs) y una carga RL tendremos:

$$\frac{v_o}{v_s} = A \frac{R_i}{R_i + R_s} \times \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

Si $R_i \gg R_s$ y $R_o \ll R_L$ nos queda:

$$\frac{v_o}{v_s} \approx A$$

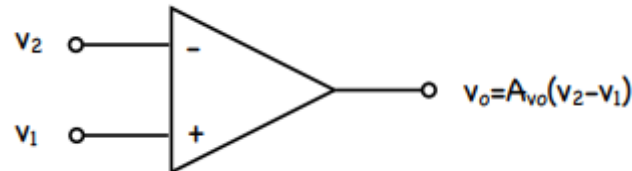
Tipos de amplificador (hay 4 en función de la naturaleza de la entrada y la salida):



Características ideales			
Tipo	Impedancia de entrada	Impedancia de salida	Ganancia
Tensión	∞	0	A_{vo}
Corriente	0	∞	A_{is}
Transconductancia	∞	∞	G_m
Transrresistencia	0	0	R_m

Amplificador operacional (*importante)

Tipo de amplificador de propósito general diseñado inicialmente para la computación analógica. En la actualidad es fundamental en múltiples aplicaciones como filtros, conformadores de onda, conversores, etc.



Se trata por tanto de un amplificador de tensión. Como podemos ver, las características reales no son iguales a las ideales o esperadas: (*importante)

Características			
	Impedancia de entrada	Impedancia de salida	Ganancia
Ideales	∞	0	∞
Reales (UA741)	2 M Ω	75 Ω	2×10^5

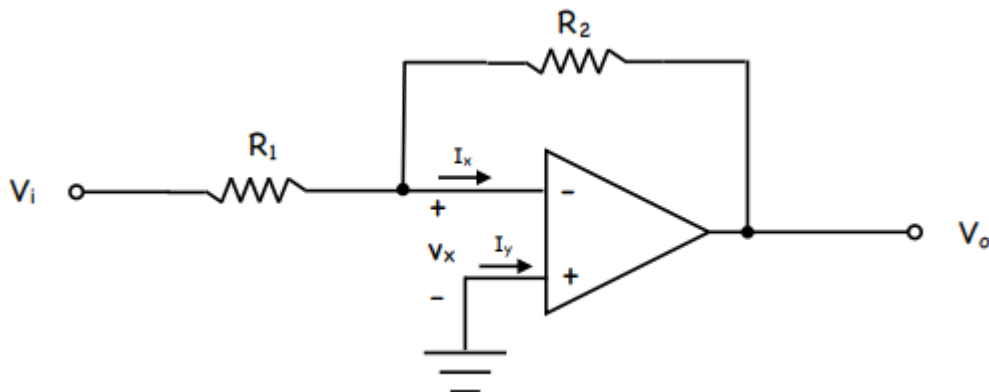
Amplificador operacional con realimentación negativa (*importante)

Se conecta la entrada inversora(-) con la salida.

- Parte de la salida se le “resta” a la entrada: configuración estable.
- Podría conectarse directamente o mediante resistencias, condensadores, etc.
- En función de los componentes utilizados tendremos diferentes comportamientos.

Dentro de este grupo (realimentación negativa) hay otros 2 tipos importantes a partir de los cuales se crean otras variantes más. Estos dos tipos son: configuración inversora y configuración no inversora.

Configuración inversora (*importante)



Asumiendo un amplificador operacional ideal (AOI):

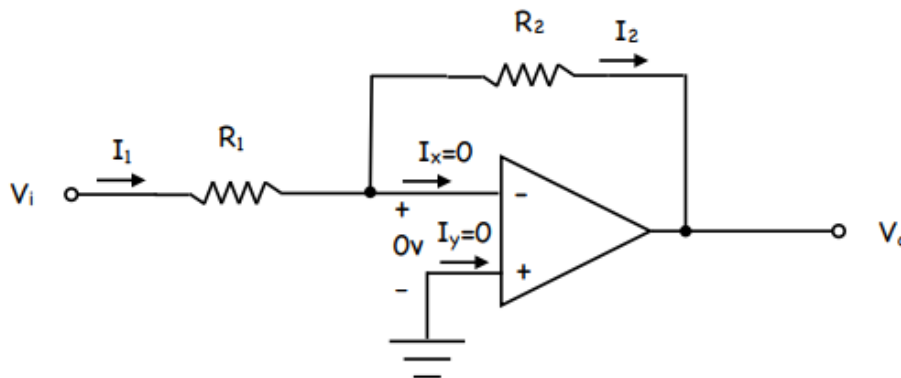
- $R_i = \infty \rightarrow I_x = I_y = 0$

- Si V_0 toma un valor finito (dentro del rango de funcionamiento lineal del amplificador):
 $V_x = -V_0/A_{v0}$ y dado que $A_{v0} = \text{infinito} \rightarrow V_x = 0 \rightarrow$ **Cortocircuito virtual (*importante)**.

Por lo tanto el cortocircuito virtual se da cuando, asumiendo un amplificador operacional ideal, V_0 toma un valor finito quedando la fórmula $V_x = -n^\circ \text{ finito} / +\text{infinito}$, lo cual es 0.

Cortocircuito virtual: igualdad de voltaje entre las dos entradas del amplificador operacional, pero no porque estén físicamente conectadas, sino porque el amplificador (debido a su alta ganancia) ajusta la salida para que esto sea así. La igualdad de voltajes solo es válida con retroalimentación negativa. El amplificador ajusta la salida para que ésta no se sature, y lo hace devolviendo parte de la salida a la entrada inversora, quedando la diferencia entre V_{i-} y V_{i+} prácticamente a 0, por lo que son iguales.

Por lo tanto:

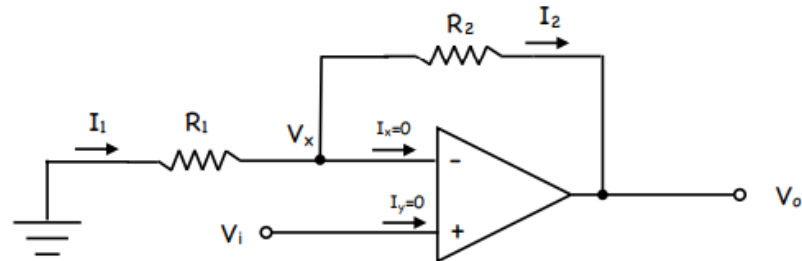


$$\left. \begin{array}{l} I_1 = I_2 \\ I_1 = \frac{V_i - 0}{R_1} \\ I_2 = \frac{0 - V_o}{R_2} \end{array} \right| \Rightarrow \frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0 - V_o}{R_2} \Rightarrow V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

La salida es una versión invertida de la entrada multiplicada por un factor R_2/R_1 .

Configuración no inversora (*importante)

Configuración no inversora



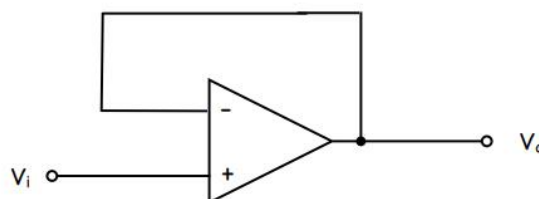
Por el principio de cortocircuito virtual $\Rightarrow V_x = V_i$

$$\left. \begin{array}{l} I_1 = I_2 \\ I_1 = \frac{0 - V_i}{R_1} \\ I_2 = \frac{V_i - V_o}{R_2} \end{array} \right| \Rightarrow \frac{0 - V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_2} \Rightarrow V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_i$$

Donde $V_x = V_i$.

