

Tema 1. Introducción a los sistemas electrónicos

Curso 2023-2024

Grado en Ingeniería Aeroespacial



1.1 Sistemas electrónicos



- Comunicaciones : Radio, Teléfono, TV, Fibra óptica...
- Computación : Ordenadores, μ ordenadores...
- Control : Servosistemas, sistemas de automoción...
- Componentes : Circuitos integrados y discretos.
- Electrónica de potencia : F. de alimentación, reguladores de velocidad en motores..
- Medida e Instrumentación: Control de tiempo, captación, medicina, industria,
- Sistemas de seguridad: alarmas antiincendio, antiintrusión
- Navegación y geolocalización
- -----

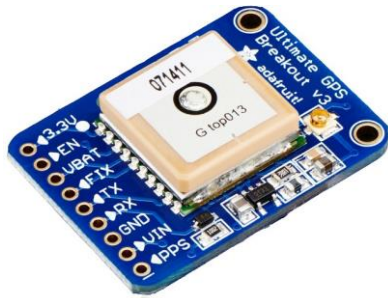
• ¿Qué es la electrónica? Una definición genérica :

“Estudio y aplicación del comportamiento de los electrones en diversos medios, como el vacío, los gases y los semiconductores, sometidos a la acción de campos eléctricos y magnéticos”

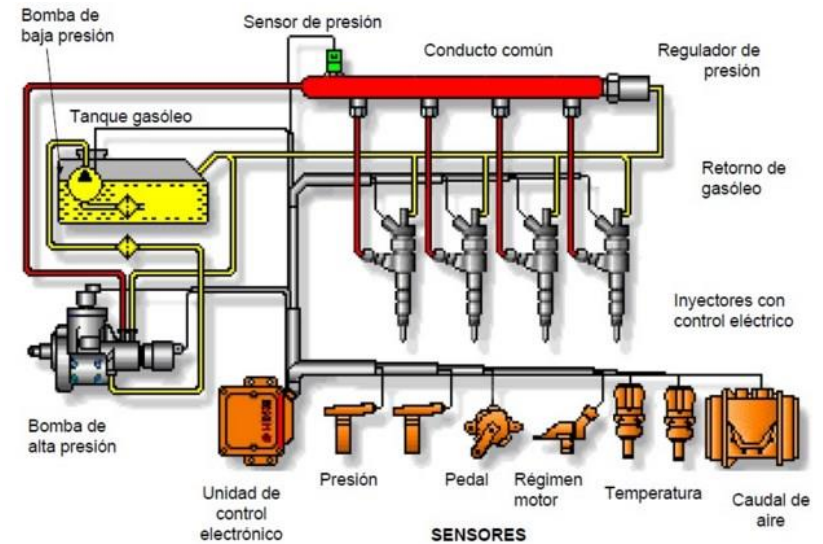
“Disciplina que estudia los componentes y circuitos electrónicos utilizados para la captación, procesado (adaptación, amplificación, filtrado...), transporte y almacenamiento de la información”

1.1 Sistemas electrónicos

Sistema de posicionamiento



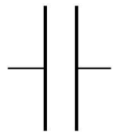
Control de emisiones y consumo en coches actuales.



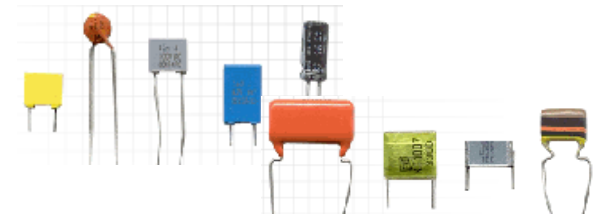
Componentes electrónicos discretos

Símbolo Electrónico

Elemento Físico



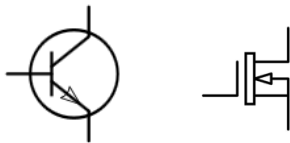
Condensador



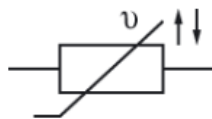
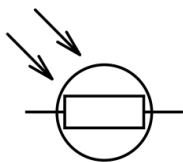
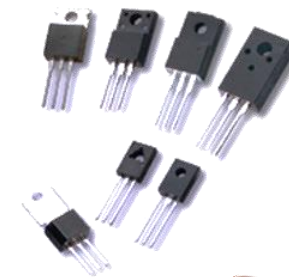
Bobina / inducción



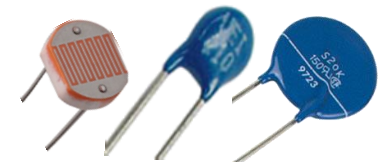
Diodo / Fotodiodo / Led



Transistor

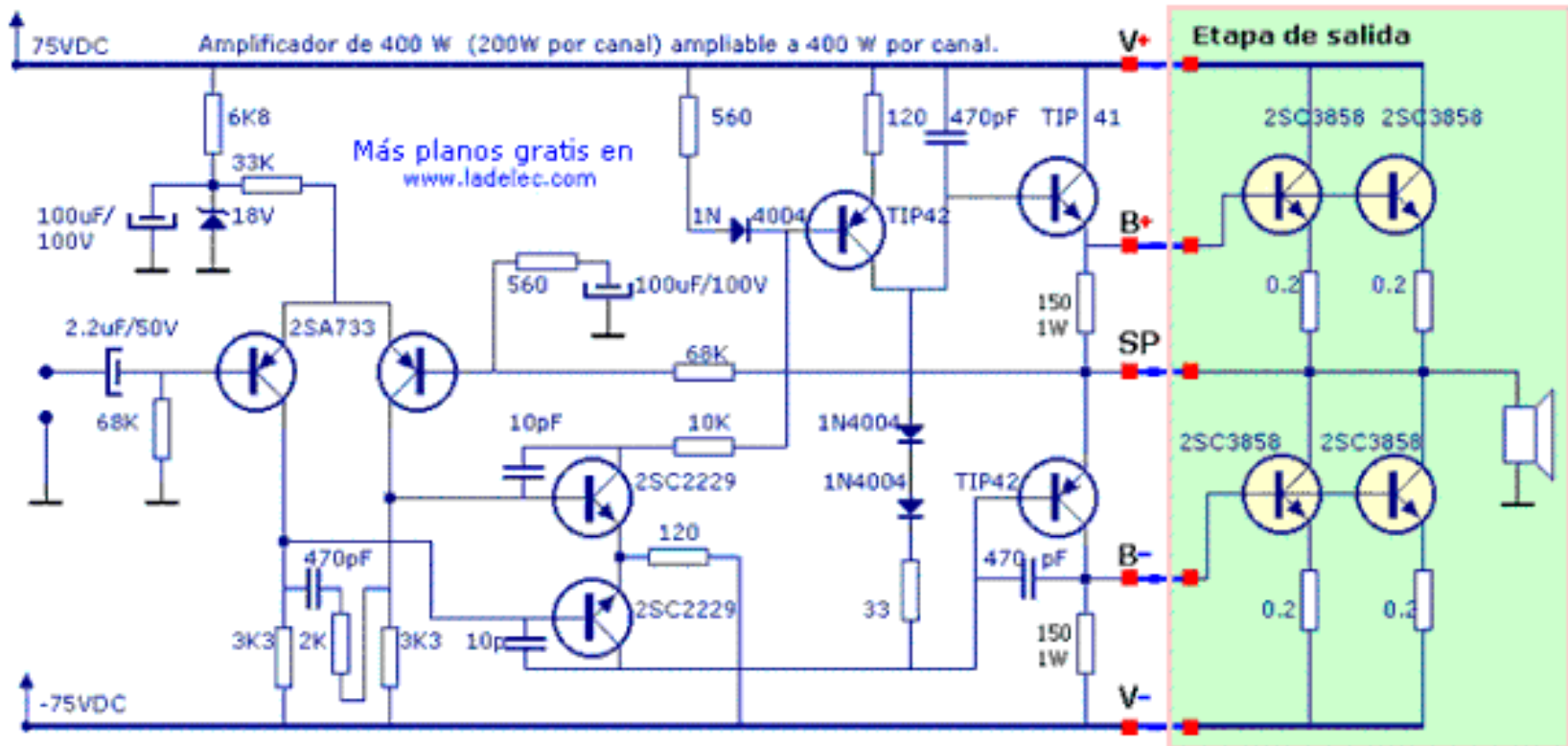
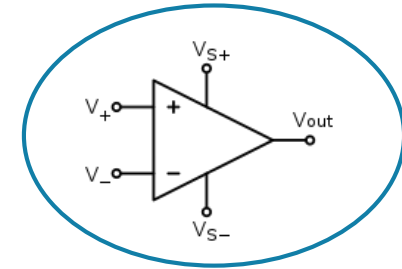


Sensor



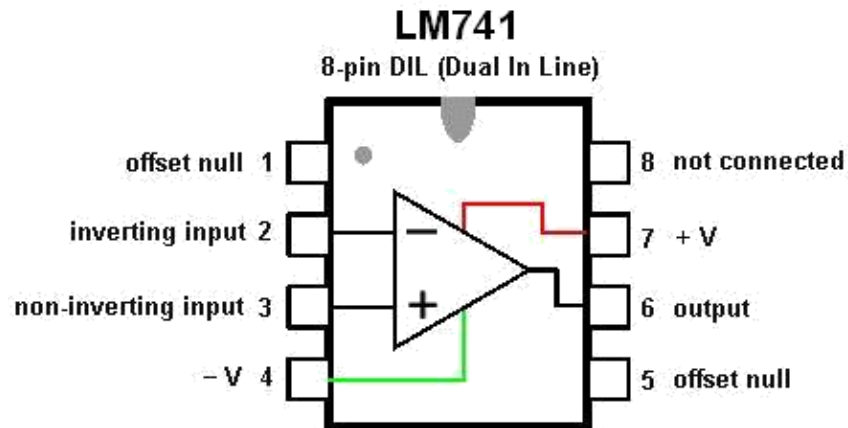
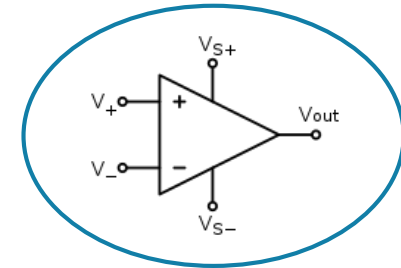
Tecnología discreta

Amplificador lineal transistorizado de 400W. Esquema.



Tecnología integrada

Amplificador lineal operacional uA741



<http://www.ti.com/product/ua741>

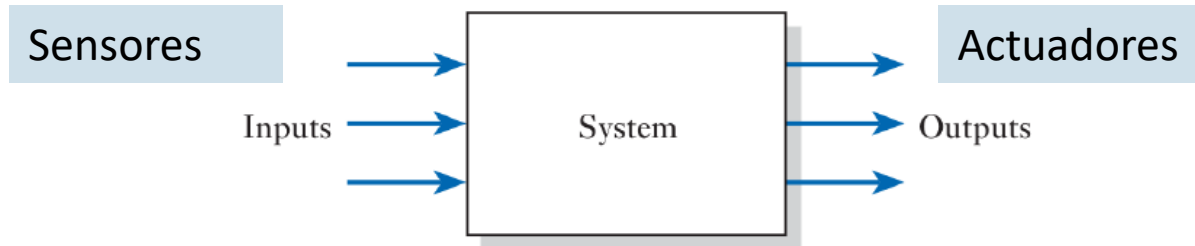
1.1 Sistemas Electrónicos

Sistema

volumen cerrado en el que las entradas y salidas son conocidos

Entradas/salidas (inputs/outputs)

variación de una magnitud física que porta información



Un sistema queda completamente definido si se conocen sus entradas, salidas y la relación entre ellas.

Sistema electrónico

sistema que genera o manipula energía eléctrica

1.1 Sistemas Electrónicos

Captación de la información. Sensores

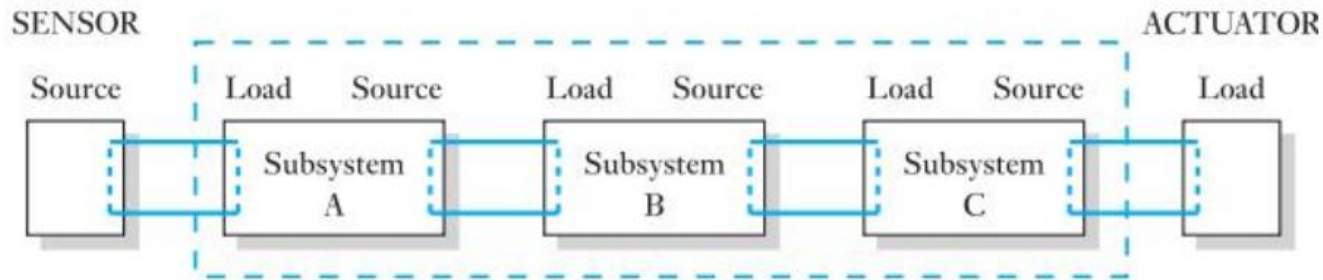


1.1 Sistemas Electrónicos



1.1 Sistemas Electrónicos

- Dividimos un SE complejo en subsistemas más simples, resultando en una serie de módulos que son más fáciles de manejar.
- La salida de cada subsistema es la entrada del siguiente.



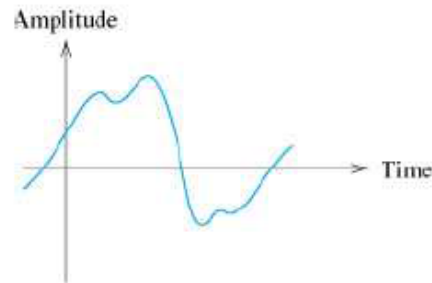
- Cuando la energía (información) va de un componente a otro, al primero se refiere como **fuentes** (source) y al segundo como **carga**(load)
- Cada uno de estos módulos o subsistemas queda igualmente definido conociendo sus entradas, salidas y la relación entre ellas.

1.2 Partes de un sistema electrónico

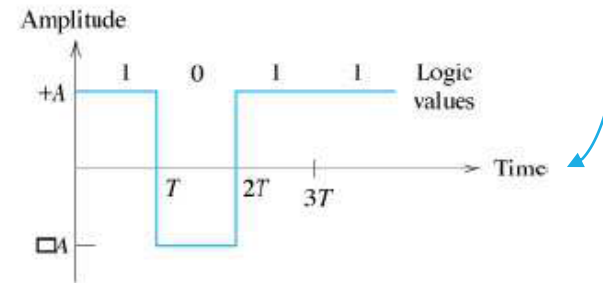
- **Medida** (sensores/acondicionamiento de señal): Incorporar información relevante del exterior a nuestro sistema.
- **Procesamiento:** Circuitos que manipulan/analizan/almacenan la información recibida y determina las acciones necesarias para cumplir los objetivos especificados.
- **Actuación (actuadores):** Dispositivo capaz de transformar la energía analizada en la etapa de procesamiento, para efectuar una fuerza para mover o actuar sobre otros dispositivos o producir un cambio en un medio físico.
- **Acondicionamiento:** Circuitos que adecuan la energía eléctrica en las distintas partes del circuito.

1.3 Señales analógicas y digitales

- La **información** del exterior de un SE viene dada por **variaciones de una magnitud física**.
- Las **señales eléctricas** de un sensor portan **información** de alguna magnitud física que varía.
- Atendiendo a la naturaleza de la variación, las cantidades físicas se pueden clasificar como
 - ▶ Aquellas que varían continuamente (ej. temperatura, humedad, ...)
 - ▶ Aquellas que varían de forma discontinua o discreta (ej. población)



(a) Analog signal



(b) Digital signal

1.3 Señales analógicas y digitales

Señales Digitales

Toman un número discreto de valores (número finito de amplitudes).

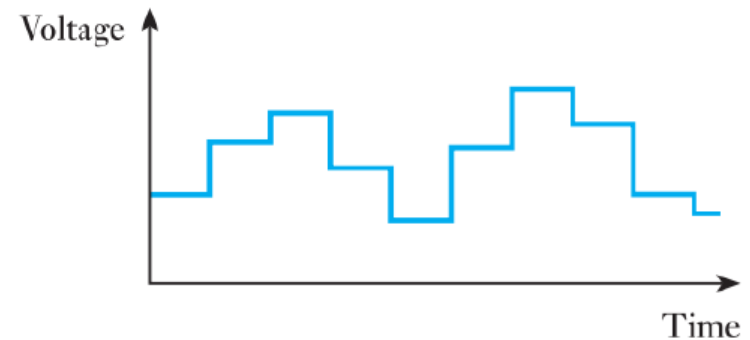
- Sólo son posibles algunos valores del intervalo (son discontinuas o discretas)

- Si sólo existen 2 valores, se habla de señal binaria:

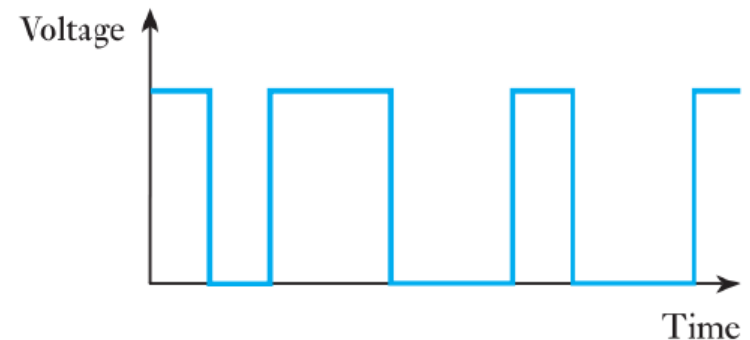
- ▶ V_H : nivel alto, valor '1' lógico;
- ▶ V_L : nivel bajo, valor '0' lógico.

Ej. $V_H = 5V, 3.3V, \dots$; $V_L = 0V$

- Cualquiera de estos estados es un dígito binario, o **bit** y representa la menor cantidad de información.



(b) A multi-valued digital signal



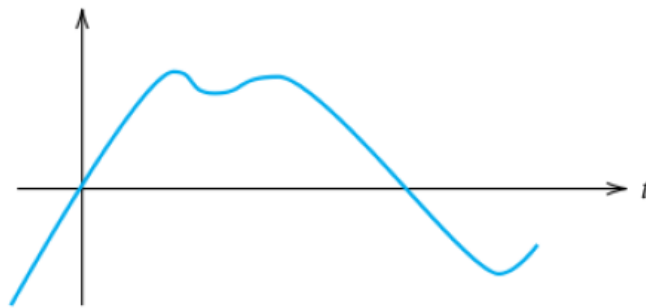
(c) A binary signal

1.3 Señales analógicas y digitales

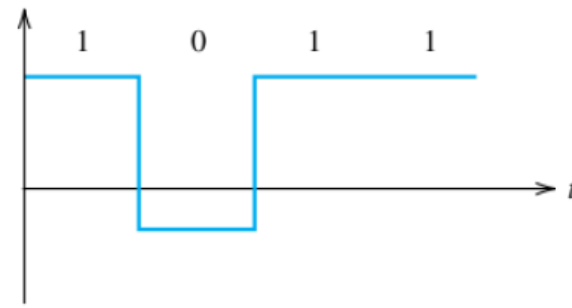
Ventajas circuitos digitales sobre analógicos

Menor sensibilidad al ruido eléctrico y a la distorsión

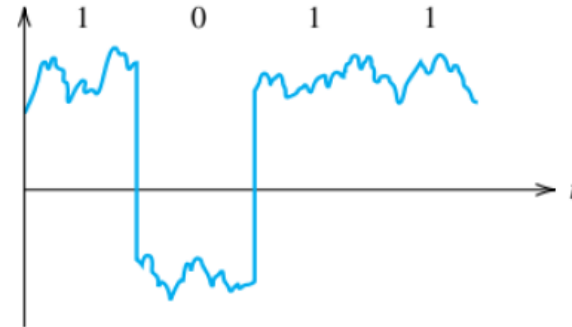
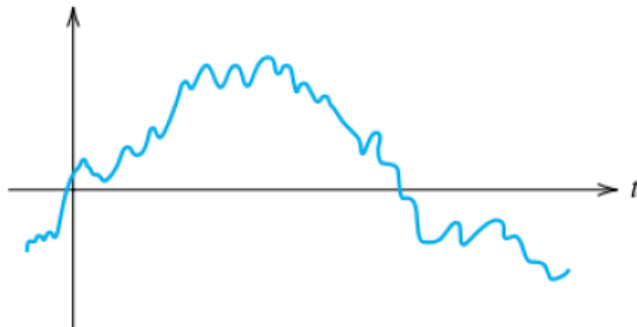
- Ruido: Perturbación no deseada añadida a la señal de entrada
- El ruido tiende a acumularse en las señales analógicas



(a) Señal analógica



(b) Señal digital



1.3 Señales analógicas y digitales

Algunas ventajas circuitos digitales sobre analógicos

- ▶ Como son menos sensibles al ruido, son más precisos
- ▶ Posibilidad de implementar funciones matemáticas, lógicas y de almacenamiento de gran complejidad.
- ▶ Aunque tienen más componentes, los circuitos digitales son más baratos que los analógico (técnicas circuitos integrados)

Algunas desventajas circuitos digitales sobre analógicos

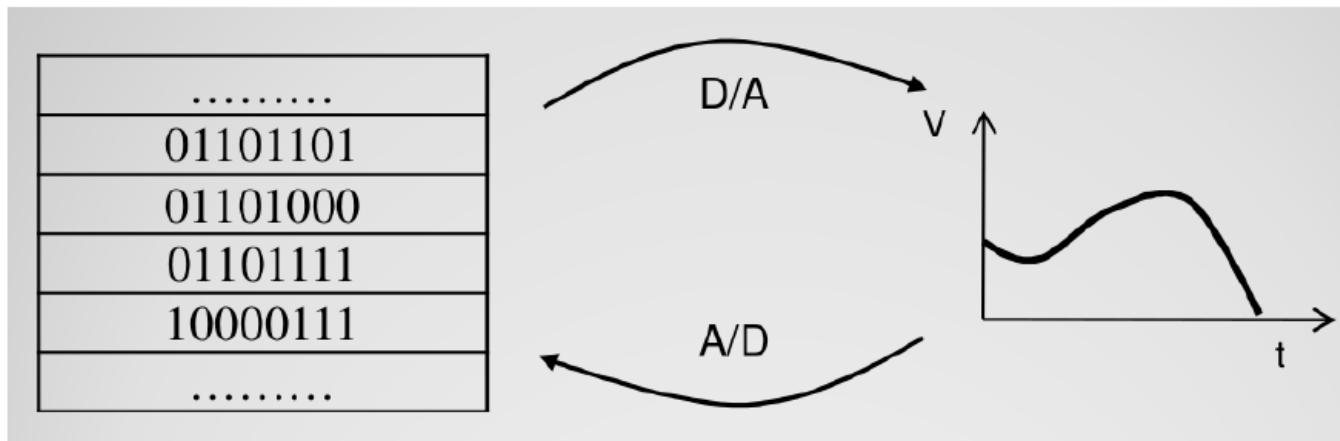
- ▶ Los sistemas analógicos requieren menos componentes que los sistemas digitales
- ▶ Los circuitos analógicos son más rápidos
- ▶ Los circuitos analógicos funcionan mejor a amplitudes bajas o frecuencias altas

1.3 Señales analógicas y digitales

El uso de un determinado tipo de señal hace generalmente más eficiente una función de un sistema electrónico, por ejemplo

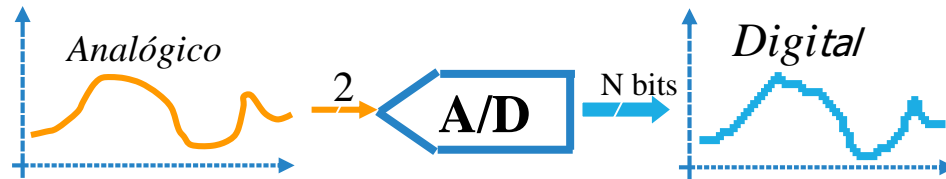
- ▶ **Acondicionamiento de señal:** Analógico
- ▶ **Procesamiento:** Digital
- ▶ **Alimentación:** Analógico

Se hacen necesarios circuitos de conversión A/D y D/A

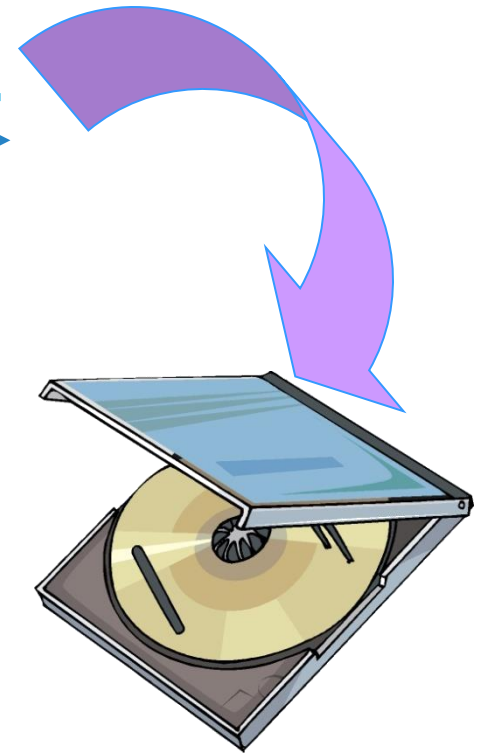


1.3 Electrónica Digital y Electrónica analógica

Ejemplo: Música en tecnología digital. Registro.



Co-participan gran cantidad de circuitos analógicos de tratamiento, filtrado y amplificación y digitales para la grabación de los datos.

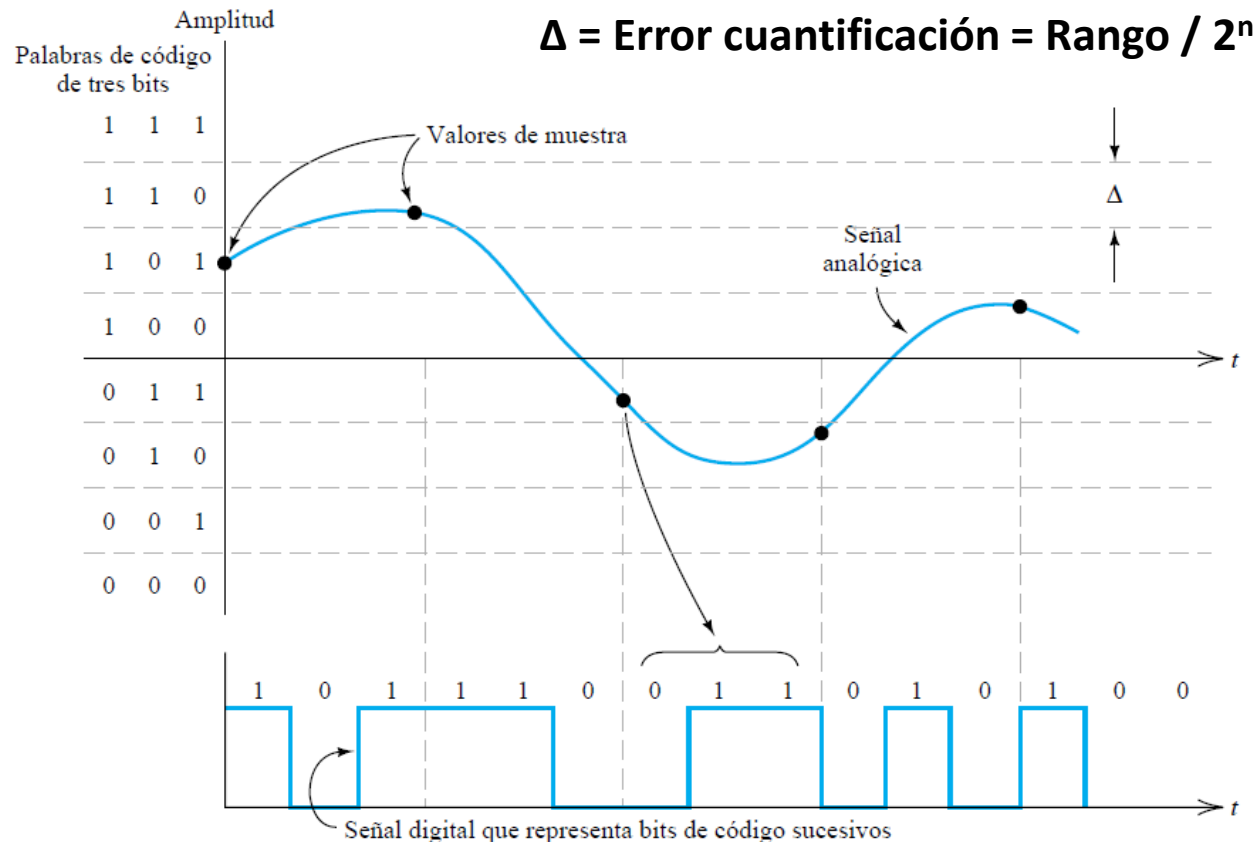


1.3 Conversión A/D (analógico a digital)

1. Muestreo de la señal analógica en instantes de tiempo periódicos.
2. Se divide el rango de la señal en N zonas de amplitud.
3. Se asigna una palabra de código para representar el valor aproximado de cada muestra.

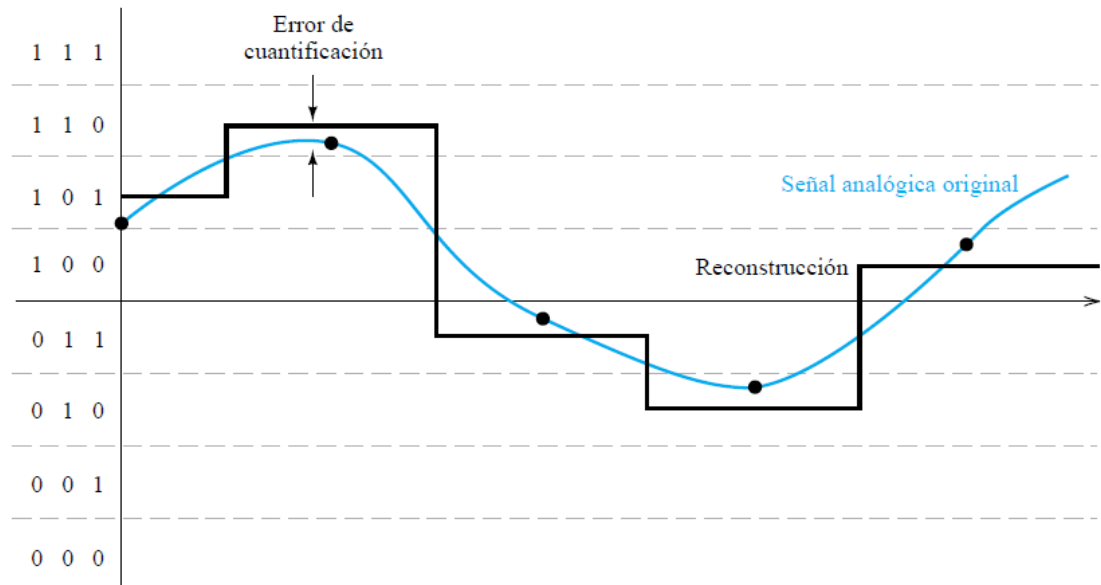
$$\Delta = \text{Error cuantificación} = \text{Rango} / 2^n$$

Conversión con cuantificador de 8 niveles, 3 bits de codificación ($2^3 = 8$ niveles).



1.3 Conversión analógico a digital

Existe por tanto un error de cuantificación en la reconstrucción.



Si se utiliza un ADC de 8 bits ($2^8 = 256$ niveles) se minimiza el error.

Error cuantificación = Rango / 2^n

Donde n es el número de bits que dispones para la conversión analógico / digital

1.4 Sensores

En general casi cualquier propiedad de un material que varíe en respuesta a una excitación puede ser usada para producir un sensor.

Propiedades

- ▶ Resistivas
- ▶ Inductivas
- ▶ Capacitivas
- ▶ Piezoeléctricas
- ▶ Fotoeléctricas
- ▶ Elásticas
- ▶ Térmicas

son usada para desarrollar sensores de Temperatura, Humedad, Presión, Posición, Movimiento, Caudal, Luz, Imagen, Corriente, Conductividad, Resistividad, Biométricos, Acústicos, Imagen, Aceleración, Velocidad, Inclinación, Químicos ...

1.4 Sensores

- En lo que sigue vamos a presentar algunos de los sensores más relevantes en ingeniería.

Sensores pasivos

requieren de una fuente externa de energía para producir la señal.
ej. termómetro resistivo, un sensor capacitivo de desplazamiento.

Son transductores que al incluirlos en **circuitos adaptadores** forman un sensor que convierte el cambio de una magnitud dada (resistencia, capacidad o inductancia) en una señal eléctrica.

Sensores activos

generan la señal eléctrica sin una fuente de energía externa.
ej. Acelerómetros (efecto piezoeléctrico), termopar, ...

- Antes vamos a repasar algunas características de los sistemas de medida.

1.4 Sensores

Características Estáticas de los Transductores (Sensores)

Error

Diferencia entre el valor de una magnitud medida por el sensor y el valor real. Los hay aleatorios (efecto del azar) y sistemáticos (se producen de igual modo en todas las mediciones).

Rango

Intervalo de los valores que puede medir. El rango define los límites superior e inferior entre los cuales puede realizarse la medida. No respetar el rango de medida de un transductor o un instrumento puede ocasionar un error grave en el sistema

Resolución

Menor cambio en la variable medida que es capaz de detectar. Es frecuentemente expresado como un porcentaje del rango del dispositivo. (Ej. 0.1% de toda la escala \equiv una milésima del rango).

1.4 Sensores

Exactitud (Accuracy)

Máximo error esperado de la medida respecto al valor verdadero. Representa la capacidad de un instrumento de dar medidas que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida. Puede ser expresado como un valor absoluto o un porcentaje del rango del sistema. *(Ej. La exactitud de un sensor de velocidad puede ser expresada como ± 1 km/h o como $\pm 0.5\%$ del rango.)*

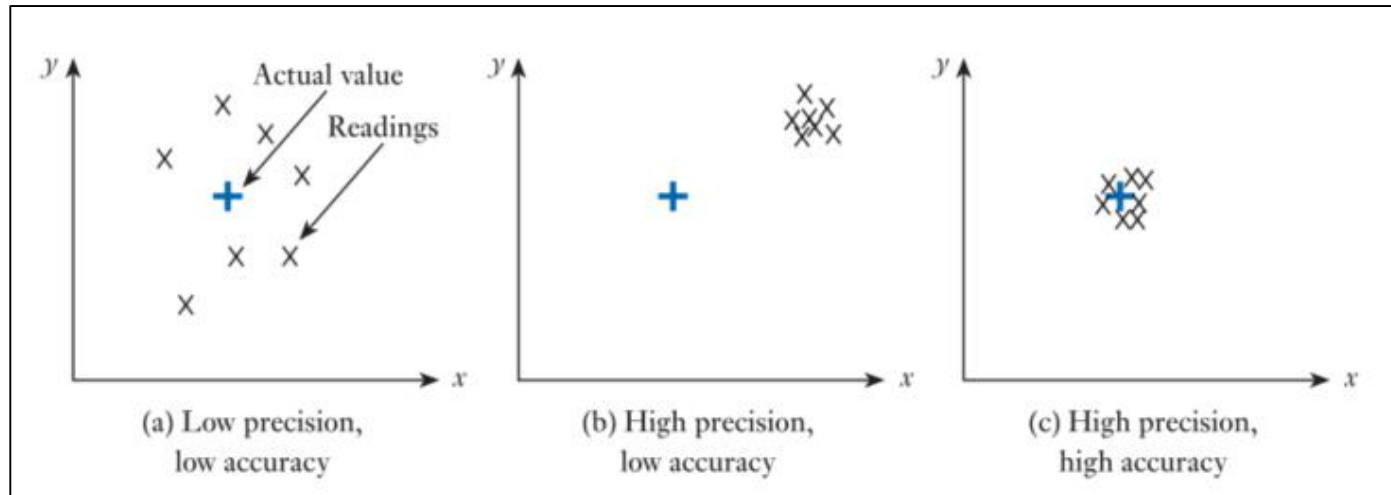
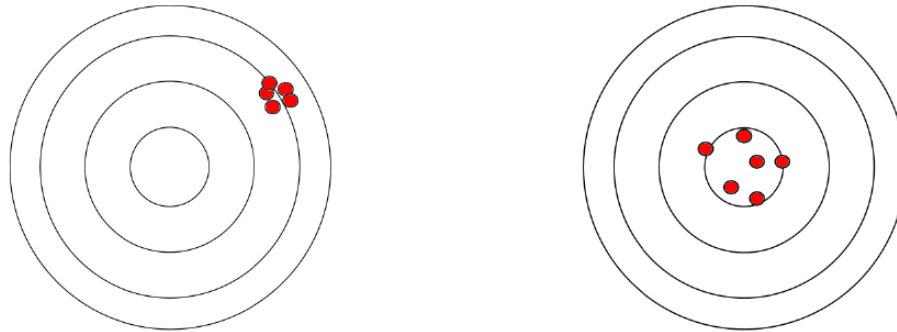
Precisión (Fidelidad)

Máxima dispersión esperada para varias medidas del mismo valor de entrada. Capacidad de un instrumento de dar el mismo valor de la magnitud medida al realizar la medición varias veces en las mismas condiciones.