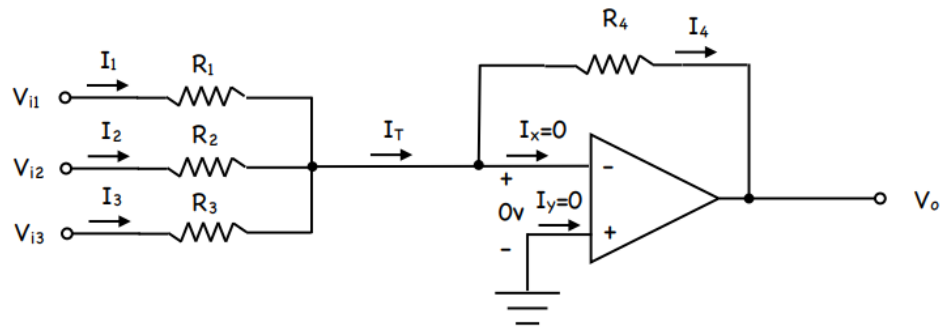
Variantes de las dos anteriores (*importante)

Seguidor de tensión



Por el principio de cortocircuito virtual $\Rightarrow V_o = V_i$

Sumador inversor



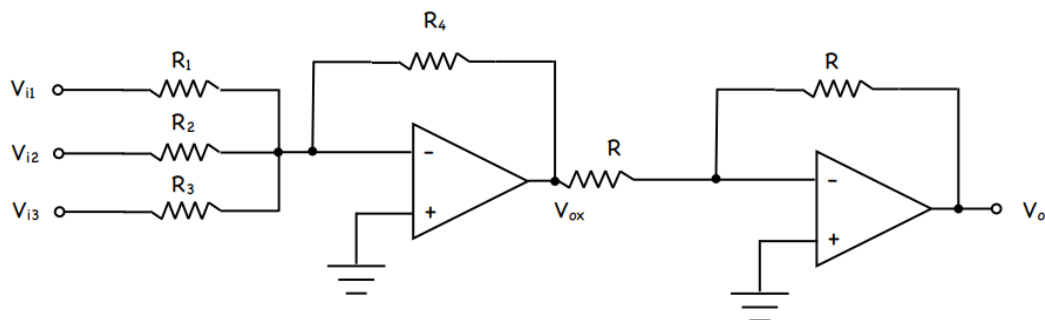
Aplicando el principio de superposición: $V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3}$

donde V_{ox} es la salida cuando sólo tenemos la entrada V_{ix} activa (y las otras dos a cero)

$$\left. \begin{aligned} V_{o1} &= -\frac{R_4}{R_1} V_{i1} \\ V_{o2} &= -\frac{R_4}{R_2} V_{i2} \\ V_{o3} &= -\frac{R_4}{R_3} V_{i3} \end{aligned} \right| \Rightarrow V_o = -R_4 \left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \Rightarrow V_o = -(V_{i1} + V_{i2} + V_{i3})$

Sumador no inversor

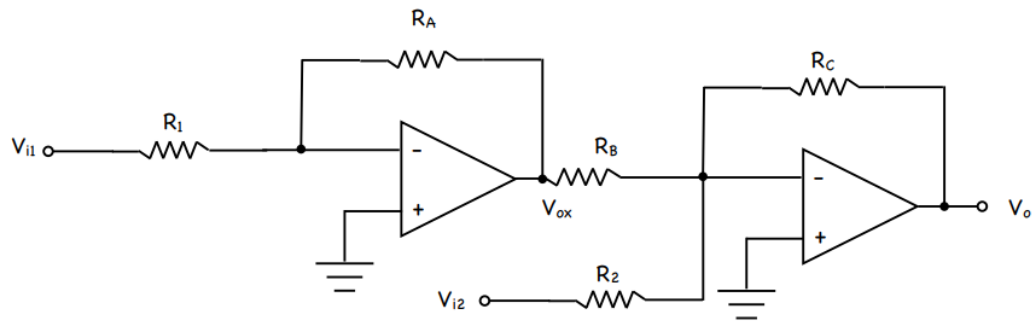


$$\left. \begin{aligned} V_{ox} &= -R_4 \left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3} \right) \\ V_o &= -\frac{R}{R} V_{ox} = -V_{ox} \end{aligned} \right| \Rightarrow V_o = R_4 \left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} + \frac{V_{i3}}{R_3} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \Rightarrow V_o = V_{i1} + V_{i2} + V_{i3}$

Este sistema se compone de dos partes: un primer sumador inversor y un inversor simple. Esto es así para sumar las 3 componentes en la primera parte pero el resultado que sale es negativo. Por ello luego hay un inversor simple para volver a invertir ese resultado y que se dé sin invertir, es como hacer $-(-) = +$.

Restador

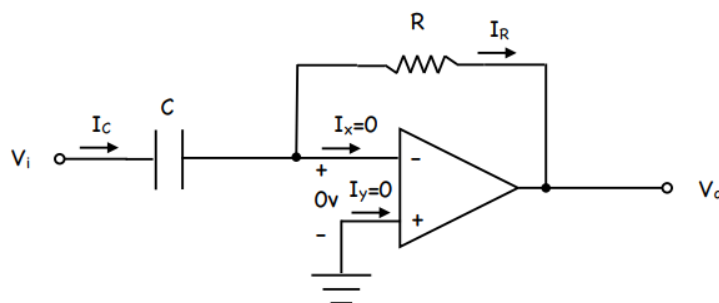


$$\begin{aligned}
 V_{ox} &= -\frac{R_A}{R_1} V_{i1} \\
 V_o &= -R_C \left(\frac{V_{ox}}{R_B} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right) \quad \Rightarrow \quad V_o = R_C \left(\frac{R_A}{R_1 R_B} V_{i1} - \frac{V_{i2}}{R_2} \right) \\
 \text{Si } R_C = R_2 = \frac{R_1 R_B}{R_A} &\Rightarrow V_o = V_{i1} - V_{i2}
 \end{aligned}$$

Este sistema se compone también de dos partes: un inversor y un sumador inversor. De esta forma, el primer amplificador invierte la entrada V_{i1} y el segundo suma la salida del primero (que es V_{i1} negado) + V_{i2} , negando la salida. Esto es lo mismo que hacer $V_{i1} - V_{i2}$, ya que:

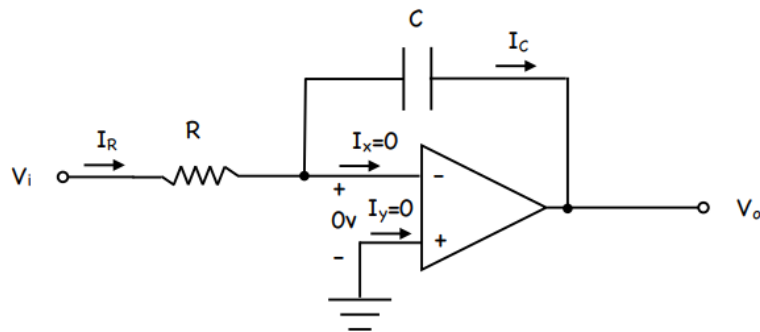
$$-(-V_{i1} + V_{i2}) = V_{i1} - V_{i2}$$

Derivador



$$\begin{aligned}
 I_C &= C \frac{dV_C}{dt} \\
 V_C &= V_i - 0 = V_i \quad \Rightarrow \quad I_C = C \frac{dV_i}{dt} \\
 I_C &= I_R \\
 I_R &= \frac{0 - V_o}{R} \quad \Rightarrow \quad C \frac{dV_i}{dt} = \frac{0 - V_o}{R} \quad \Rightarrow \quad V_o = -RC \frac{dV_i}{dt}
 \end{aligned}$$

Integrador



$$\begin{array}{l}
 I_C = C \frac{dV_C}{dt} \\
 V_C = 0 - V_o
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \Rightarrow I_C = -C \frac{dV_o}{dt} \Rightarrow V_o = -\frac{1}{C} \int I_C dt \\
 I_C = I_R \\
 I_R = \frac{V_i - 0}{R}
 \end{array} \right| \Rightarrow V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

Osciladores y conformadores de onda

Sistema biestable: presenta dos posibles salidas estables (ej: comparador).