La precisión es una medida de la falta de errores aleatorios, y por tanto, aparatos con alta precisión producirán lecturas similares, con poca variación.

1.4 Sensores

Ejemplo 1: ¿Cuál de estos sistemas sería preciso?, ¿ y cuál exacto?



1.4 Sensores

Características de los sensores

Exactitud vs precisión

Alta exactitud
Alta precisión



Bajo error sistemático y aleatorio

Alta exactitud
Baja precisión



Elevado error aleatorio

Baja exactitud
Alta precisión



Elevado error sistemático

Baja exactitud
Baja precisión



Elevado error sistemático y aleatorio

1.4 Sensores

Repetibilidad (Reapeatability)

Es el mismo concepto que la fidelidad, salvo que nos referimos a repetibilidad cuando las medidas se realizan en un corto espacio de tiempo.

$$\text{Repetibilidad} = \sqrt{\frac{S_i - \bar{S}}{N}}$$

Linealidad

Indica en que medida la variación de la salida es proporcional a la de entrada. Se puede medir la no linealidad de un sistema como la máxima desviación de la medidas respecto de la linea recta ideal.

Sensibilidad, S

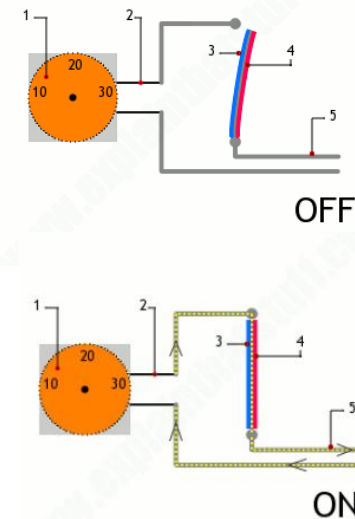
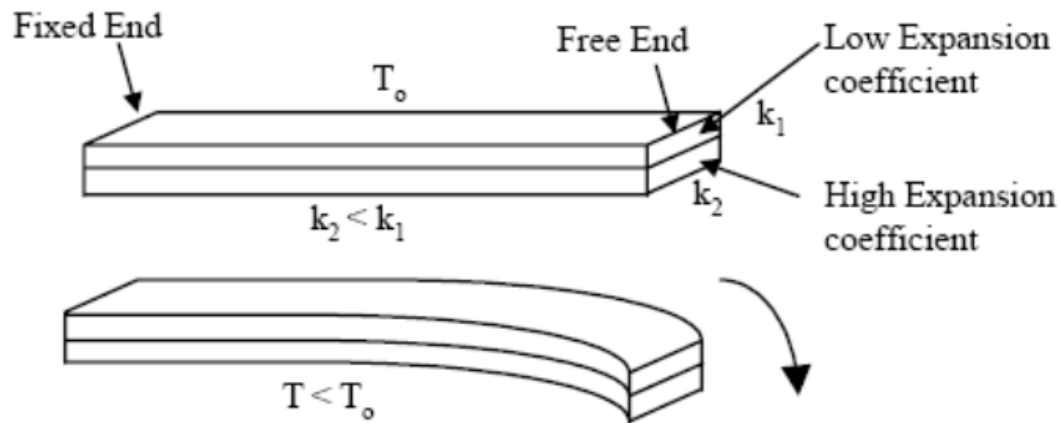
Medida del cambio producido en la salida para un cambio en la entrada. Esto es, si x es la magnitud física a medir e $y = y(x)$ la señal eléctrica, se define la sensibilidad como $S = \frac{dy}{dx}$
(Ej. Un sensor de temperatura dado tiene una $S=10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.)

1.4 Sensores

Sensores de temperatura

Termostato

- ▶ Se basan en una lámina bimetálica (2 láminas de metal con diferente coeficiente de dilatación, que cuando se calientan se dilatan forma distinta provocando deformación.)
- ▶ Salida binaria indicando si la T está por encima debajo de cierto umbral.

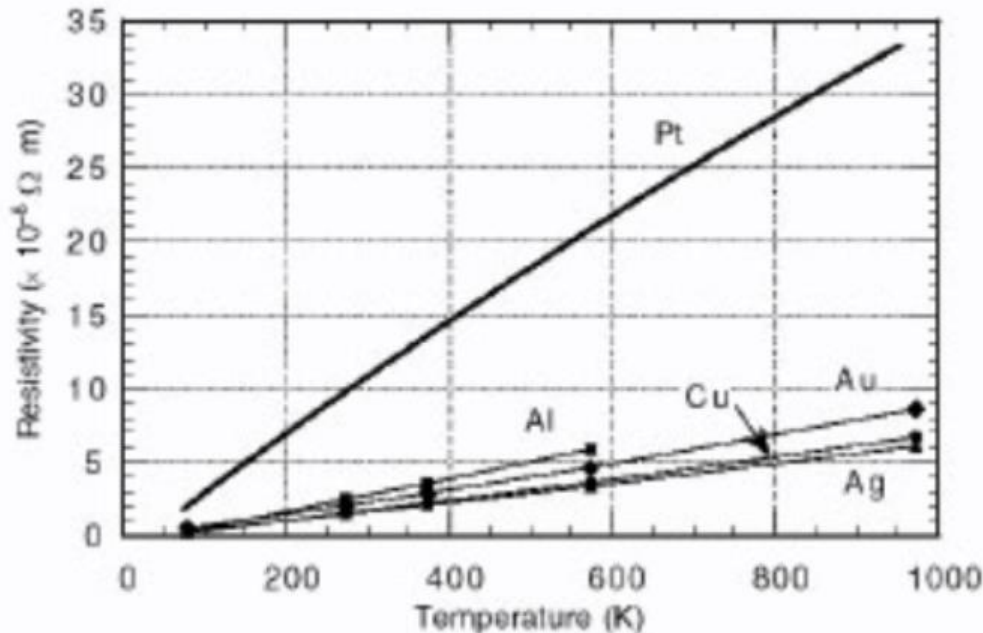


1.4 Sensores

Sensores de temperatura

Termómetros resistivos:

- La resistencia eléctrica de todos los metales varía linealmente con la temperatura
- Esto permite conocer la temperatura mediante el valor de su resistencia, comparándola con el valor de la misma a una temperatura conocida.
- Muchos sensores típicos utilizan Platino por su mayor sensibilidad a los cambios en la temperatura y son conocidos como **PRT (Platinum Resistance Thermometers)**



(a) A typical PRT element

1.4 Sensores

Sensores de temperatura

PRT (Platinum Resistance Thermometer)

- ▶ La resistencia eléctrica de los **metales** depende de T :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

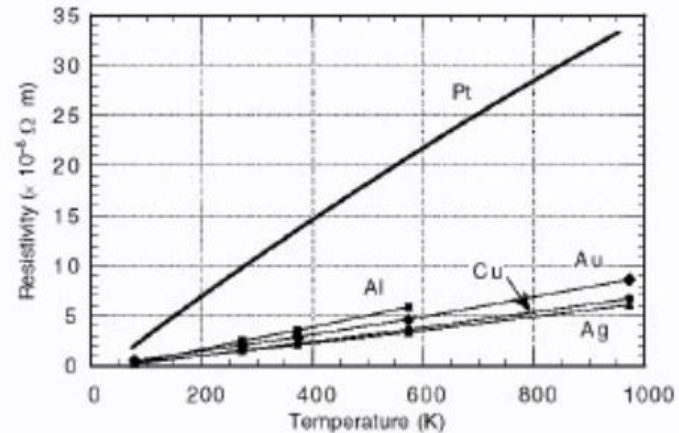
α es el coefic. de temperatura, $R_0 = R(T_0)$ y $\Delta T = T - T_0$.

- ▶ Muy lineales.
- ▶ Poco sensibles:
ej. $R(0^\circ C) = 100\Omega$, $R_{PRT}(100^\circ C) = 140\Omega$

Buena exactitud: 0.1°C típicamente

Baja sensibilidad: un cambio en la temperatura produce un pequeño cambio en la señal de salida.

Buena linealidad: el coeficiente α es cte y positivo.



1.4 Sensores

PRT (Platinum Resistance Thermometer)

$$R(T) = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

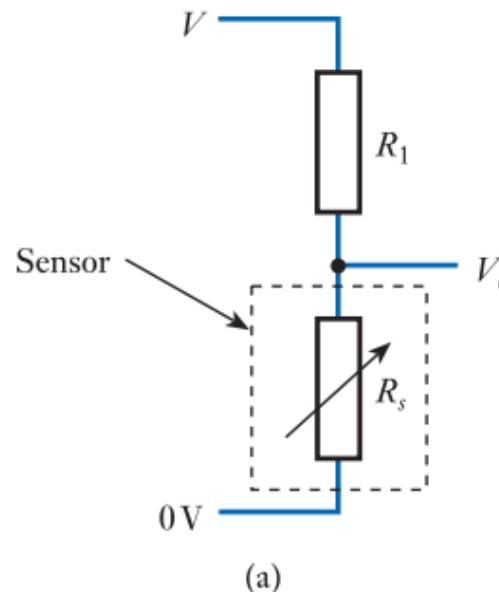
$$\text{ej. } R(0^\circ\text{C}) = 100\Omega, R_{PRT}(100^\circ\text{C}) = 140\Omega$$

Family PTC: Example - PT100:

PT meaning Platinum
100 meaning $R_0 = 100 \Omega$



(a) A typical PRT element



Utilizando un sensor resistivo en un divisor de tensión

$$V_o = V \frac{R_s}{R_1 + R_s}$$

1.4 Sensores

Sensores de temperatura

Ejemplo 2: Un sensor de temperatura tipo PRT (muy lineal) tiene una resistencia de 100Ω para una temperatura de 0°C (lo que se conoce como "una PT100"). Si su coeficiente de temperatura (o sensibilidad) es $\alpha = 0,00385/^\circ\text{C}$, ¿cuál será su resistencia a 50°C ?

$$R=119.25 \Omega$$

1.4 Sensores

Sensores de temperatura

Termistores

- ▶ Se basan en la variación de la resistencia de un **semiconductor** con la temperatura
- ▶ NTC (PTC): Negative (Positive) Temperature Coefficient thermistor

• Muy sensibles, ej.

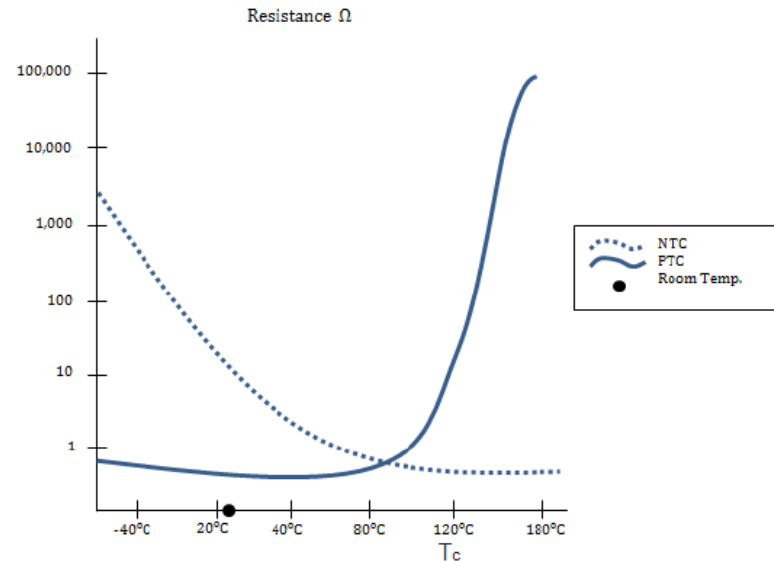
$$R(T = 0^{\circ}\text{C}) = 5\text{k}\Omega,$$

$$R(T = 100^{\circ}\text{C}) = 100\Omega$$

• No lineales, ej. para NTC:

$$R(T) = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

donde parámetro B es la temperatura característica del material y $R_0 = R(T_0)$ la resistencia de referencia.

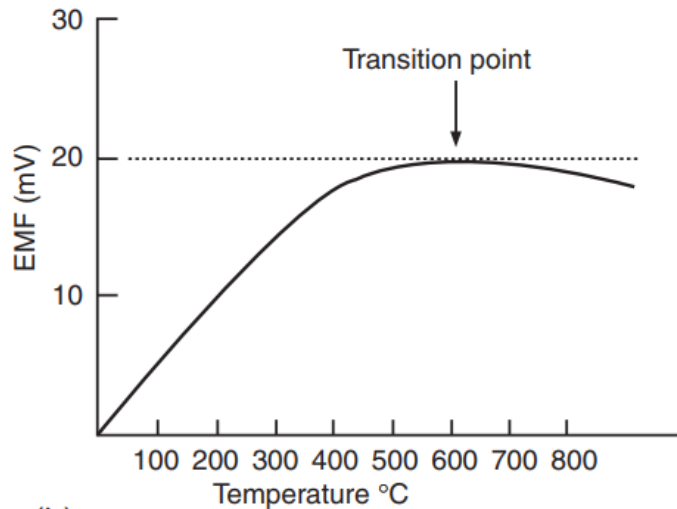


1.4 Sensores

Sensores de temperatura

Termopares / Thermocouples

- Su acción depende de la lectura del potencial de contacto que aparece entre dos metales diferentes sometidos a la misma temperatura.
- La relación entre la diferencia de potencial y la temperatura no es lineal, pero en una pequeña parte de la curva se puede considerar lineal.



(b)



1.4 Sensores

Sensores de temperatura

- Algunos tipos de sensores

PRT



NTC



Termopar

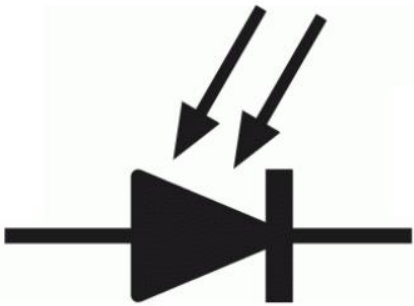


1.4 Sensores

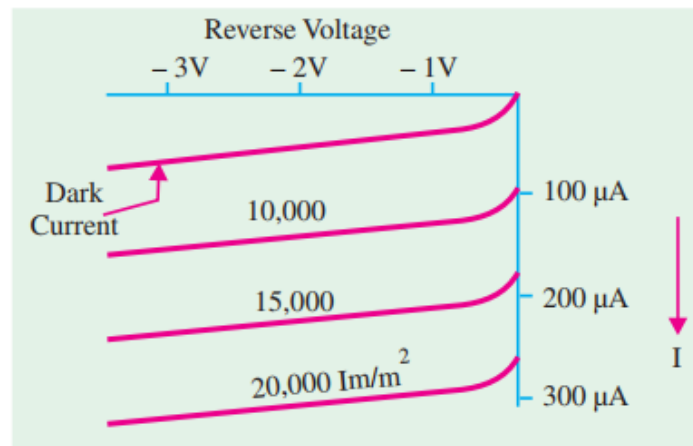
Sensores de luz

Fotodiodos

- ▶ Al aumentar la cantidad de luz incidente se incrementa la circulación de corriente inversa. Cuando no hay luz se comportan como un diodo normal.
- ▶ Fotovoltaicos, generan electricidad cuando son iluminados.
- ▶ Baja sensibilidad.
- ▶ No lineales.



(a) A photodiode



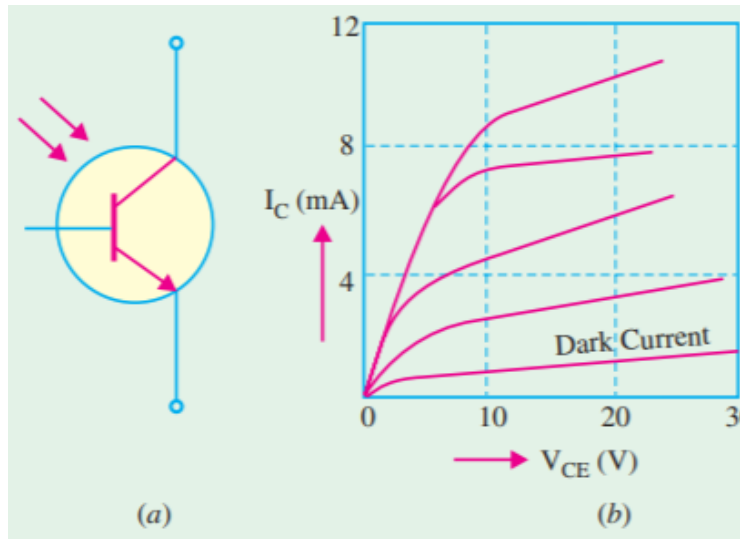
Baja sensibilidad
No lineal

1.4 Sensores

Sensores de luz

Fototransistor

- ▶ Funcionan de manera similar a la de un transistor normal. La luz incide sobre la base, generando portadores en ella.
- ▶ Alta sensibilidad
- ▶ No lineales.