Sistema astable: oscila entre dos valores de salida, ninguna de ellas estable (ej: generador de señal de reloj digital).

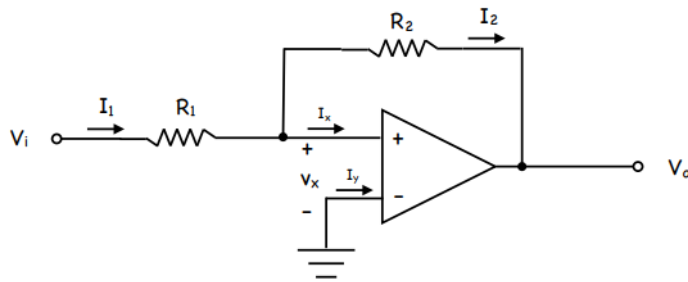
Sistema monoestable: presenta un estado estable y otro inestable en el que puede encontrarse un tiempo limitado (ej: circuito disparador de alarma).

Estos tres tipos de sistemas se pueden implementar con amplificadores operacionales con realimentación positiva.

Amplificador operacional con realimentación positiva

Al contrario que en la realimentación negativa, en este tipo de amplificadores se conecta la entrada no inversora (+) con la salida. De este modo, parte de la salida se “suma” a la entrada, dando lugar a una configuración inestable.

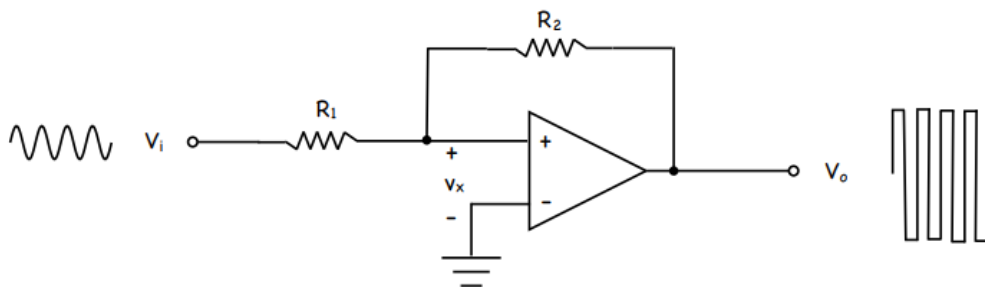
$$V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{vo} V_x$$



Asumiendo un amplificador operacional ideal $\Rightarrow I_x = I_y = 0$

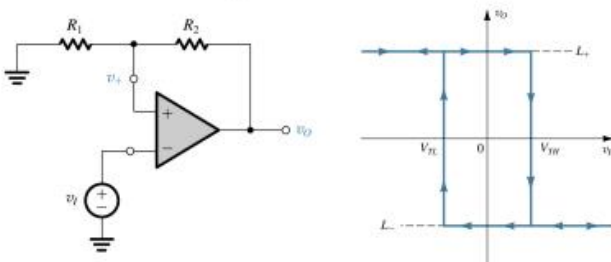
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_2 \\ I_1 &= \frac{V_i - V_x}{R_1} \\ I_2 &= \frac{V_x - V_o}{R_2} \end{aligned} \right| \Rightarrow \frac{V_i - V_x}{R_1} = \frac{V_x - V_o}{R_2} \Rightarrow V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_o \quad \left| \Rightarrow V_x = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} A_{vo} V_x \right.$$

A la entrada del amplificador (V_x) se le añade una contribución amplificada que crece y crece hasta saturar el amplificador. Se trata de un sistema biestable y es muy útil como comparador.

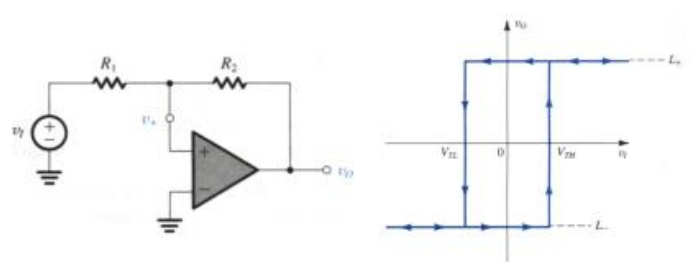


Sistema biestable

Configuración inversora



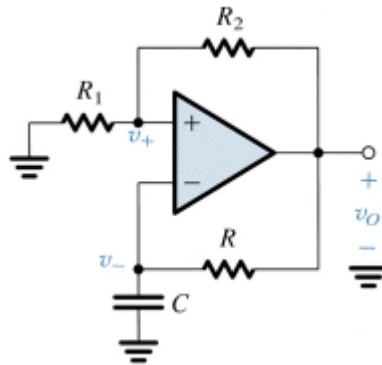
Configuración no inversora



Comparadores con histéresis: mayor robustez frente al ruido.

Sistema estable

Se basa en un circuito biestable más un lazo RC.



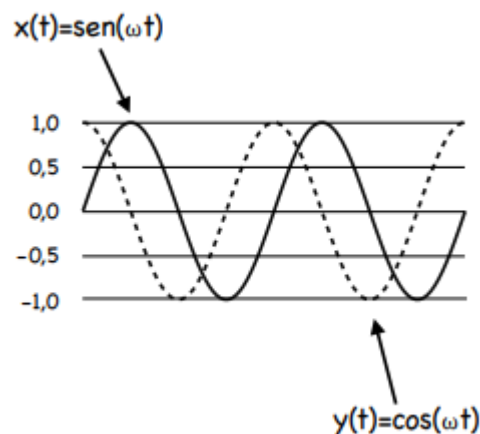
Sistema monoestable

Presenta un valor de salida estable en la que puede permanecer indefinidamente y otro valor metaestable en el que puede estar un tiempo determinado.

Señales eléctricas

Funciones sinusoidales simples

Las dos funciones están acotadas entre -1 y +1 y se repiten cada $t = 2\pi/\omega$ segundos.



Cualquier función periódica se puede aproximar mediante una suma ponderada de términos sinusoidales, denominada serie de Fourier.

Ejemplo: Aproximación de una señal cuadrada como superposición de senoidales



$$f(t) = a_1 \sin(\omega t) + a_3 \sin(3\omega t) + a_5 \sin(5\omega t) + a_7 \sin(7\omega t)$$

Los circuitos que incluyan condensadores y/o bobinas experimentarán cambios en amplitud (y fase) en sus tensiones y corrientes en función de la frecuencia. Por lo tanto, combinando diferentes elementos podemos realzar o atenuar determinadas frecuencias.