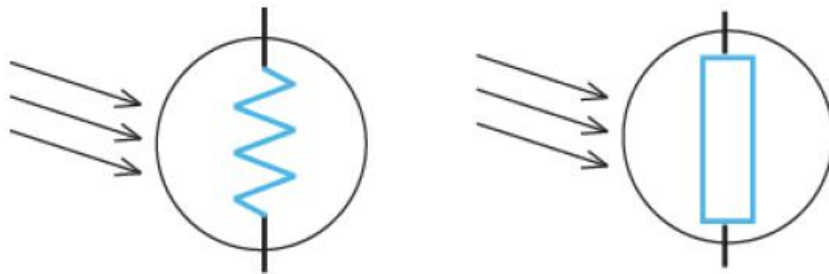
Alta sensibilidad
No lineal

1.4 Sensores

Sensores de luz

LDR (light-dependent resistor): Fotorresistencia

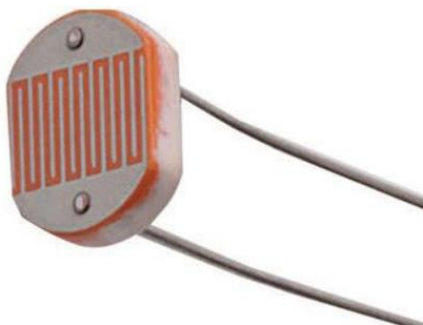
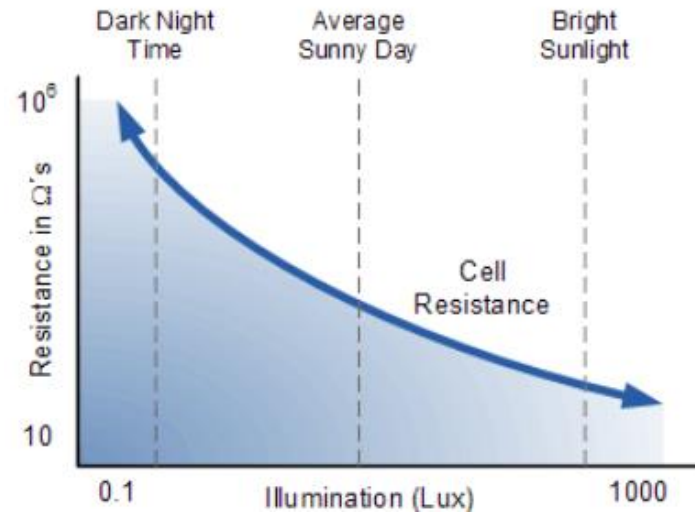
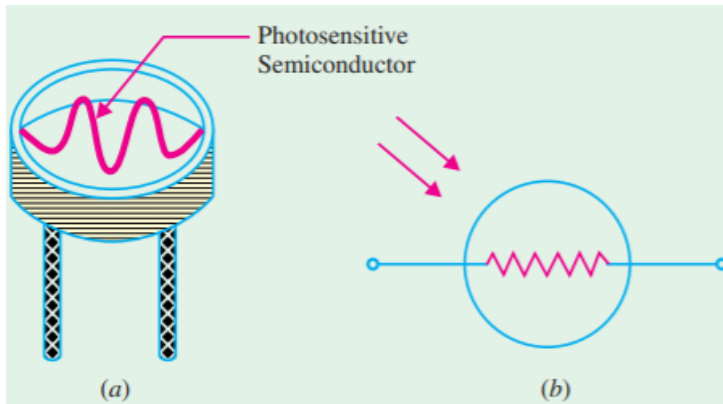
- ▶ Cambios de intensidad luminosa \Rightarrow cambios en su resistencia.
- ▶ Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico. Posee muy pocos electrones libres en condiciones de oscuridad (resistencia muy alta), pero que al ser iluminada se generan portadores de carga libres, disminuyendo la resistencia.
- ▶ No lineal: $R_{LDR} = KE^{-\alpha}$;
donde los coeficientes K, α dependen del material; y E es la iluminación (densidad superficial energía recibida).
Ej. Para 100 Lux (habitación bien iluminada) $\rightarrow R_{LDR} \approx 1k\Omega$. Para iluminación bajo un sol brillante (800 Lux) $\rightarrow R_{LDR} \approx 10 \Omega$



1.4 Sensores

Sensores de luz

LDR (light-dependent resistor): Fotorresistencia



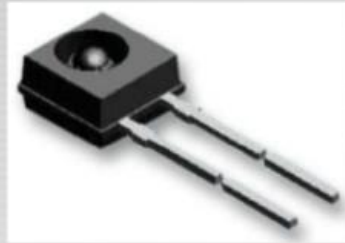
Su aplicación más popular es el **sistema de encendido de luces** cuando la noche cae. Cuando la luz ambiente decae por debajo de un nivel de referencia, se activa un relé cerrando el circuito de encendido de luces.

1.4 Sensores

Sensores de luz

- Algunos tipos de sensores

Fotodiodos



Fototransistores



LDR



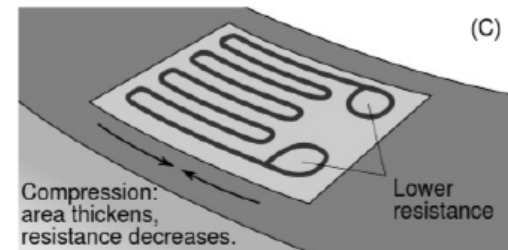
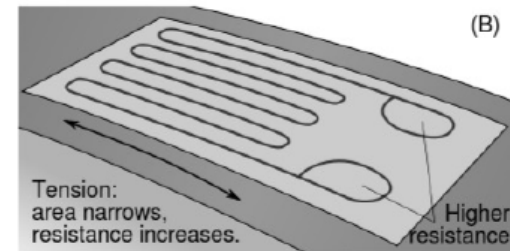
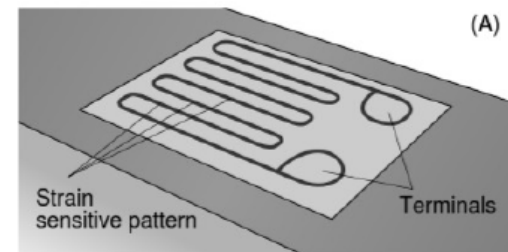
1.4 Sensores

Sensores de deformación (fuerza)

Galga extensiométrica

- ▶ Variación de la resistencia de un conductor o semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico (efecto piezoresistivo)
- ▶ Por ejemplo en un conductor
 $\rightarrow R = \rho \frac{l}{A}$
- ▶ Miden en una sola dirección

Galgas adecuadamente conectadas pueden ser usadas como sensores de presión.

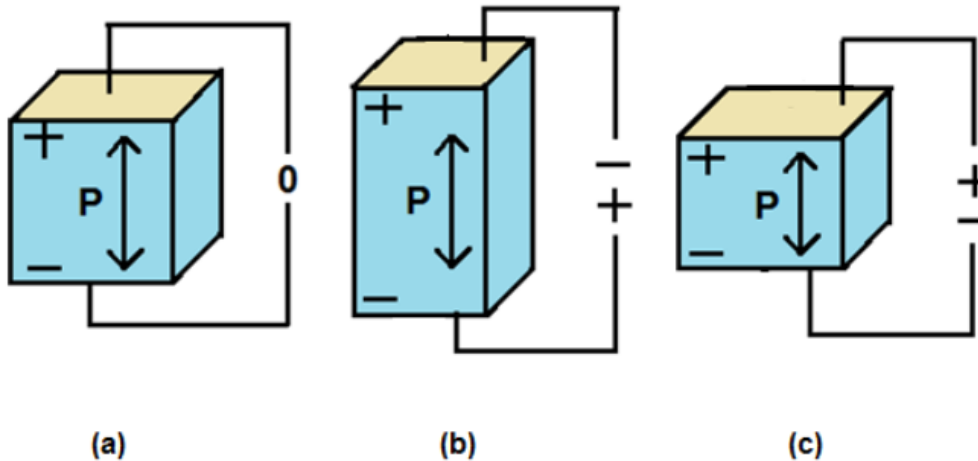


1.4 Sensores

Sensores de deformación (fuerza)

Materiales piezoeléctricos

- ▶ Generan una diferencia de potencial cuando se les aplica una tensión mecánica.
- ▶ Ej. cuarzo, algunas cerámicas (PZT),...
- ▶ Sensor activo.
- ▶ Aplicaciones: Sensores de fuerza y presión, acelerómetros, ...

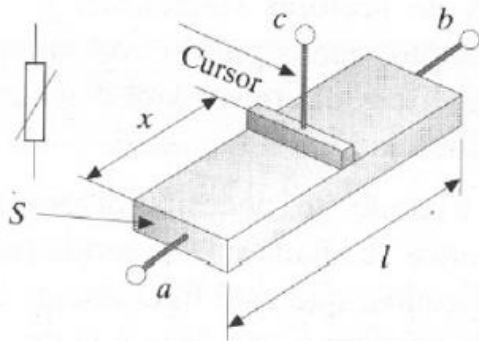


1.4 Sensores

Sensores de Desplazamiento

Potenciómetro

- ▶ Consiste en un resistor variable
- ▶ Ampliamente usados (controles en radios, TV's ...)
- ▶ Admiten movimientos lineales y circulares.



$$R_{ab} = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$R_{ac} = \rho \cdot \frac{x}{S}$$

$$R_{ac} = \frac{R_{ab}}{l} \cdot x$$



1.4 Sensores

Sensores de Desplazamiento

Sensores inductivos

- ▶ La inductancia de una bobina varía en la presencia de materiales ferromagnéticos.
- ▶ Sensor de proximidad, LVDT, ...

Interruptores

- ▶ Sensores binarios
- ▶ Sufre rebotes

Optointerruptores

- ▶ Consiste de un sensor de luz (ej. fototransistor) y una fuente de luz (ej. LED) incluidos y adyacentes en un mismo dispositivo.
- ▶ La presencia de un objeto interrumpe el flujo de corriente en el circuito.
- ▶ Sin rebote.

1.4 Sensores

Sensores de Desplazamiento

Interruptores



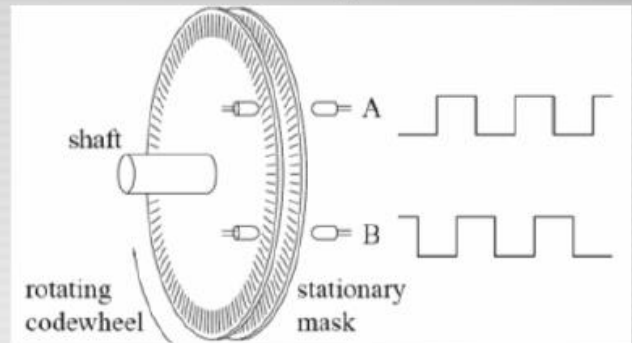
Potenciómetro



Incremental



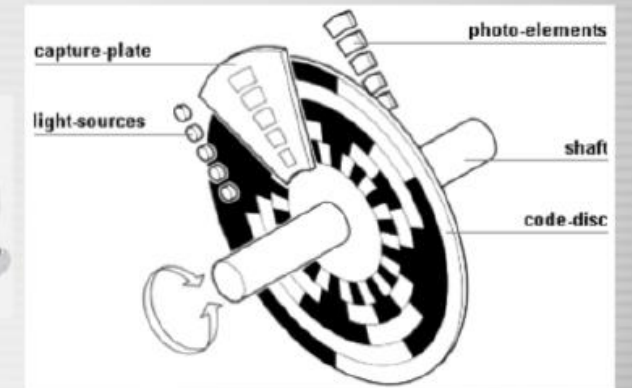
Codificadores de posición



Opto-interruptores



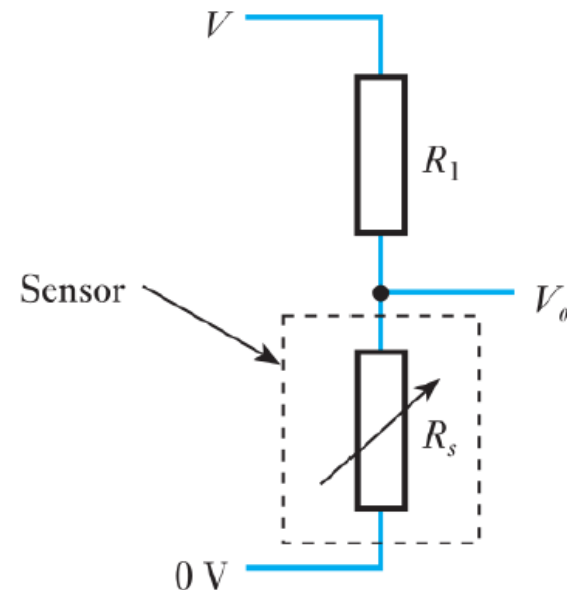
Absoluto



Circuitos adaptadores: divisor de tensión

- Sensores activos producen una señal eléctrica directamente relacionada con la magnitud física que miden.
- Sensores pasivos requieren de una fuente externa de energía para producir la señal.
- Por ejemplo, muchos sensores representan el cambio de una magnitud física cambiando su resistencia (ej. PRT, LDR, Galga, ...)

- Una manera de introducir un cambio de resistencia en voltaje es introduciendo el sensor en un divisor de tensión

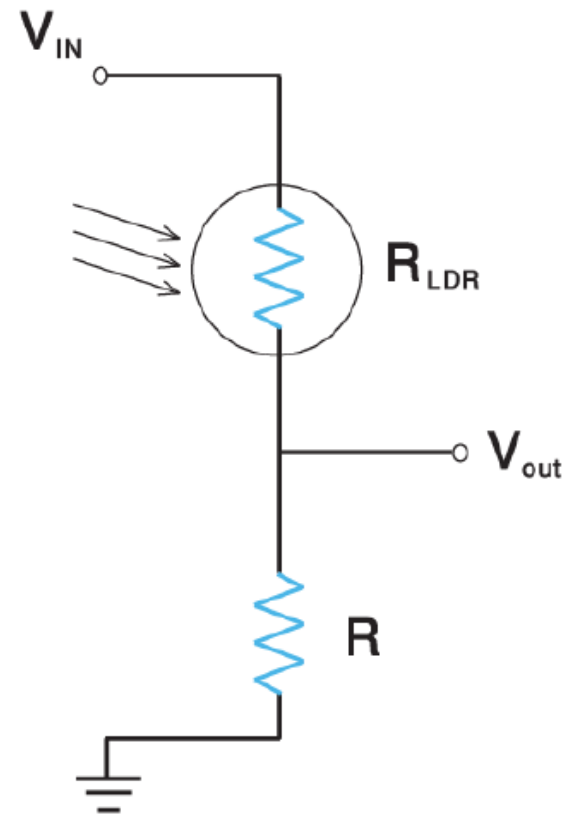


Circuitos adaptadores: divisor de tensión

Ejemplo: convertir el cambio de resistencia en la LDR a un cambio de voltaje, incluyendo a la LDR en un divisor de tensión

$$V_{out} = V_{IN} \frac{R}{R + R_{LDR}}$$

- Voltaje de salida, V_{out} depende de R_{LDR} .
- Para alta intensidad luminosa, R_{LDR} disminuirá \Rightarrow aumentando V_{out}
- V_{out} es la señal que porta la información de la cantidad de luz que hay.



Circuitos adaptadores: divisor de tensión

Ejemplo 4:

Un sensor de temperatura tipo PRT (muy lineal) tiene una resistencia de 100Ω para una temperatura de 0°C (lo que se conoce como "una PT100"), siendo su coeficiente de temperatura (o sensibilidad) es $\alpha = 0.00385/^\circ\text{C}$. Si con esta PRT se construye un divisor de tensión con una resistencia fija de 100Ω y una tensión de alimentación de 12V , estando la PT100 entre el nudo de masa y el nudo de salida, ¿qué relación matemática habrá entre la tensión de salida y la temperatura?

$$\text{Sol. } V_o = \frac{100+0.385T}{200+0.385T} 12 \text{ V.}$$

1.5 Actuadores

- Los sistemas interactúan con el exterior mediante los actuadores, que toman una señal eléctrica como entrada y generan un cambio en una magnitud física exterior.