Filtros

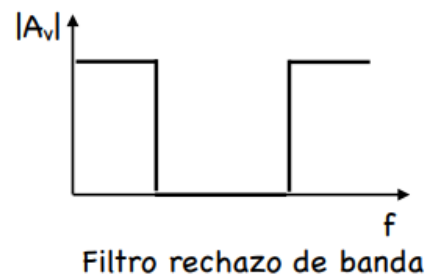
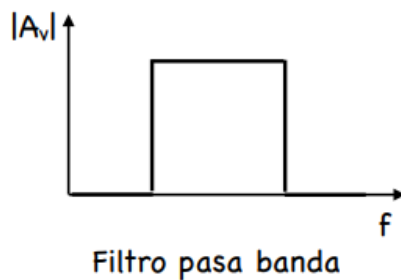
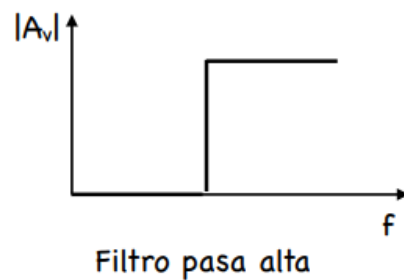
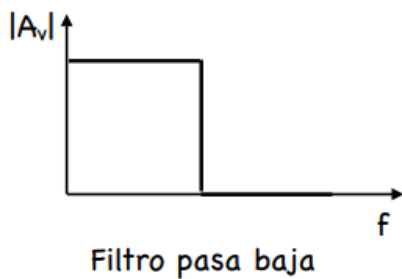


$$|A_v(f)| = \frac{V_o}{V_i}$$

Es habitual usar notación en decibelios (dB) para la ganancia:

$$|A_v(f)|_{dB} = 20 \log \left| \frac{V_o}{V_i} \right|$$

Tipos de filtros



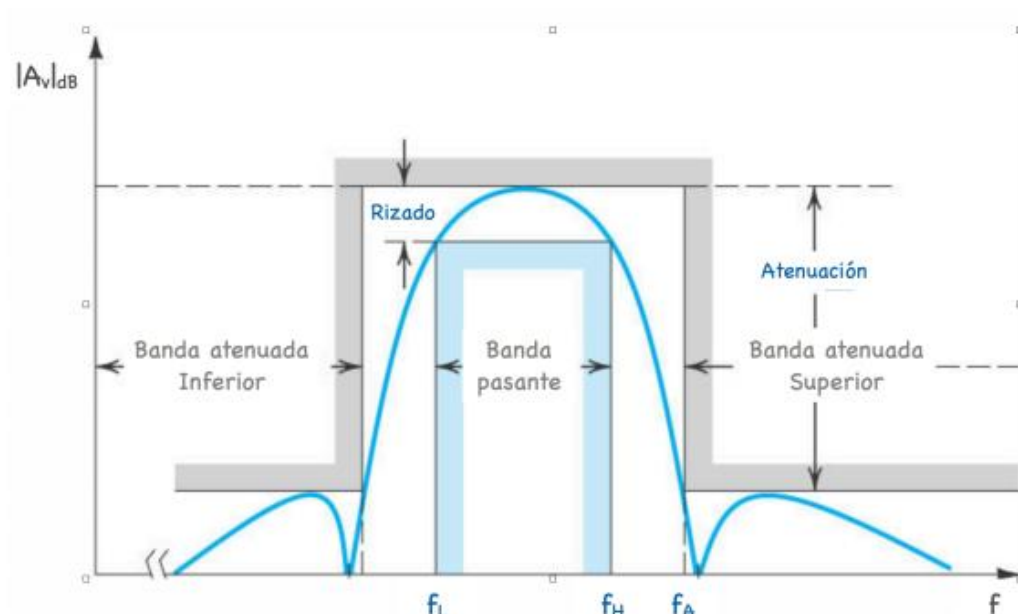
Estas representaciones muestran las versiones ideales de los filtros. A nivel electrónico los filtros ideales no son realizables.

Especificaciones

Frecuencia de corte superior (f_h) y/o inferior (f_L): frecuencias para las que la potencia cae a la mitad (equivale una caída en ganancia en tensión de 3dB).

Rizado: variación máxima de la ganancia en la banda pasante.

Atenuación: caída en ganancia a una frecuencia especificada (f_a) con respecto a la ganancia en la banda pasante.



Problemas de los filtros pasivos

- Difícil de construir bobinas para baja frecuencia (para audio, por ejemplo).
- Difícil integrar bobinas en circuitos integrados.
- Baja ganancia.
- Alta impedancia de salida.

Solución a estos problemas

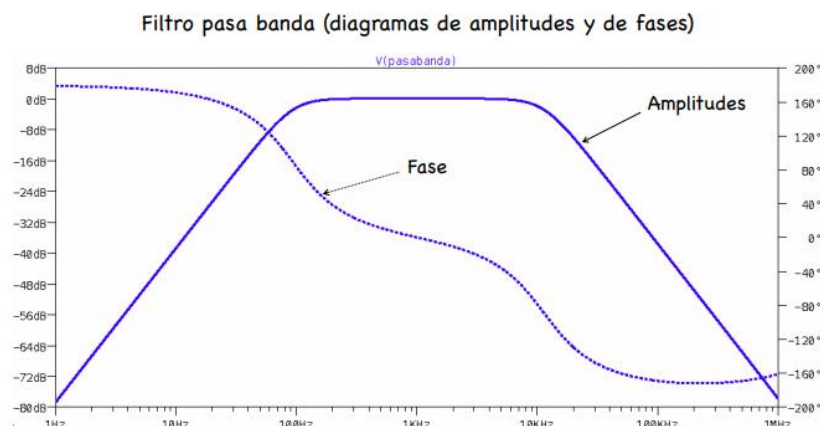
Usar amplificadores operacionales (filtros activos):

- Sin necesidad de bobinas
- Baja impedancia de salida: diseño sencillo mediante la conexión en serie de múltiples etapas.
- Ganancia de los filtros fácilmente modificable.

Efecto en la fase

Los filtros afectan no sólo a la amplitud si no también a la fase de las componentes armónicas (términos sinusoidales) de la señal de entrada.

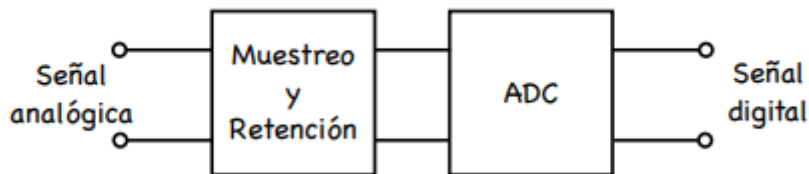
Esto puede llevar a un resultado indeseado en algunas aplicaciones por lo que es conveniente diseñar filtros atendiendo además a la variación de la fase con la frecuencia.



Conversores A/D y D/A

Conversión analógica-digital (ADC) (*importante)

El proceso de conversión viene precedido por el muestreo de la señal analógica



El conmutador del circuito de muestreo se cierra durante una fracción del periodo T del reloj.

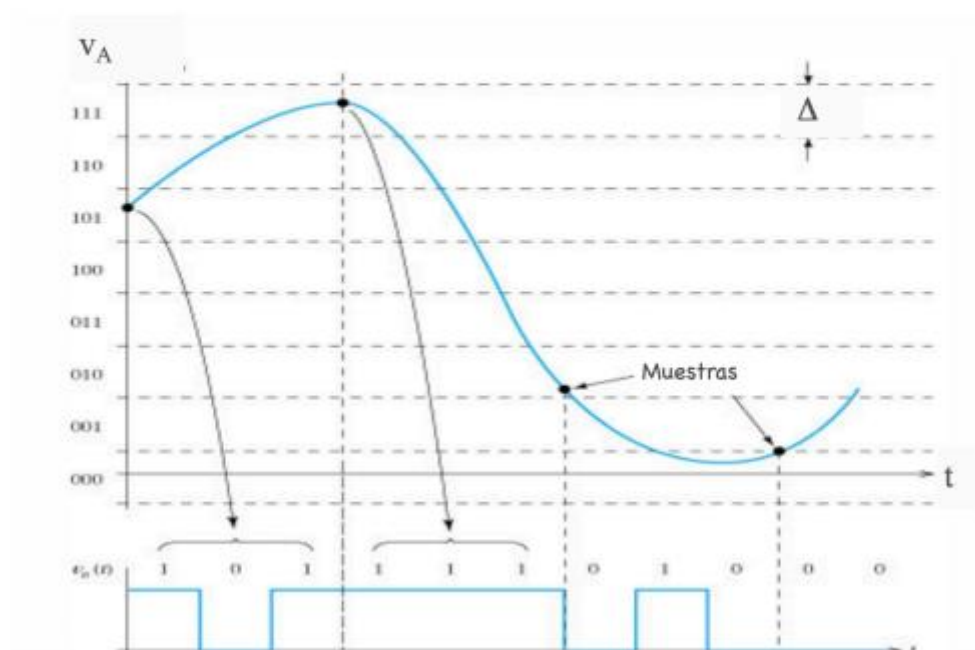
- Conmutador cerrado: se muestrea la señal.
- Conmutador abierto: se mantiene el último valor de entrada muestreado.