De calor

- ▶ Calefactor resistivo



Luz

- ▶ Lámparas convencionales
- ▶ LED



LEDs



1.5 Actuadores

Fuerza, desplazamiento

- ▶ Solenoide
- ▶ Motores (AC,DC, paso a paso)

Solenoide



DC

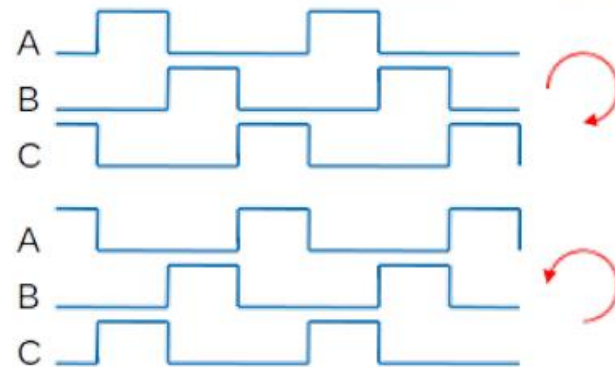
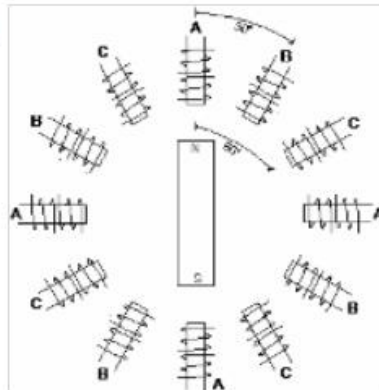


Motores

AC



Motor paso a paso

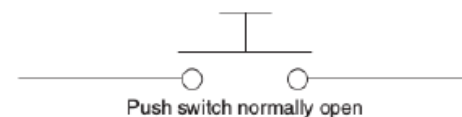
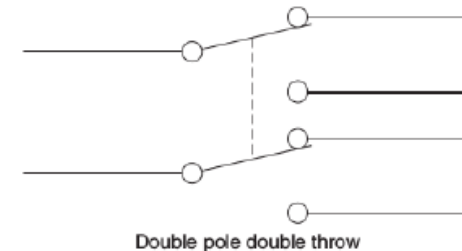
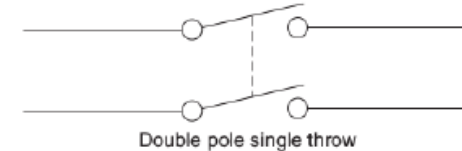
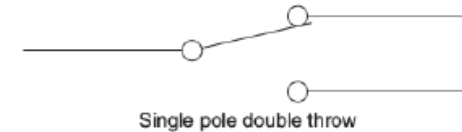


Apéndice: Sensores en aeronáutica

- Hay una amplia variedad de parámetros y magnitudes que necesitan ser monitorizadas en un avión, estas son medidas mediante sensores.

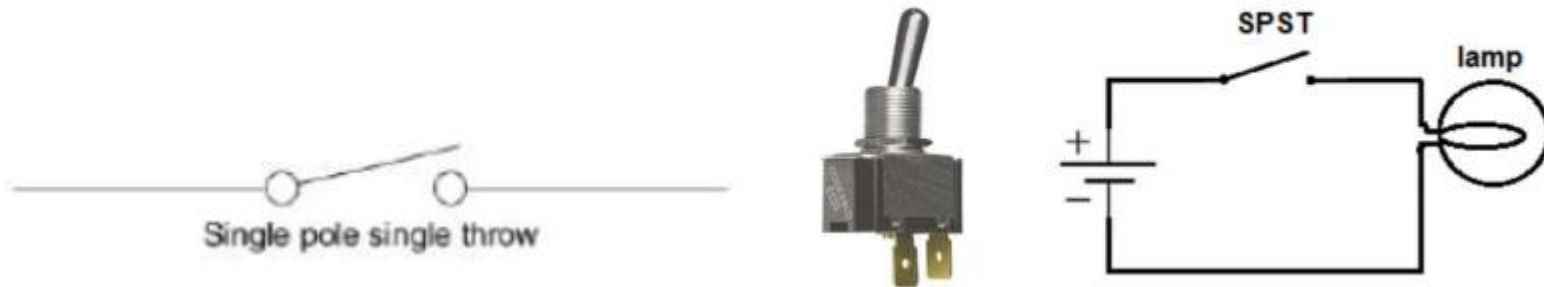
- A continuación presentamos algunos pocos ejemplos sencillos, existiendo numerosos otros casos de sensores más avanzados.

- Tipos de **interruptores** y *rocker switches*



Interruptores / Rocker Switches

- **Single Pole Single Throw (SPST) Switch Circuit**



- **Single Pole Double Throw (SPDT) switch** is a **switch** that only has a **single** input and can connect to and **switch** between the 2 outputs.



Interruptores / Rocker Switches

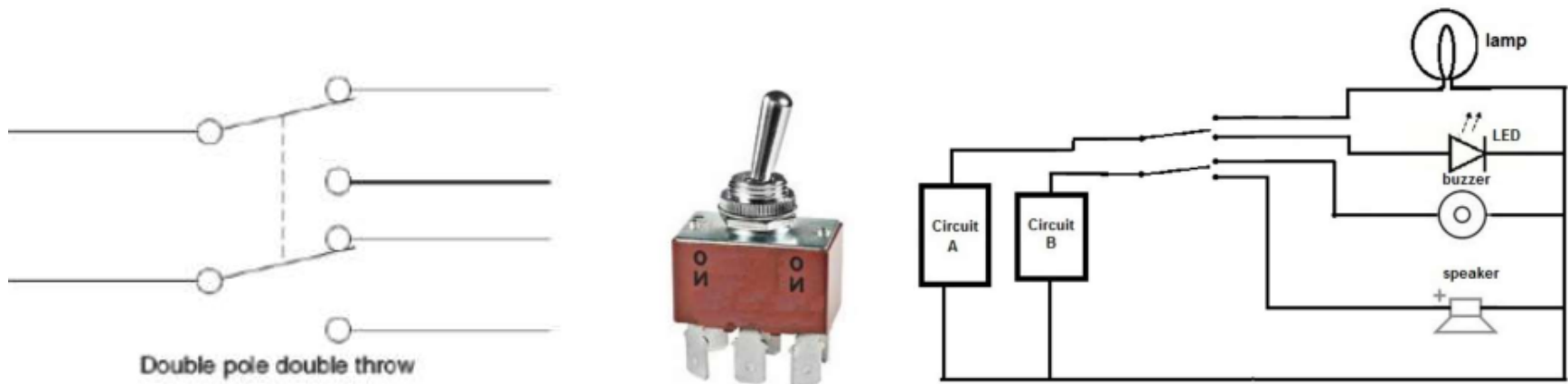
- **Doble Pole Single Throw (DPST): Un mismo switch conecta dos circuitos independientes a la vez**

Double Pole Single Throw Switch (DPST) Circuit

Below is an example of a circuit which utilizes a double pole single throw switch.



- **Doble Pole Doble Throw (DPDT)** is a double pole double throw switch; this is equivalent to two SPDT switches. It routes two separate **circuits**, connecting each of two inputs to one of two outputs.



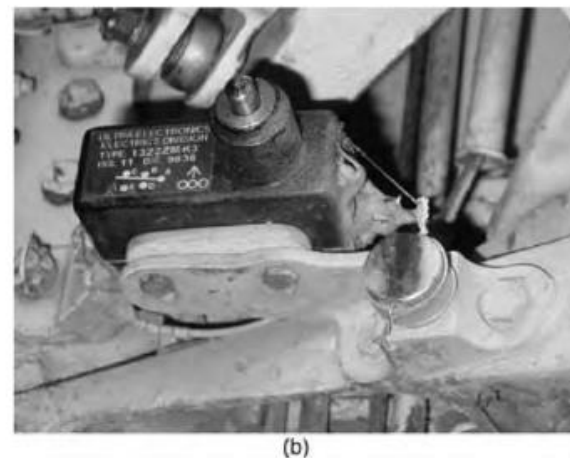
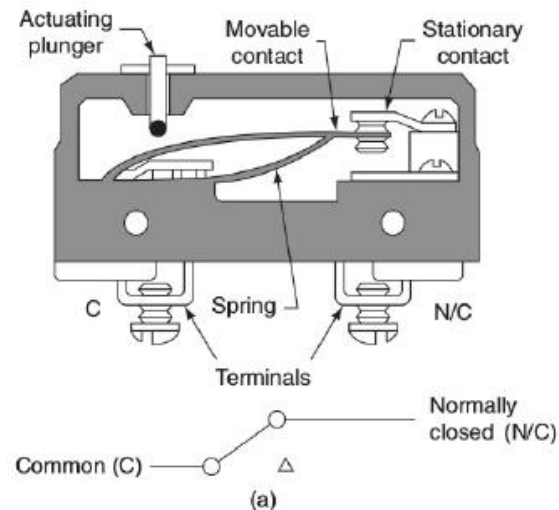
Apéndice: Sensores en aeronáutica

Micro-switches

Ejemplo: detectar cuando el avión está en tierra, esto se consigue incorporando un micro-switch en el tren de aterrizaje.

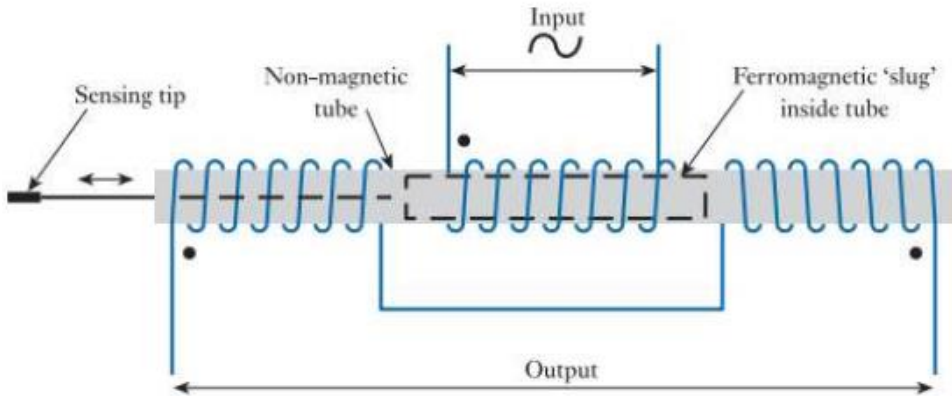
LVDT

Ej. En servosistemas de posición. Miden la posición de numerosos mecanismos en la aeronave: Primary and secondary flight controls (PFC/SFC), Engine mechanisms and valves, Nose-wheel steering, Pilot controls



Apéndice: Sensores en aeronáutica

LVDT (Linear Variable Differential Transformers).



Un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) es un tipo de sensor de desplazamiento utilizado para medir la posición lineal de un objeto. Es particularmente útil en aplicaciones donde se necesita una alta precisión y fiabilidad en la medición de desplazamientos pequeños.

El principio de funcionamiento de un LVDT se basa en la inducción electromagnética. Consiste en un núcleo ferromagnético cilíndrico hueco que se mueve dentro de una bobina primaria y dos bobinas secundarias ubicadas simétricamente a ambos lados de la bobina primaria. Cuando el núcleo se desplaza dentro de la bobina primaria, induce voltajes diferenciales en las bobinas secundarias, que varían de acuerdo con la posición del núcleo.

Algunas características

Apéndice: Sensores en aeronáutica

Termostato

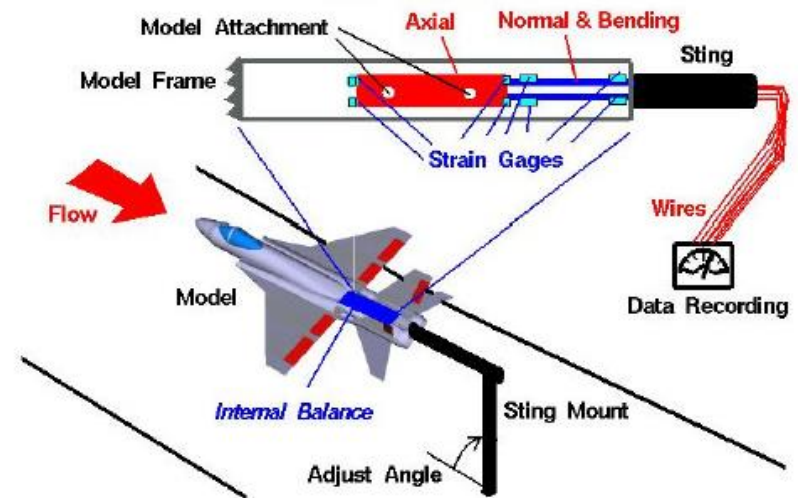
En forma de espiral, de manera que los cambios de temperatura lo hacen girar.

La aplicación típica es como indicador de la temperatura exterior



Galga

Ejemplo: Medir combustible, estado del motor, ...



Tema 2. DIODOS

Parte A



Curso 2023-2024

Electrónica 2º curso
Grado de Ingeniería Aeroespacial



Tema 2 . DIODOS.

Parte A. Semiconductores y Diodos (Unión PN)

Parte B. Circuitos de aplicación con Diodos (Conversión AC/DC)
y diodos de propósito espacial

Índice

Parte A. Semiconductores y Diodos (Unión PN)

1. Modelo atómico. Estructura de sólidos. Bandas de energía
2. Semiconductor intrínseco.
3. Semiconductor extrínseco tipo P o tipo N.
4. Unión PN o diodo semiconductor.
5. El diodo ideal. 1ª aproximación
6. El diodo en 2ª aproximación
7. El diodo en 3ª aproximación
8. Análisis de circuitos con diodos. Modelos equivalentes
9. Análisis de circuitos con diodos. Recta de Carga.
10. Encapsulado de diodos y parámetros típicos

Estructura de los sólidos

- La **conductividad** eléctrica de los materiales sólidos se debe a su **estructura atómica**.
- Usando esta propiedad, los materiales sólidos se pueden clasificar en conductores, aislantes o **semiconductores**.

Modelo atómico de Bohr:

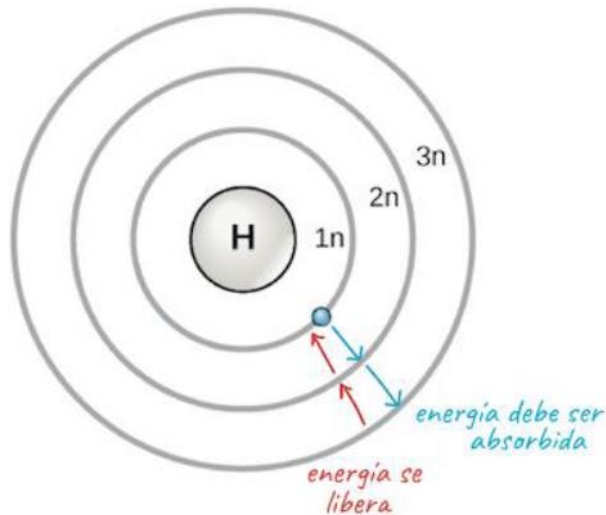
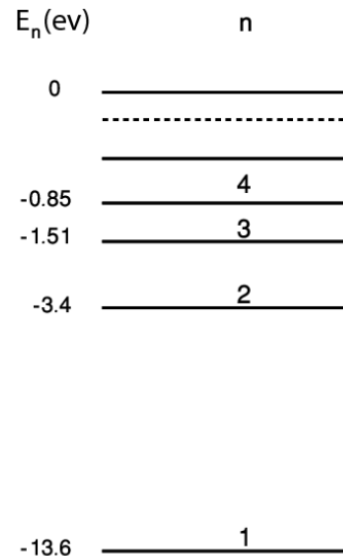


Diagrama de niveles de Energía



Niveles de energía del átomo de H en el modelo de Bohr

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad n \in \mathbb{N}$$

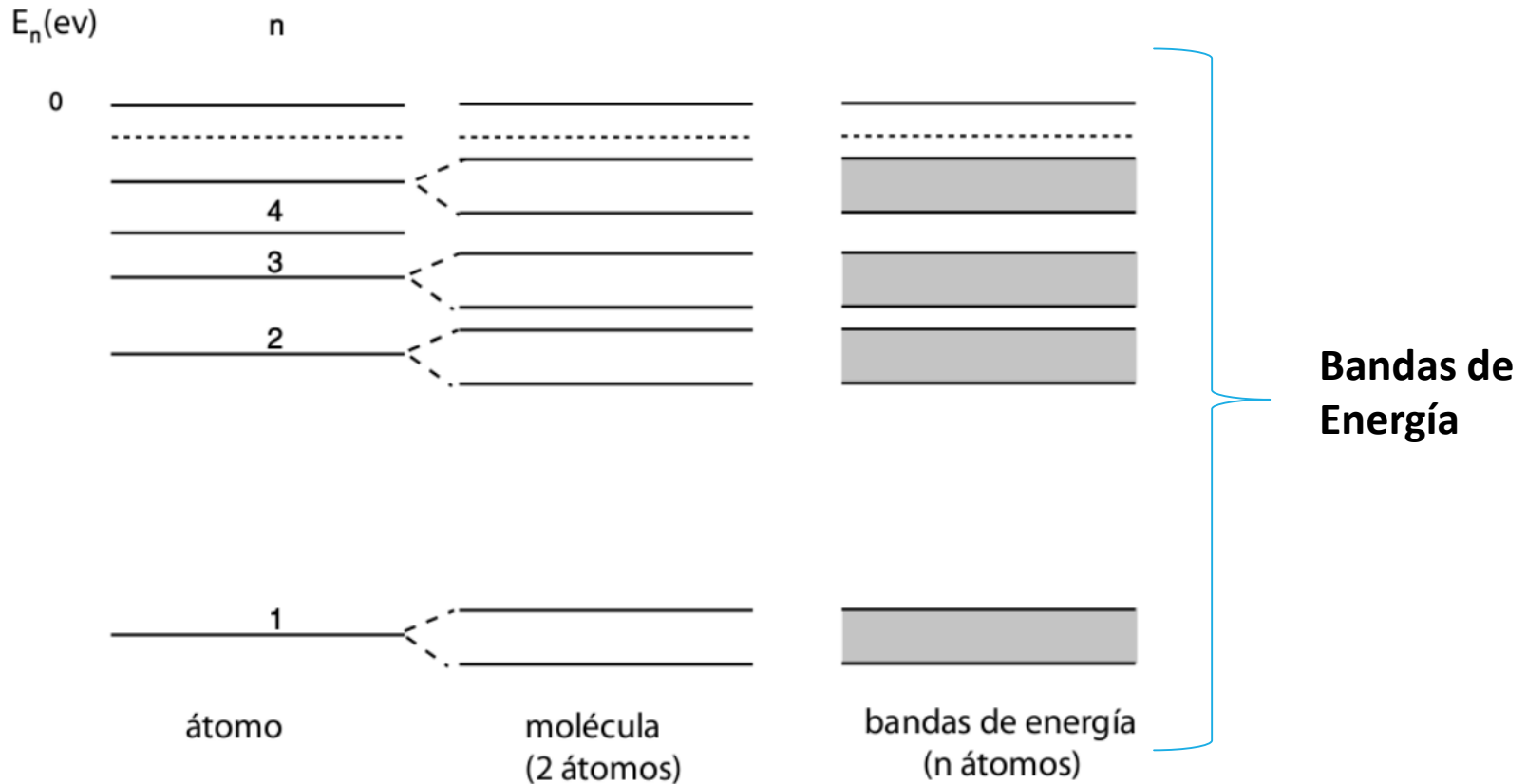
Sólo las energías que satisfagan esta ecuación están permitidas \Rightarrow están cuantizadas

$$E_1 = -13,6 \text{ eV} \rightarrow \text{Energía del estado fundamental}$$

$$E_\infty = 0 \rightarrow e^- \text{ libre}$$

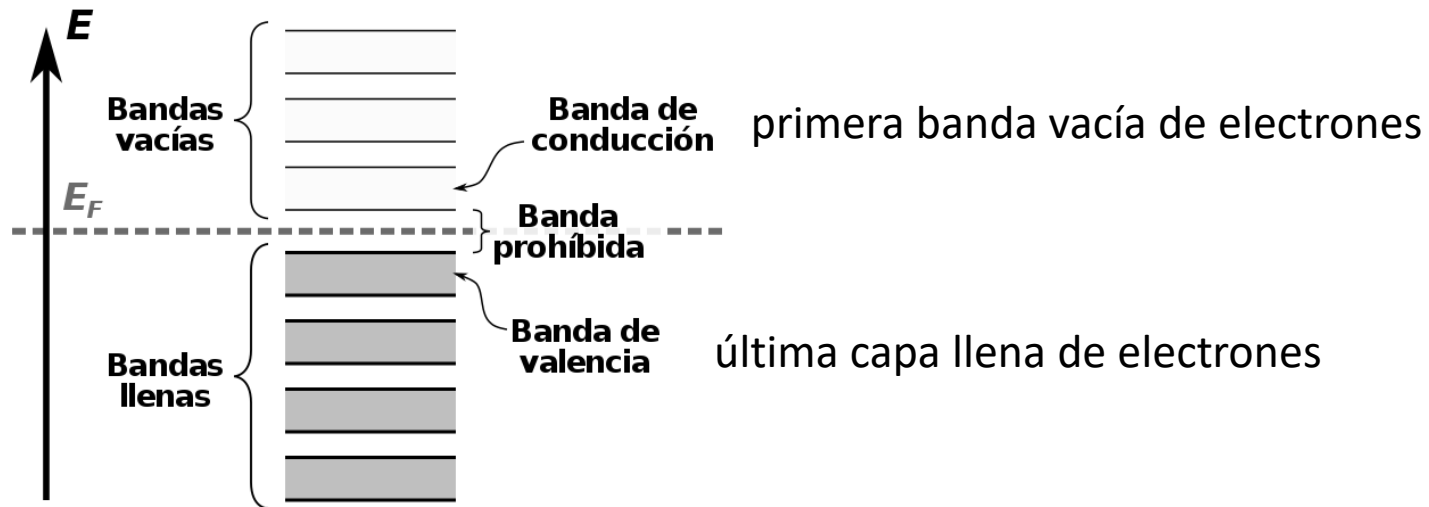
Estructura de los sólidos

También sucede cuando un gran número de átomos se unen, como es el caso de los sólidos con enlace covalente ($\sim 10^{23}$ átomos/cm³).



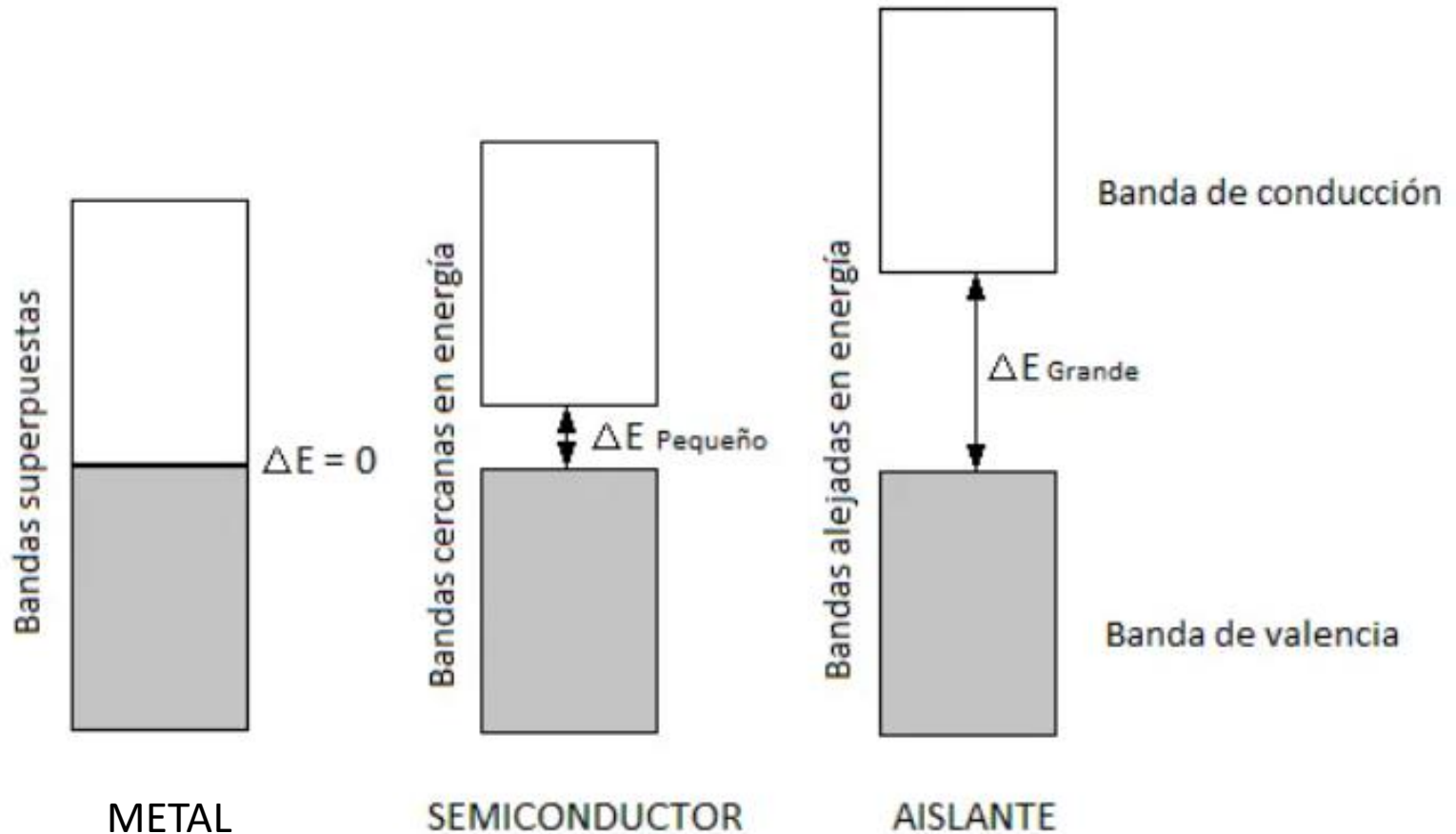
Estructura de los sólidos

- Entre dichas **bandas** de energía **permitidas**, surgen bandas donde no existe ningún estado permitido: **bandas prohibidas**.
- Dentro de las **bandas permitidas** hay 2 bandas muy características



Estructura de los sólidos

- El **modelo de bandas** de energía explica satisfactoriamente la existencia de **conductores, aislantes y semiconductores**.

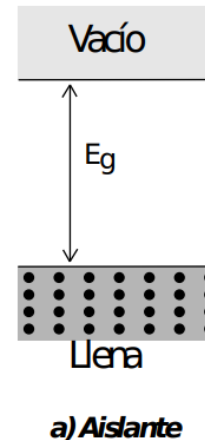
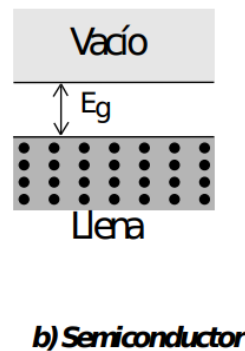
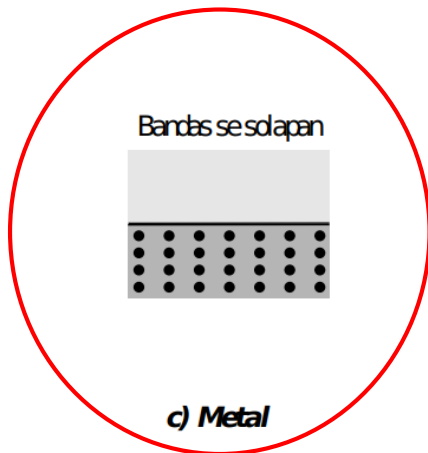


Estructura de los sólidos

Metales

Las BV y de BC prácticamente se solapan, de manera que la banda prohibida prácticamente desaparece.

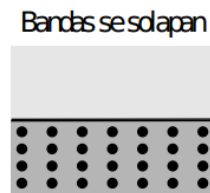
Surgen pues niveles desocupados para los electrones, que pueden moverse bajo la influencia de un campo eléctrico establecido, lo que explica la alta conductividad de los metales.



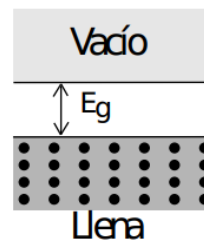
Estructura de los sólidos

Aislante

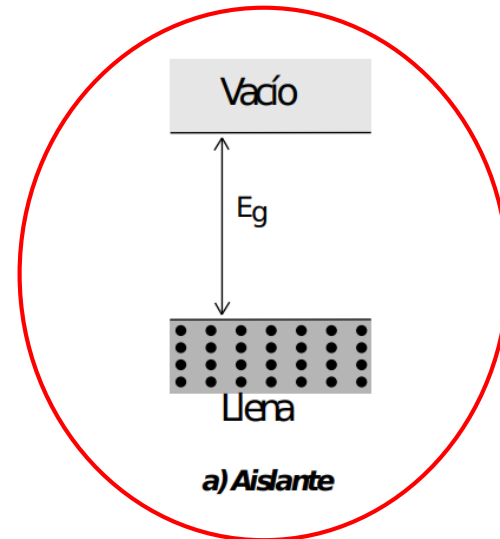
A $T=0$ K, la BV y BC están separadas por una amplia banda prohibida. Todos los niveles de BV están ocupados, la banda está llena y no contribuye a la conducción, y la BC está vacía. *En el aislante ideal la intensidad de corriente es nula para cualquier tensión aplicada.*



c) Metal



b) Semiconductor



a) Aislante

Estructura de los sólidos

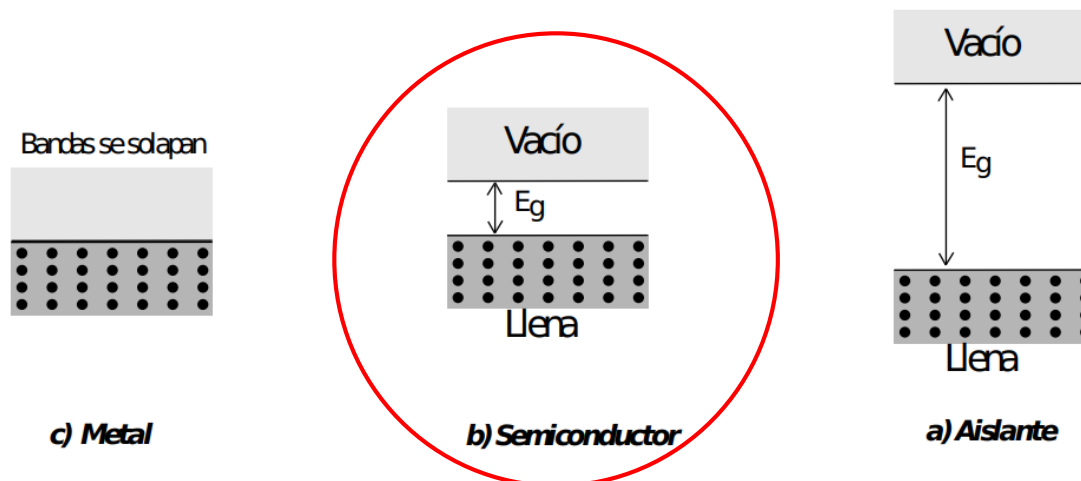
Semiconductor

A $T=0$ K tiene estructura parecida al aislante.

- La diferencia de entre semiconductores y aislantes es el tamaño, E_g de la banda prohibida que es mucho menor.

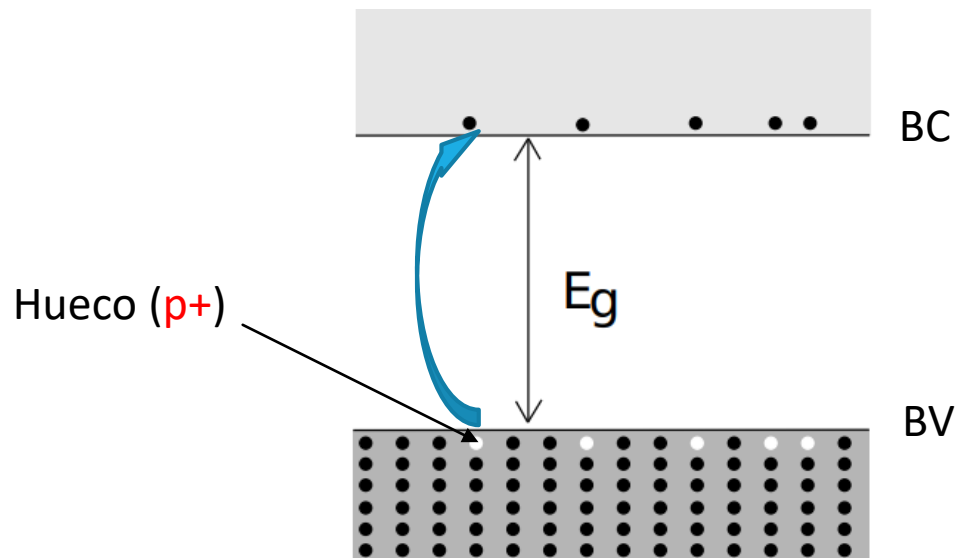
- Esto permite el paso de e^- de la BV a la BC mediante excitación térmica u óptica.

- A $T=0$ K la BV está completa y la BC vacía, \rightarrow se comporta como un aislante, pero al ser pequeña la anchura de la banda prohibida, al aumentar la temperatura cada vez más e^- adquieren la energía suficiente para superarla y el material aumenta su conductividad.



Semiconductores

- El paso de un e^- a la BC produce un **hueco** en la BV, al que se considera como un portador de carga positiva que contribuye a la conducción.



Ojo!
hueco \neq protón

El concepto de hueco como partícula cargada es un artificio que permite describir de forma sencilla el complejo movimiento de los e^- de valencia en una capa incompleta.

Semiconductores **intrínsecos**

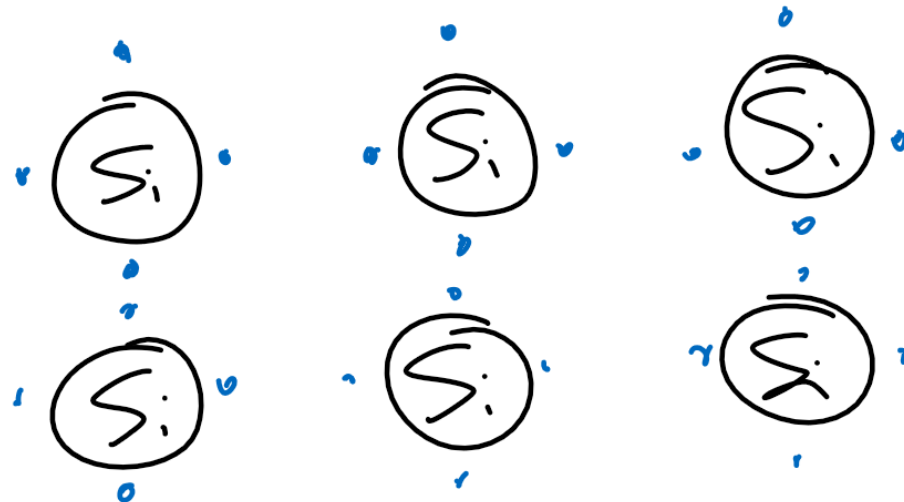
Semiconductores puros: Silicio o Germanio.

Su estructura cristalina **no contiene impurezas** = semiconductor **intrínseco**

Los **semiconductores puros intrínsecos** son relativamente poco interesantes:

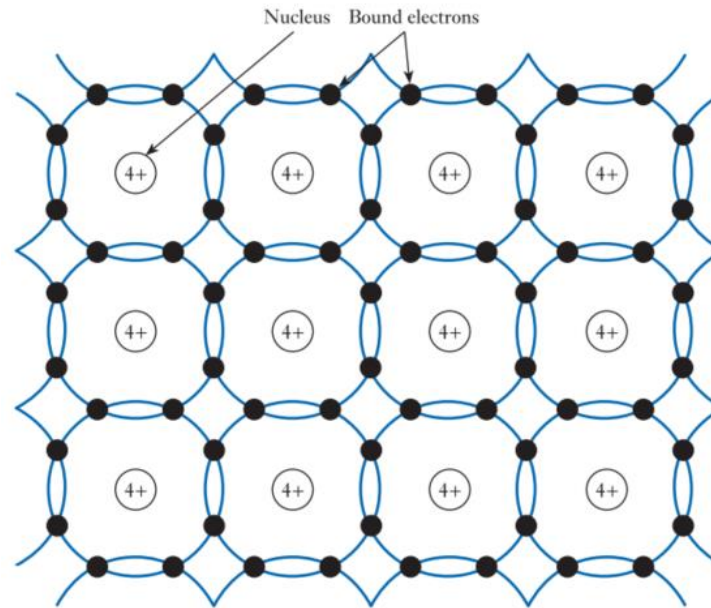
- De un elemento: Silicio, Germanio, Carbón
- Compuestos: Arseniuro de Galio, Fosfuro de Indio

- Tiene 4 electrones de valencia



Semiconductores **intrínsecos**

- En la estructura cristalina del silicio puro, cada átomo comparte sus 4 electrones de valencia con sus 4 átomos vecinos.