Muestreo: la entrada analógica se muestrea con una frecuencia al menos dos veces superior a la frecuencia más alta presente en la señal. Esto garantiza la reconstrucción exacta de la señal analógica. (***importante**)

La máxima amplitud se divide en 2^N zonas representadas por N bits: ya no se podrá reconstruir sin errores la señal analógica original. Siguiendo fórmula (***importante**):

$$\Delta = \frac{V_A(max)}{2^N}$$

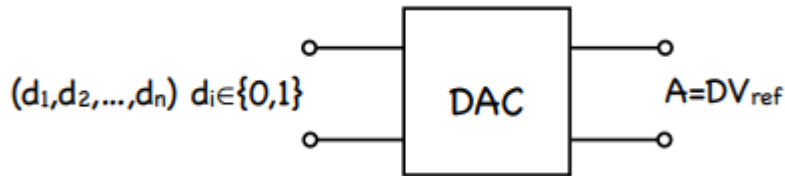
Δ \equiv resolución del conversor



Conversión digital-analógica (DAC) (*importante)

La entrada es una palabra digital de n bits $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ cuyo valor decimal será:

$$D = d_1 2^{-1} + d_2 2^{-2} + \dots + d_n 2^{-n}$$



La salida será $V_0 = DV_{ref}$ donde V_{ref} es la tensión de referencia usada para la reconstrucción (*importante) de la señal analógica.

La salida del DAC no es idéntica a la señal original debido a que los códigos digitales no representan los valores exactos de las muestras analógicas.

Error de cuantización:
(*importante)

$$\text{Error de cuantización} \leq \Delta/2$$

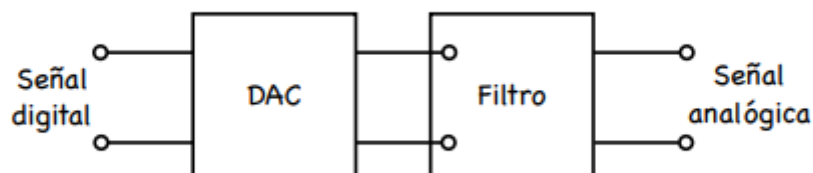
$\Delta \rightarrow$ Resolución del conversor

(ancho de la zona de cuantización)

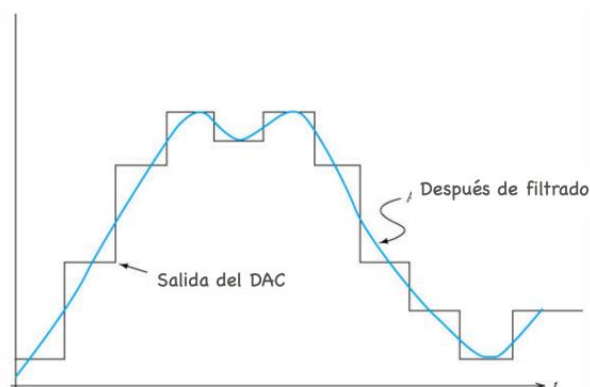
$$\Delta = 2^{-n} V_{ref}$$

La salida de un DAC es una versión escalonada de la versión original.

La conversión digital-analógica es habitualmente seguida por una etapa de filtrado:



Un filtrado pasa baja permite suavizar la señal aproximándola a la señal original.



FutFi: Tema 4

Modelo atómico de Rutherford

Los electrones (carga negativa) orbitanentorno a un núcleo donde se concentra la carga positiva del átomo, siguiendo un modelo similar al gravitacional.

- ¿Cómo se mantienen unidas todas las cargas positivas del núcleo?
Por una fuerza nuclear fuerte
- Según la electrodinámica clásica, una partícula con carga, acelerada perderá energía.
¿Por qué no acaban colapsando los electrones sobre el núcleo?
Solución: modelo atómico de Bohr

Modelo atómico de Bohr

Los electrones giran alrededor del núcleo (como en el de Rutherford) pero sólo en un número determinado de órbitas.

Un electrón puede pasar de una órbita a otra cediendo o ganando energía (en forma de luz)

- Definición de luz:
 - o Visión clásica: onda electromagnética de frecuencia f.
 - o Visión cuántica: conjunto de partículas o cuantos, llamados fotones, cada uno con una energía $E=hf$.
- ¿Qué órbitas son posibles? Para explicarlo necesitamos adentrarnos en la física cuántica:
 - o Principio de incertidumbre de Heisenberg: es imposible conocer al mismo tiempo y con exactitud la velocidad de una partícula y su localización. En concreto, estamos limitados por la siguiente expresión:

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{2\pi}$$

$h=6,6 \times 10^{-34} \text{ J}$: constante de Planck
 Δx : Incertidumbre en la posición
 Δp : Incertidumbre en la cantidad de movimiento

- o Dualidad onda-partícula de De Broglie: toda materia presenta características de las ondas como de las partículas en función del experimento.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

λ : Longitud de onda
 mv : masa y velocidad de la partícula

- o Ecuación de Schrödinger: permite asociar la energía de un electrón con la función de probabilidad de su localización (función de onda).

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta\psi(\vec{r},t) + V(\vec{r})\psi(\vec{r},t) = i\hbar\frac{\partial\psi(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

m: masa del electrón

V: potencial electrostático

- Las soluciones $\Psi(x,y,z,t)$ de la ecuación de Schrödinger se denominan orbitales
- $|\Psi|^2$ representa la probabilidad de encontrar a un electrón en un punto del espacio
- Cada orbital está caracterizado por cuatro números, que indican los estados energéticos permitidos para los electrones que giran entorno al núcleo del átomo

Números cuánticos

Número cuántico principal (n): describe el tamaño del orbital. Cuanto mayor sea n mayor es el orbital. Rango de n: [1, +infinito)

Número cuántico secundario o del momento angular (l): describe la forma del orbital. Rango: [0, n-1]. Ejemplo: n = 3 → l = 0, 1, 2.

Número cuántico magnético (m): describe la orientación espacial del orbital. Rango: [-l, l]. Ejemplo: l = 3 → m = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3

Número cuántico de spin (s): se asocia a la dirección de giro de los electrones. Solo puede tomar uno de los dos valores únicos siguientes: +1/2 o -1/2.

Principio de exclusión de Pauli

No puede haber dos electrones con sus cuatro números cuánticos idénticos.

La tendencia natural de los elementos químicos es completar su capa de exterior. Esto se da en los denominados gases nobles. El resto tenderán a asociarse para completar su última capa. Este suceso puede ser de dos formas:

- Enlace iónico: en este tipo de enlace, uno de los elementos cede sus electrones de la última capa, que los recoge otro para completar a su vez su última capa. Ejemplo: El sodio (Na) cede un electrón al cloro (Cl), quedando de este modo un ion positivo Na^+ y un ion negativo Cl^- que se unen para formar el compuesto NaCl.
- Enlace covalente: a diferencia de lo que ocurre en el iónico, en el covalente los elementos en cuestión, comparten electrones para completar sus capas externas. Ejemplo: Un átomo de cloro (Cl) necesita un electrón más para completar su última capa. Si se enlaza con otro átomo de cloro compartiendo un electrón cada uno, pueden completar sus respectivas capas (compuesto Cl_2).

En el caso del silicio:

El silicio presenta dos electrones en su última capa. Necesita 4 más para completarla. La solución es compartir sus cuatro electrones externos con otros 4 átomos de silicio.

Teoría de bandas

- Si los átomos de silicio están alejados, la estructura de bandas no se ve afectada.

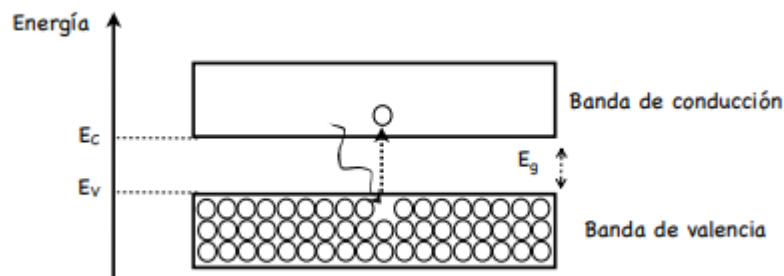
- Al aproximarse los átomos, la estructura de bandas se deforma, dando lugar a niveles híbridos de 3sp.
- Cuando los átomos alcanzan su posición estable dentro de la red, las nuevas bandas se separan, dando lugar a dos nuevas:
 - Banda de valencia: aloja a los electrones del enlace.
 - Banda de conducción: disociación de la banda original, que se extiende por toda la red.

Tanto la banda de conducción como la banda de valencia se extienden por todo el material resultante de los enlaces.

Los electrones se alojan inicialmente en las bandas de menor energía (banda de valencia).

Los electrones pueden “saltar” a la banda de conducción si reciben un aporte de energía superior al de la banda prohibida (el “gap” de energías).

Una vez que un electrón salta a la banda de conducción se podrá mover libremente por el



material, en presencia de un campo eléctrico (o potencial) → corriente eléctrica.

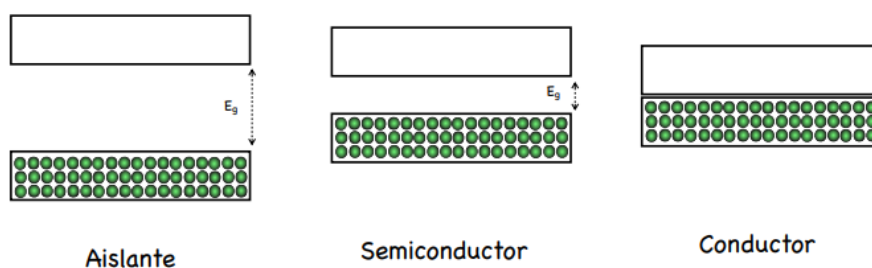
Si el material tiene todos sus estados energéticos de la banda de valencia ocupados y la banda de conducción vacía, no conducirá corriente.

Si además, el gap de energías entre bandas es elevado (5eV o más), se tratará de un material aislante.

Si el gap de energías entre bandas es pequeño o incluso nulo, los electrones podrán saltar a la banda de conducción fácilmente. Se tratará de un material conductor.

Si el gap de energías entre bandas es alrededor de 1eV, los electrones podrán pasar a la banda de conducción con aportes energéticos pequeños. Se tratará de un material semiconductor.

Valores de gap	Elevado (5eV o más)	Alrededor de 1eV	Pequeño o nulo
Tipo de material	Aislante	Semiconductor	Conductor



Electrones y huecos(*importante)

Si un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción, dejará en esta un “hueco”. Esta ausencia de carga negativa se puede ver como un aporte de carga positiva.

Por lo tanto tendremos dos tipos de portadores de carga:

- Portadores de carga negativa, electrones (e^-).
- Portadores de carga positiva, huecos (h^+).

Generación y recombinación

Generación(*importante): es el proceso por el cual un electrón situado en la banda de valencia, absorbe energía suficiente para superar el “gap” de energías y alcanzar la banda de conducción.

- En el proceso de generación se produce un hueco en la banda de valencia en el estado abandonado por el electrón.
- Las fuentes principales de generación de carga son:
 - o Generación térmica: originada por la agitación de la propia red cristalina.
 - o Fotogeneración: originada por la transferencia de energía fotónica (luz).

Recombinación(*importante): es el proceso por el cual un electrón y un hueco se aniquilan. Esto sucede cuando un electrón de la banda de conducción ocupa un estado libre en la banda de valencia, liberando el exceso de energía.

- En el proceso de recombinación se elimina también un hueco en la banda de valencia al mismo tiempo que se elimina el electrón de la banda de conducción.
- La energía liberada es en forma de:
 - o Calor: absorbido por la propia red cristalina.
 - o Radiación: en forma de fotón de frecuencia $f=E/h$, donde “E” representa la cantidad de energía liberada y “h” la constante de Planck.

Tipos de semiconductores

Semiconductores intrínsecos(*importante): la concentración de electrones en la banda de conducción (n) y la de huecos en la banda de valencia (p) es la misma $\rightarrow n = p = n_i$ (*importante)

- Los electrones de la banda de conducción y los huecos de la bandas de valencia se producen por procesos de generación (principalmente térmica).
- Un semiconductor intrínseco se comporta como aislante a bajas temperaturas.

Semiconductores extrínsecos(*importante): la concentración de electrones en la banda de conducción (n) y la de huecos en la banda de valencia (p) no es la misma $\rightarrow p \neq n$

Sin embargo se cumple siempre que $n \cdot p = n_i^2$ (*importante) (n_i = concentración intrínseca).

Los semiconductores extrínsecos pueden ser de dos tipos:

- **Semiconductor tipo P(*importante):** la concentración de portadores de carga positiva (huecos) es notablemente superior a la de portadores de carga negativa (electrones).
 $p \gg n$
- **Semiconductor tipo N(*importante):** la concentración de portadores de carga negativa (electrones) es notablemente superior a la de portadores de carga positiva (huecos).
 $n \gg p$

Semiconductores extrínsecos tipo P(*importante)

- Se introducen átomos con un electrón menos que los átomos del material semiconductor (por ejemplo el silicio). Un elemento habitual como impureza aceptadora es el boro (B).
- Esto origina estados energéticos en la banda de energías prohibidas
- Un electrón podría saltar a uno de esos estados energéticos prohibidos producidos por el boro, quedando atrapado en el gap de energías.
- Así, el electrón genera un hueco en la banda de valencia pero no llega a la banda de conducción. Eso significa que la única contribución de carga es la del hueco.
- Si N_A es la concentración de átomos aceptadoras, la concentración neta de huecos será $p \approx N_A$ y la de electrones: $n = n_i^2 / n_A$
- El enlace con el átomo de boro presenta una vacante que puede ser ocupada con un aporte pequeño de energía, dando lugar a una vacante en un enlace de silicio que se puede propagar por la red (hueco).