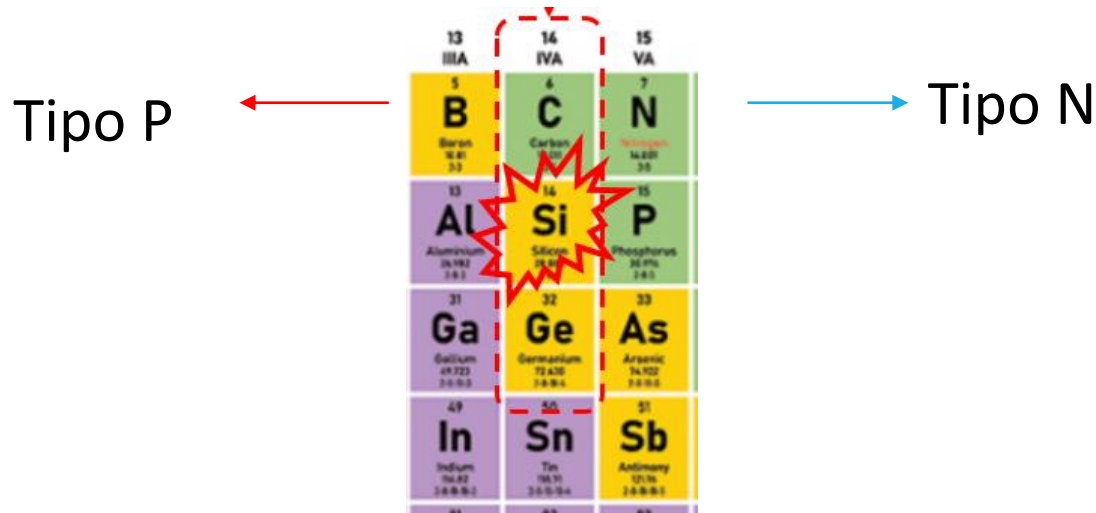


Estructura atómica del Silicio

- Es una configuración muy estable, que también se encuentra en materiales como el diamante.
- A este tipo de enlace atómico se le llama **enlace covalente**.

Semiconductores extrínsecos = Semiconductores dopados

- El número de portadores de carga presentes en **Silicio puro** es muy bajo y consecuentemente es un **mal conductor**.
- La **adición de una pequeña cantidad de impurezas** en el semiconductor afecta dramáticamente a sus propiedades conductoras. Este proceso se conoce como **dopado**.



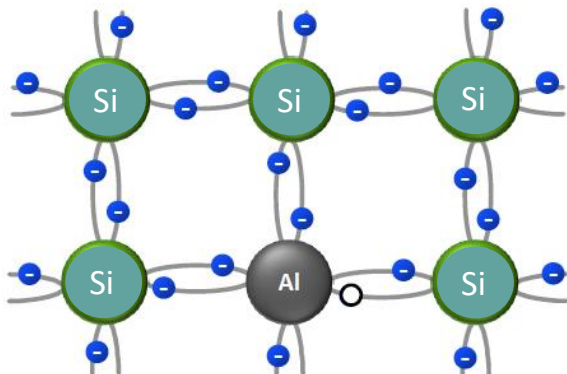
Semiconductores extrínsecos = Semiconductores dopados

Columna IV tabla periódica de los elementos: Semiconductores (4 e-)

13 IIIA	14 IVA	15 VA
5 B Boron 1081 10.81	6 C Carbon 1201 12.01	7 N Nitrogen 1401 14.01
13 Al Aluminum 2698 26.98	14 Si Silicon 2808 28.08	15 P Phosphorus 3097 30.97
31 Ga Gallium 6972 69.72	32 Ge Germanium 7264 72.64	33 As Arsenic 7492 74.92
49 In Indium 1148 114.8	50 Sn Tin 1187 118.7	51 Sb Antimony 1218 121.8

Tipo P
(3e-)

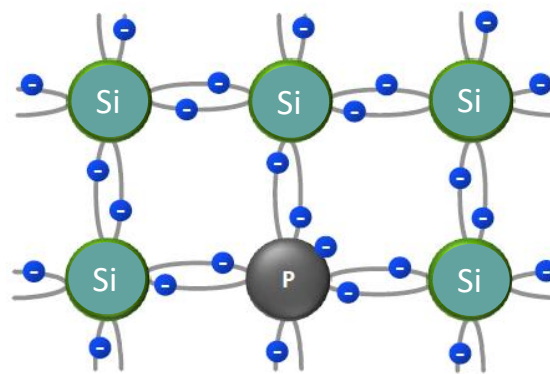
Columna III tabla periódica
Aceptores: Aluminio (Al)



Exceso de huecos = Carga positiva (p) = +

Tipo N
(5 e-)

Columna V tabla periódica
Donadores: Fósforo (P)

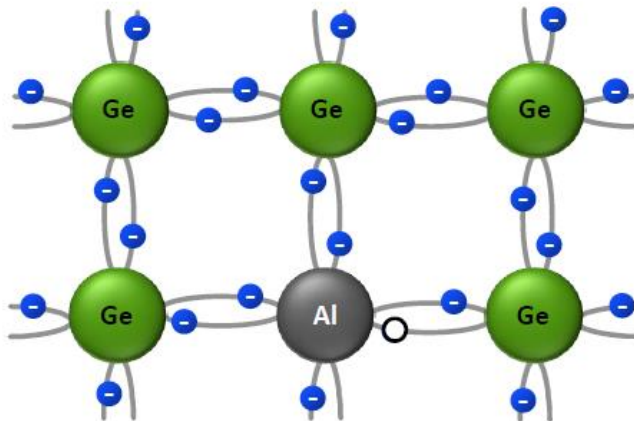


Exceso de electrones = carga negativa (n) = -

Semiconductores extrínsecos

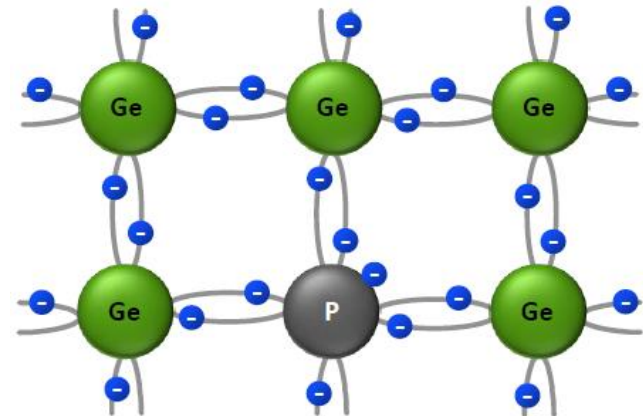
Tipo p

Impurezas Aceptoras: Se aumenta la concentración de huecos. Elementos Columna III tabla periódica: **B, Ga, In, Al**



Tipo n

Impurezas donadoras: se aumenta la concentración de electrones. Elementos Columna V tabla periódica: **P, As, Sb**



El diodo de unión pn

Tabla periódica

3 e⁻ en la BV

4 e⁻ en la BV

5 e⁻ en la BV

Grupo III	Grupo IV	Grupo V
B	Si	P (fósforo)
Al	Ge	As (arsénico)
Ga		Bs (antimonio)
In		

Dopantes tipo p

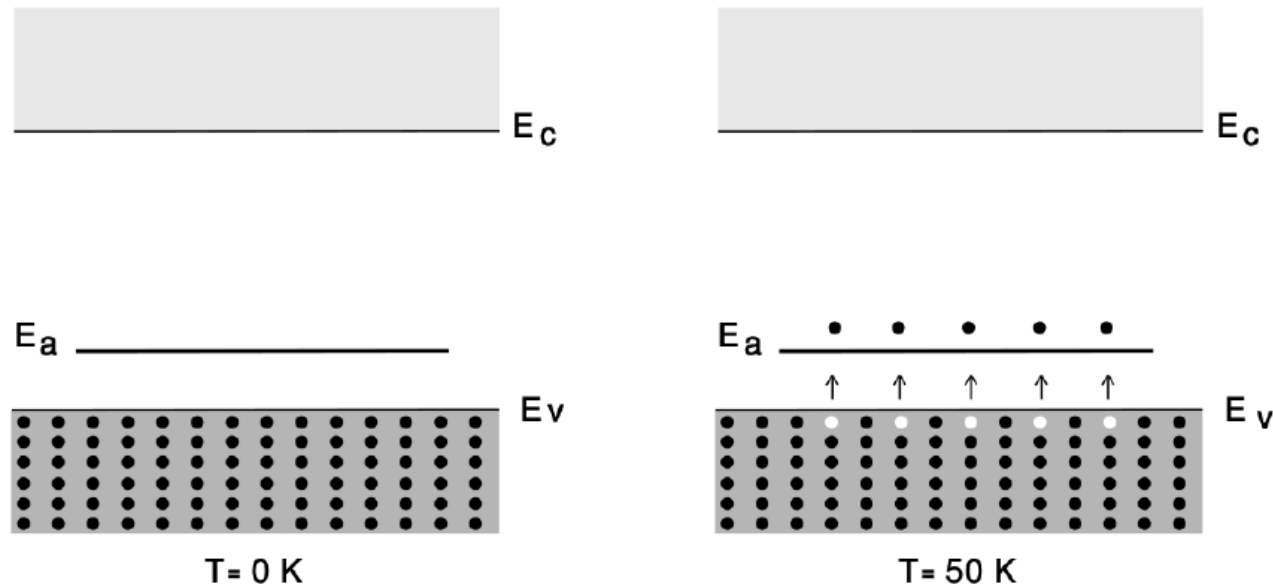
Impurezas aceptoras

Dopantes tipo n

Impurezas donadoras

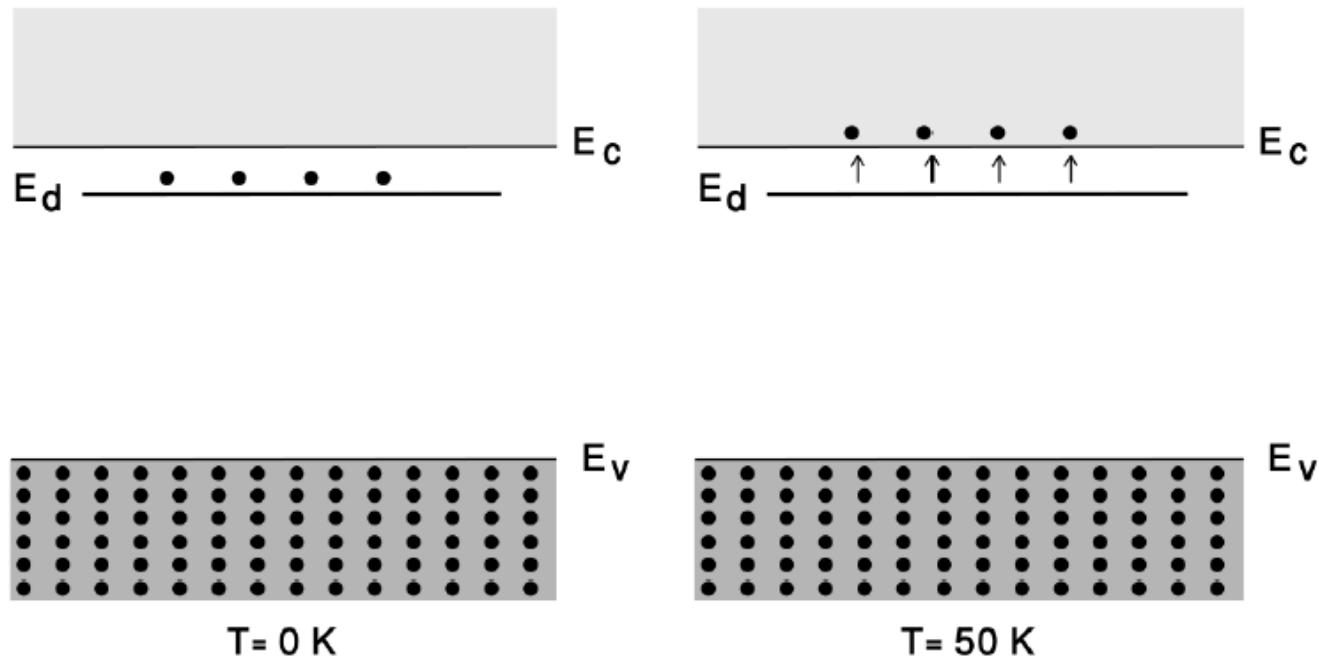
Semiconductor extrínseco tipo p

- A modo resumen, la impureza aceptora introduce un nuevo nivel de energía E_a muy cerca de la BV.
- Este nivel está vacío, con todos esos enlaces que no se han formado. En cuanto existe una mínima agitación térmica, los e^- de la BV saltan a la nueva banda de energía formando huecos en la BV. Estos huecos son ocupados por otros electrones de la propia banda formando una circulación aparente de huecos.
- La concentración de huecos es muy superior a la de electrones $p \gg n$.



Semiconductor extrínseco tipo n

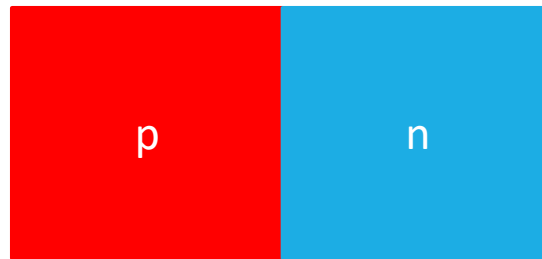
- A modo resumen, la impureza donadora introduce un nuevo nivel de energía E_d muy cerca de la BC.
- Este nivel está lleno de e^- a 0°K y con poca energía térmica los e^- pasan a la BC ($50^\circ\text{K} - 100^\circ\text{K}$).
- La concentración de electrones n es muy superior a la de huecos $p \rightarrow n \gg p$.



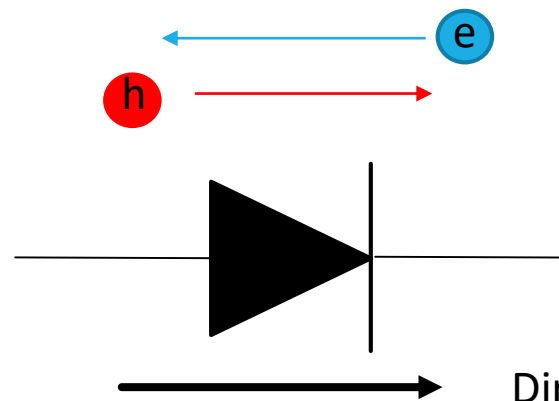
El diodo de unión pn

El **semiconductor éxtrínseco tipo p o n** tiene la misma conductividad que una resistencia de carbón. **Por sí mismos no tienen mucha más utilidad.**

Pero no ocurre lo mismo cuando un fabricante dopa **una parte del silicio tipo p y la otra tipo n**. Esto es lo que se denomina: **Unión PN**



Semiconductor dopado tipo p | tipo n

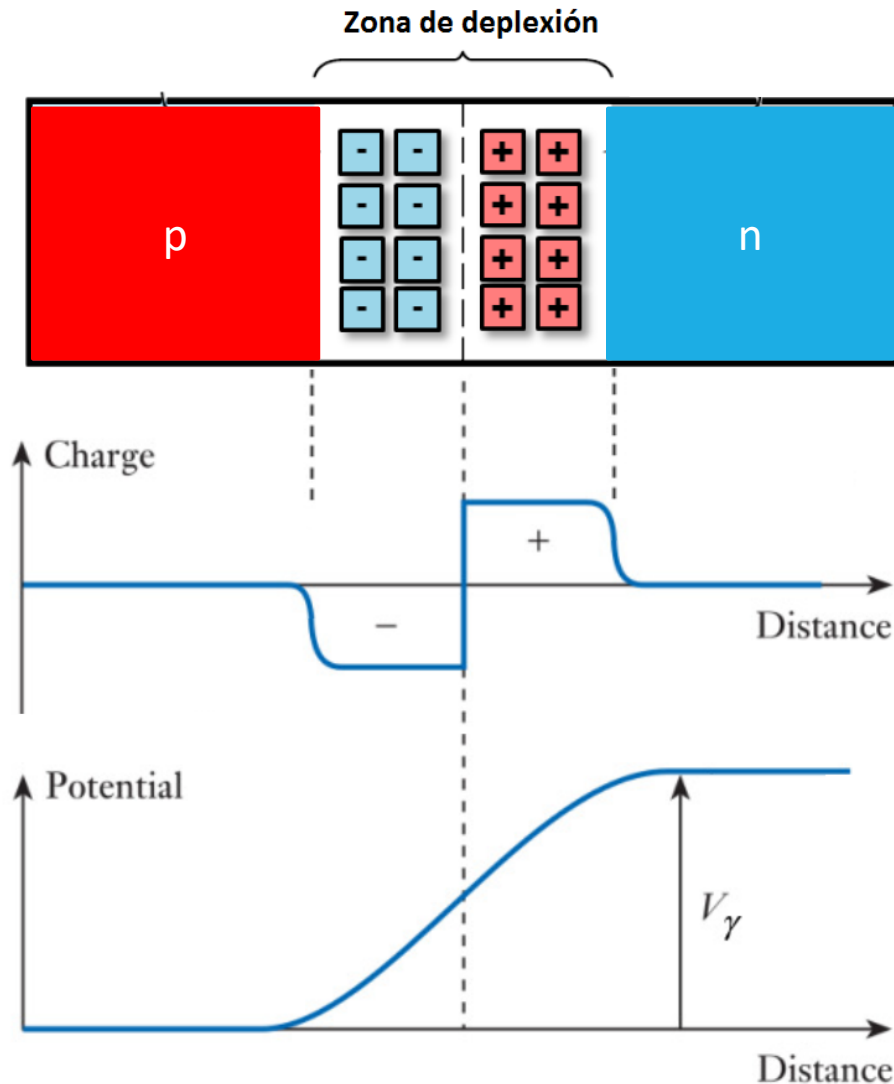


Diodo de unión:

Símbolo electrónico

La unión PN tiene unas propiedades tan particulares que ha propiciado la aparición de muchos inventos: diodo, transistor, circuitos integrados.