Semiconductores extrínsecos tipo N(*importante)

- Se introducen átomos con un electrón más que el elemento que constituye el semiconductor (de nuevo consideramos el silicio). Un elemento habitual como impureza donadora es el fósforo (P).
- Esto origina estados energéticos en la banda de energías prohibidas.
- El electrón adicional que proporciona el fósforo podría saltar a la banda de conducción con un pequeño aporte de energía.
- Así tendremos un electrón en la banda de conducción sin generar ningún hueco en la banda de valencia.
- Si N_D es la concentración de átomos donadores, la concentración neta de electrones será $n \approx N_D$ y la de huecos: $n = n_i^2 / n_D$
- El enlace con el átomo de fósforo combina cuatro de sus electrones más externos, dejando el quinto sin enlazar. Este electrón sobrante se puede mover por la red cristalina con total libertad.

Corriente en semiconductores

Corriente de arrastre(*importante): los portadores de carga negativa (electrones) y los portadores de carga positiva (huecos) se ven afectados por la presencia de un campo eléctrico o una diferencia de potencial, dando lugar a una corriente eléctrica (corriente de arrastre o de deriva). Esta corriente eléctrica viene determinadas por las siguientes expresiones:

Esta corriente eléctrica viene determinada por las siguientes expresiones:

$$J_n = \sigma_n E, J_p = \sigma_p E$$

$\sigma_{n,p}$: conductividad de electrones y huecos

O expresado de otro modo:

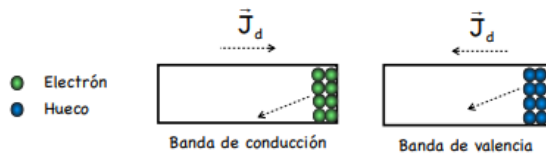
$$J_n = qn\mu_n E, J_p = qp\mu_p E$$

$\mu_{n,p}$: movilidad de electrones y huecos
 n, p : concentración de electrones y huecos

Corriente de difusión(*importante): las partículas tienden a distribuirse como consecuencia de su movimiento errático de origen térmico, emigrando, a escala macroscópica, desde regiones de alta densidad, hacia regiones de baja concentración.

Este fenómeno de difusión afecta a todas las partículas, cargadas o no. Obviamente, los portadores de carga afectados por la difusión generarán corriente, que se denomina corriente de difusión.

La corriente de huecos va en el sentido de disminución de la concentración. La corriente de electrones va en sentido contrario.



$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}, J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

En el caso del silicio: $D_n=34 \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_p=12 \text{ cm}^2/\text{s}$

FufI: Tema 5

Unión PN: situación de equilibrio

Una unión PN surge del contacto entre un semiconductor extrínseco tipo P y un semiconductor extrínseco tipo N.

- Tipo P: la concentración de huecos en la banda de valencia es mayor que la de electrones en la banda de conducción.
- Tipo N: la concentración de electrones en la banda de conducción es mayor que la de huecos en la banda de valencia.

Si conectamos ambos tipos de semiconductores aparece un fuerte gradiente (desnivel) en la concentración de huecos y electrones en la frontera de la unión.

Los electrones del semiconductor tipo N, próximos a la unión, se desplazarán hacia la izquierda (para disminuir el desnivel).

Los huecos del semiconductor tipo P, próximos a la unión, se desplazarán hacia la derecha (para disminuir el desnivel).

Si una alta de concentración de electrones encuentran una alta concentración de huecos se producen procesos de recombinación masivos.

El resultado es un proceso masivo de recombinación al encontrarse un número elevado de electrones con un número elevado de huecos en la misma región. Como consecuencia aparece un desajuste de carga espacial próxima a la frontera que genera un campo eléctrico.

Este campo eléctrico se opone a la difusión de más carga móvil por lo que se alcanza una situación de equilibrio. Es decir, aparece una barrera de potencial V_0 ($E = -dV/dx$).

La barrera de potencial se denomina potencial de contacto. En situación de equilibrio los portadores mayoritarios (huecos en la zona P y electrones en la zona N) no pueden superar esa barrera para saltar al lado en el que son minoritarios.

En realidad, lo que ocurre es que la corriente de arrastre, debido al campo eléctrico, iguala a la corriente de difusión, debido al desbalanceo en la concentración de portadores: $J_a=J_d$

Unión PN: Polarización inversa

Aplicamos un potencial externo al diodo, con el mismo signo que el potencial de contacto. Como resultado, electrones libres salen de la zona N, hacia el polo positivo de la fuente V_{ext} , depositándose más carga iónica en la zona de contacto entre los dos tipos de semiconductores (en el lado N).

Por otra parte, los electrones son repelidos desde el terminal negativo de V_{ext} , viajando hacia el semiconductor tipo P. Al entrar en éste, se producen fenómenos de recombinación. Estos electrones saltan de hueco en hueco hasta alcanzar la zona de vaciamiento (capa ausente de carga móvil), dando lugar a nueva carga estática negativa.

Por lo tanto en esta situación la barrera de potencial aumenta oponiéndose aún más al trasvase masivo de carga a través de la zona de vaciamiento.

En cualquier caso, la corriente no es nula. Los huecos y electrones que aparezcan en la región de vaciamiento o próximos a ésta por procesos de generación espontánea (i.e., térmica) serán trasladados a la región donde son mayoritarios por efecto del campo eléctrico.

Esta corriente, conocida como corriente de saturación en inversa (I_s) toma un valor muy pequeño y es consecuencia del desbalanceo entre la corriente de difusión (J_d) y la corriente de arrastre (J_a): $J_a > J_d$.

Observación: la corriente sale en forma de electrones por el lado N y en forma de huecos por el lado P.

Unión PN: Polarización directa

Aplicamos un potencial externo al diodo, en sentido contrario al del potencial de contacto.

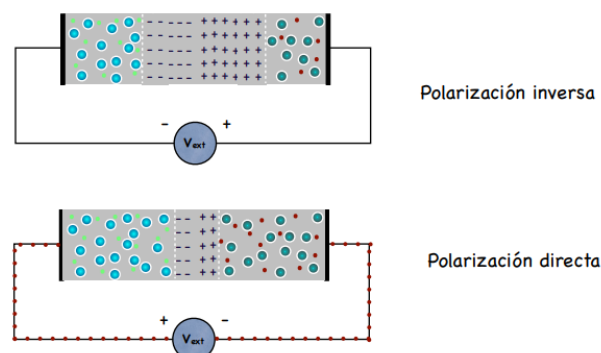
Como resultado, electrones libres viajan desde la fuente hacia la zona N del material semiconductor, la atraviesan, y alcanzan la región de vaciamiento.

Este conjunto de electrones neutraliza parcialmente la carga iónica depositada, por lo que la región de vaciamiento se estrecha y el potencial de contacto disminuye.

Como consecuencia, tiene lugar un mayor trasvase de electrones desde la zona N a la zona P (y de huecos desde la zona P a la zona N), originando una alta concentración de portadores minoritarios en los límites de la región de vaciamiento. Esto se traduce en una corriente de difusión muy elevada (diodo en conducción).

En definitiva la corriente de difusión pasa a tomar un valor muy importante, mientras que la corriente de arrastre se mantiene prácticamente constante: $J_a < J_d$.

Observación: la corriente entra en forma de electrones en el lado N y en forma de huecos en el lado P.



Estructura MOS

Partiendo de un semiconductor intrínseco, podemos doparlo para convertirlo en un extrínseco (tipo N o tipo P). En la parte superior de este colocamos una capa de óxido y encima de esta otra capa metálica que llamamos puerta (gate). Si ahora aplicamos una tensión (V_G) sobre la puerta, el semiconductor que está debajo puede responder de varias formas en función del signo y valor de dicha tensión:

Modo de acumulación (condensador MOS)

Si $V_G < 0$:

Se deposita una carga negativa (procedente de V_G) sobre la puerta. Esto provoca que se atraigan huecos hacia la superficie del semiconductor y por lo tanto hay una acumulación de carga positiva cerca de la interfaz, de ahí su nombre. El comportamiento con este tipo de polarización es similar al de un condensador.

Modo de vaciamiento

Si $V_G > 0$:

Se deposita una carga positiva (procedente de V_G) sobre la puerta y por lo tanto se induciría una carga negativa al otro lado de la capa de óxido. No obstante, esto no sucede porque la cantidad de electrones podría no ser suficiente para equilibrar esa carga, y mientras no se compense existirá un campo eléctrico que repelerá los huecos del semiconductor, alejándolos de la superficie. De esta forma, aparece una capa de vaciamiento desde la superficie del semiconductor que se extiende hacia abajo hasta compensar la carga positiva de la puerta.

Modo de inversión (transistor MOS)

Si $V_G > 0$:

Si aumentamos V_G , llegará a un valor a partir del cual se dará una gran concentración de electrones libres que se acumularán en la interfaz del semiconductor para compensar la carga de la puerta. Este fenómeno nos llevará de nuevo al efecto transistor.

Transistor NMOS

A partir de la estructura anterior (con un semiconductor base tipo P), realizamos un dopado a ambos lados de la puerta para crear dos regiones semiconductoras de tipo N: fuente o source (situada a la izquierda de la puerta) y drenador o drain (situada a la derecha de la puerta).

Ahora, si aplicamos un potencial suficientemente alto a la puerta, crearemos un canal entre el drenador y la fuente que permitirá el flujo de carga entre ambos terminales. La tensión mínima necesaria para formar el canal se denomina tensión umbral (V_{TH}). (***importante**)

Transistor PMOS

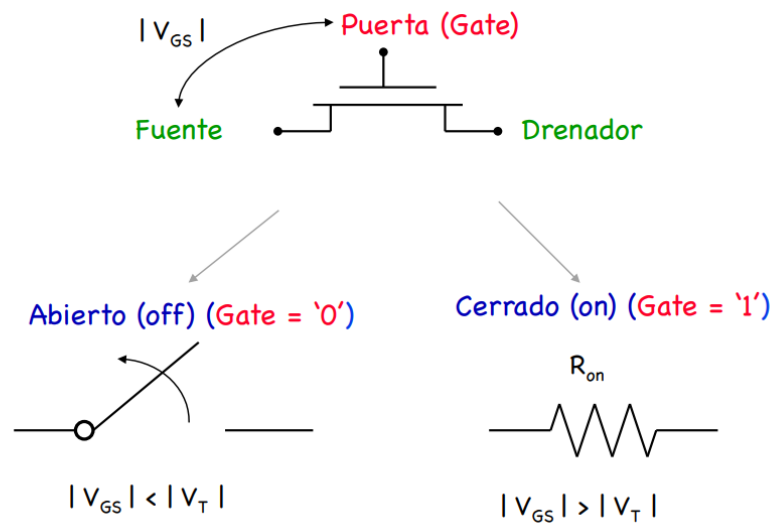
En este caso, el transistor se construye sobre un semiconductor tipo N y al doparlo se crean las dos regiones semiconductoras de tipo P (fuente o source y drenador o drain). Para que fluya la corriente entre ambos terminales, la diferencia de tensión entre la puerta y la fuente debe ser negativa, y mayor (en valor absoluto) que la tensión umbral. De otro modo el circuito permanecerá abierto y no circulará corriente.

Tipos de transistores MOS: NMOS y PMOS, ¿qué significan la N y la P? (*importante)

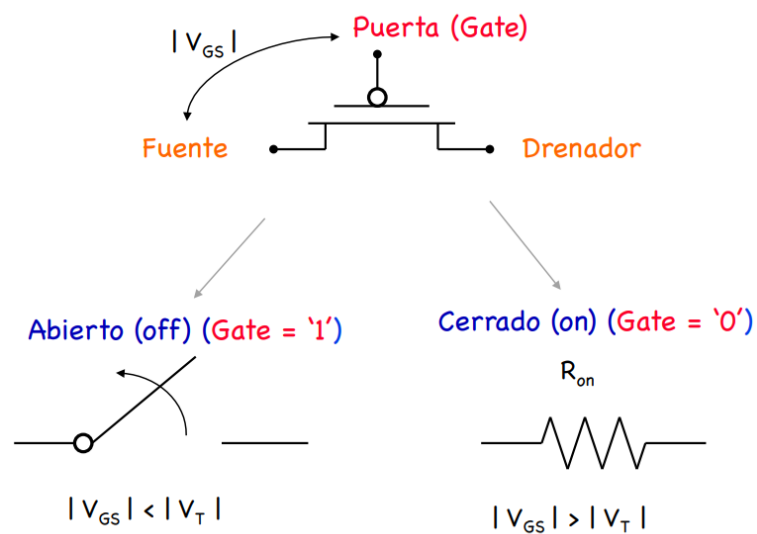
La N y la P nos indican el tipo de canal que se forma en cada tipo de transistor, es decir, el tipo de portadores mayoritarios.

Modelo de conmutador digital de los PMOS y NMOS

Modelo de conmutador del transistor NMOS



Modelo de conmutador del transistor PMOS



FutFi: Tema 7

Definiciones: (*importante)

V_{OL} : nivel bajo de salida.

V_{OH} : nivel alto de salida.

V_{IL} : valor máximo de entrada interpretado por el inversor como '0'.

V_{IH} : valor mínimo de entrada interpretado por el inversor como '1'.

NM_L : margen de ruido para entrada baja ('0'): $V_{IL} - V_{OL}$.

NM_H : margen de ruido para entrada alta ('1'): $V_{OH} - V_{IH}$.

Consumo de potencia (*importante)

El consumo de potencia media (vatios), marca principalmente la vida de la batería (en horas).

Hay dos fuentes de disipación de potencia:

- Disipación de potencia estática (fugas): potencia consumida en situación estable.
- Disipación de potencia dinámica (la más importante): potencia consumida como consecuencia de una transición de estados de salida. Se puede disminuir bajando la capacidad de carga (fanout), disminuyendo la tensión de alimentación y la frecuencia (velocidad).

En CMOS apenas hay consumo de potencia estática, la que hay es debida esencialmente a corrientes de fugas. La principal componente de consumo es dinámica, y es consecuencia de la carga y descarga de la capacidad de salida de las puertas lógicas.

Existe una tercera componente de consumo de potencia, el cortocircuito. Durante este proceso, hay un intervalo de tiempo donde se habilita un paso de corriente entre la alimentación y tierra. Comprende aproximadamente el 8% del consumo actual.

FutFi: Tema 9

Registros sensibles a nivel (latches): se transfiere la entrada al estado cuando el reloj está en alta (baja) → *modo transparente*.

La entrada antes del flanco negativo de la señal de reloj se mantiene estable cuando el reloj está en baja → *modo hold*.

Registros (flipflops): circuitos sensibles a los flancos que muestrean las entradas en las transiciones de reloj.

- Flanco positivo: $0 \rightarrow 1$
- Flanco negativo: $1 \rightarrow 0$

Se construyen mediante latches.

(*importante)

Tiempo de set-up (t_{su}): tiempo anterior al flanco positivo para el que los datos de entrada D deben ser válidos.

Retardo de propagación: tiempo que tarda QM en propagarse a Q.

Tiempo de mantenimiento (thold): tiempo en el que la entrada D debe mantenerse estable después del flanco positivo de reloj.

Clock skew (***importante**): fenómeno observado en circuitos síncronos cuando las señales de reloj no llegan al mismo tiempo a las diferentes componentes del sistema, pudiendo producir problemas de funcionamiento a nivel de registro.

FutFi: Tema 10