El diodo de unión pn. Zona de carga espacial o depleción



Se forma una **barrera de potencial** y evita que continúe la difusión de portadores mayoritarios.

➤ Barrera de potencial:

$V_\gamma \approx 0,7V$ (Diodos de Silicio)

$V_\gamma \approx 0,3V$ (Diodos de Germanio)

El diodo / Símbolo electrónico

Una resistencia es un dispositivo lineal: la curva IV es una línea recta

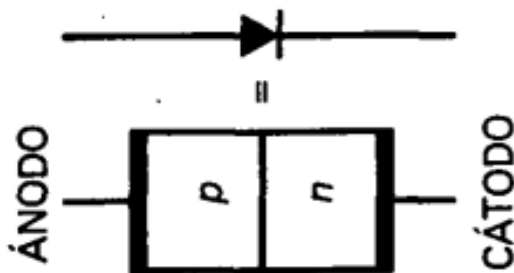
Una **diodo** es un dispositivo **no lineal**: la curva IV no es una línea recta.

La razón principal es la barrera de potencial entre sus extremos.

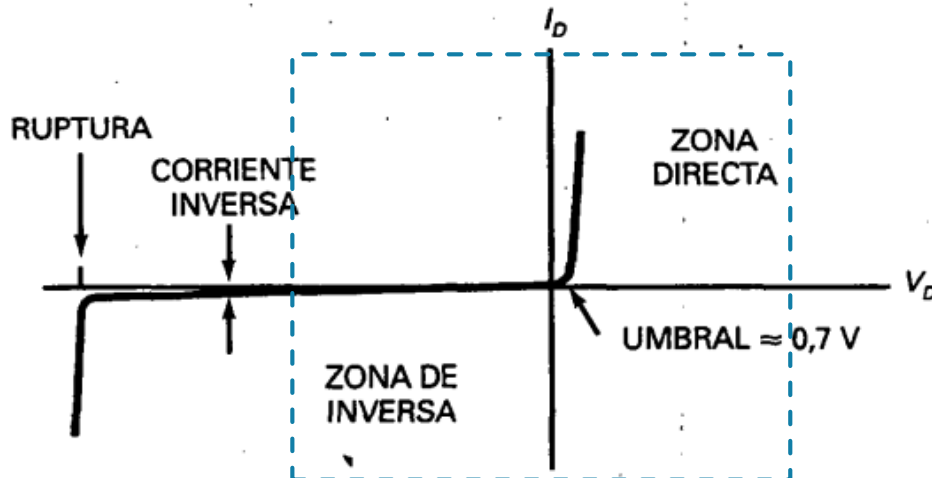
Si la tensión en el diodo es menor que la barrera de potencial (tensión umbral) la corriente del diodo es cero.

Si la tensión del diodo supera esta barrera, la corriente se incrementa rápidamente

Símbolo electrónico

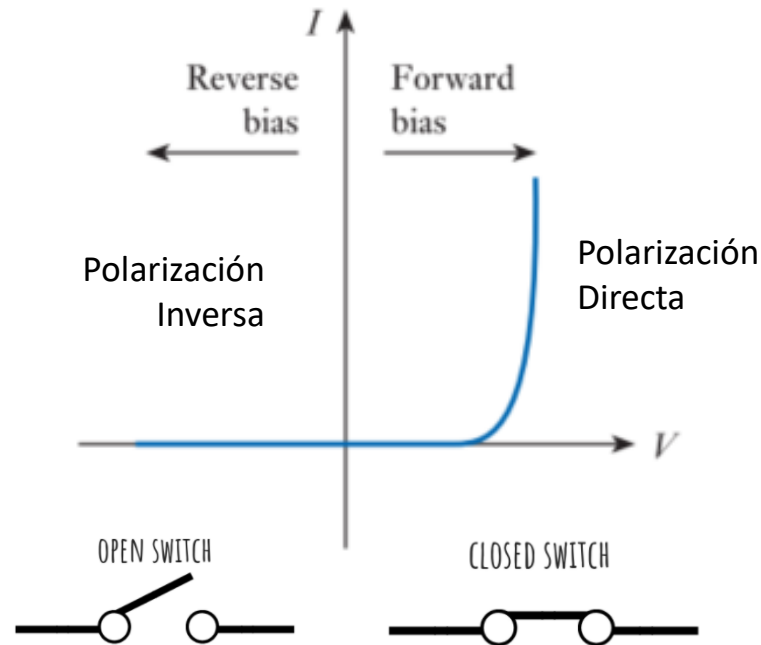


Curva característica I-V



El diodo de unión pn

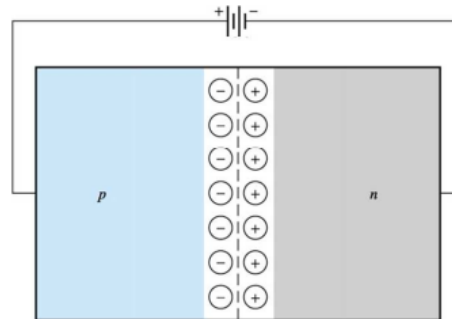
2 tipos de polarización: polarización directa / polarización inversa



El diodo de unión pn

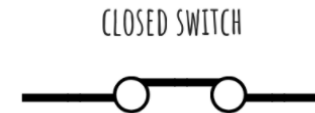
Unión PN. Polarización Directa

- ❑ Se estrecha la región de carga espacial
- ❑ Fluye una corriente elevada por la unión debido a portadores mayoritarios, compuesta por huecos y electrones



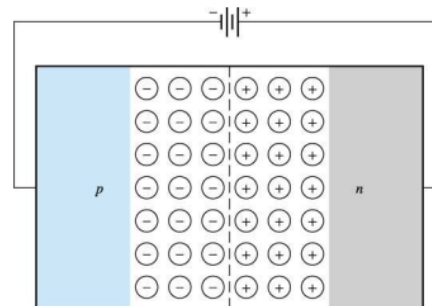
Polarización Directa

Positivo fuente con zona P (anodo)
Negativo fuente con zona N (catodo)



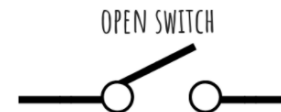
Unión PN. Polarización Inversa

- ❑ Aumenta la región de carga espacial
- ❑ Se impide el paso de portadores mayoritarios
- ❑ Se establece una pequeña corriente, del orden de nA, debido a portadores minoritarios $I_D = -I_S$



Polarización Inversa

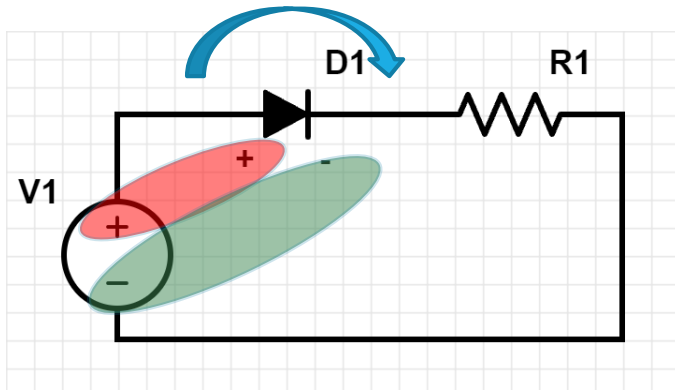
Positivo fuente con lado N
Negativo fuente con lado P



El diodo de unión pn

Polarización Directa

Diferencia tensión terminales diodo = 0.7 V (Si)



CLOSED SWITCH



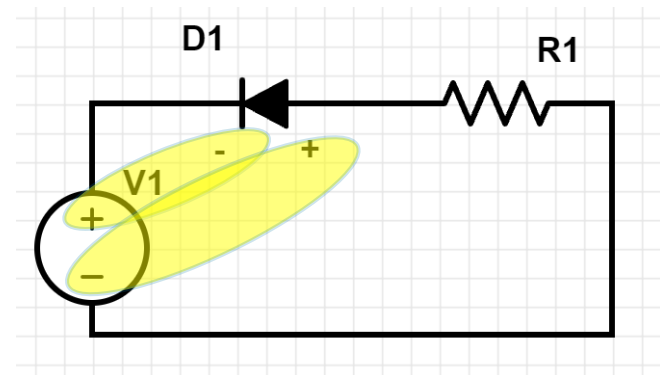
Voltage drop 0.7V
Caída de tensión de 0.7V

Short circuit /
Cortocircuito

$$I = \frac{V - 0.7}{R}$$

Polarización Inversa

Diferencia tensión terminales diodo = V1



OPEN SWITCH



Circuito Abierto / open circuit
 $I = 0$

El diodo / Curva característica

Ecuación de Shockley = corriente que circula por el diodo

$$I_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right]$$

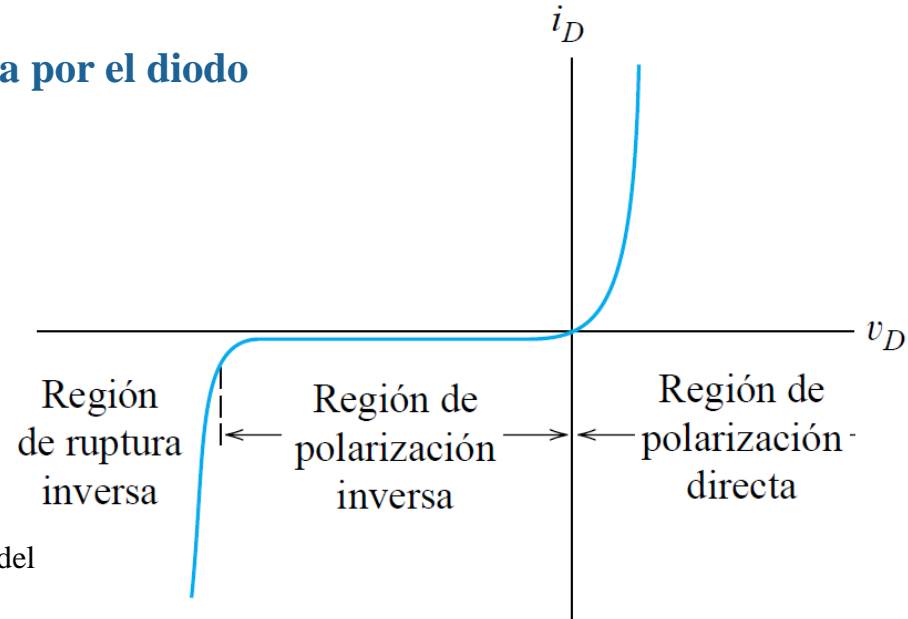
I_D : corriente que atraviesa el diodo.

I_S : corriente inversa de saturación ($\mu A/nA$).

V_D : tensión que cae en el diodo.

V_T : tensión térmica.

n : coeficiente de emisión. Depende del proceso de fabricación del diodo suele adoptar valores entre 1 (Ge; $n=1$) y 2 (Si; $n=2$).



$$V_T = \frac{kT}{q_e}$$

→

A 300°K:
 $V_T \approx 26mV$

k : es la constante de Boltzmann ($k \approx 1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
 T : la temperatura (en ° kelvin)
 q_e : la carga del electrón ($q_e \approx 1,6 \times 10^{-19}$ C)

2-11. RUPTURA

Los diodos admiten unos valores máximos en las tensiones que se les aplican. Por tanto, existe un límite para la tensión máxima en inversa con que se puede polarizar un diodo sin correr el riesgo de destruirlo.

Si se aumenta continuamente la tensión inversa, llegará un momento en que se alcance la tensión de ruptura del diodo. Para muchos diodos, la tensión de ruptura es normalmente mayor de 50 V. La tensión de ruptura se muestra en la hoja de características del diodo.

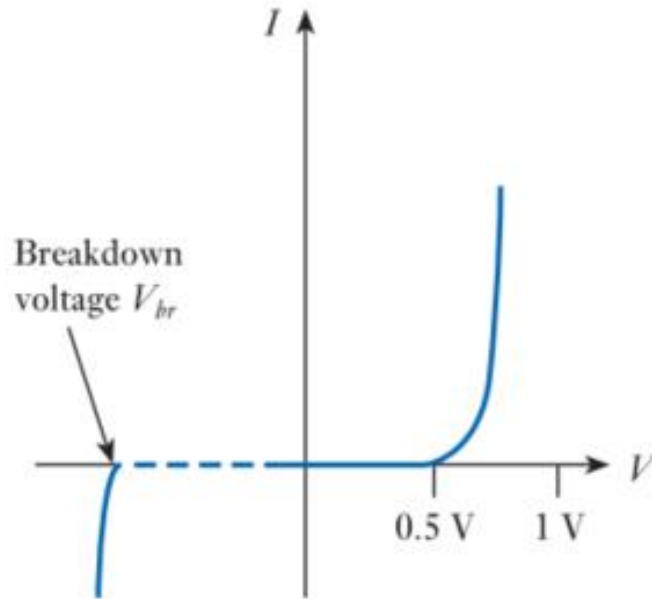
❑ Máxima corriente continua con polarización directa

Si la corriente en un diodo es demasiado grande, el calor excesivo destruirá el diodo; por esta razón, la hoja de características que proporcionan los fabricantes especifica la corriente máxima que un diodo puede soportar sin peligro de acortar su vida o degradar sus propiedades.

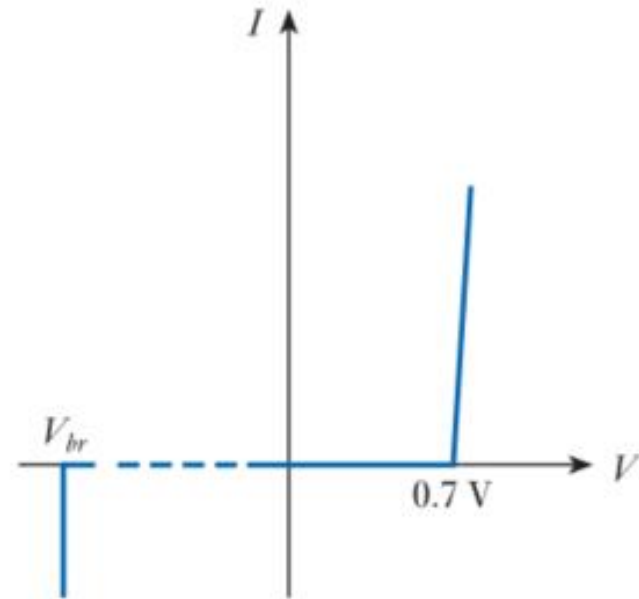
La **corriente máxima con polarización directa** es una de las limitaciones dadas en una hoja de características.

El diodo / Curva característica

SEMICONDUCTOR	CONDUCTION VOLTAGE / Tensión Umbral
SILICON	0.7 V (MOST USED)
GERMANIUM	0.25 V
GALLIUM ARSENIDE	1.4 V



(a) A silicon diode



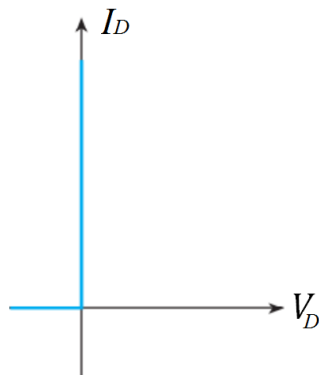
(b) Straight-line approximation to silicon diode characteristics

El diodo de unión pn. Modelos equivalentes

Modelos equivalentes: resolución de circuitos de forma sencilla

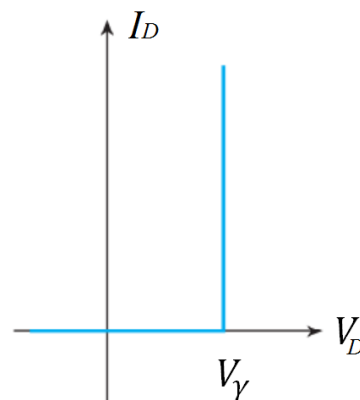
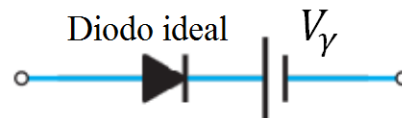
Aproximación ideal

i) Si las tensiones son mucho mayores que V_γ , se usa el **modelo de diodo ideal**.



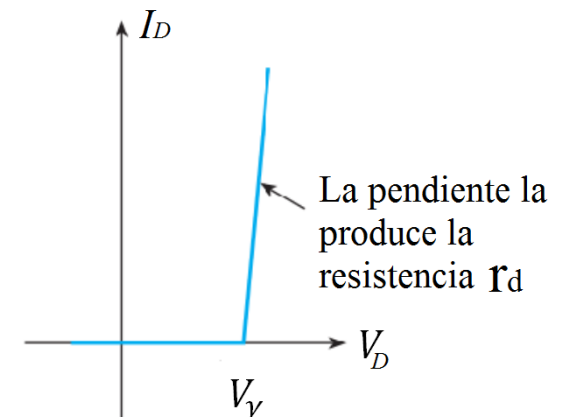
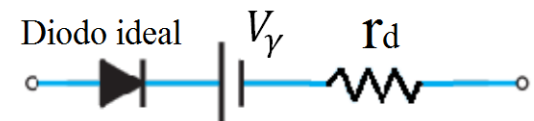
2ª aproximación

ii) Si las tensiones son comparables a V_γ , se usa el **modelo de diodo ideal + generador de tensión de valor V_γ**



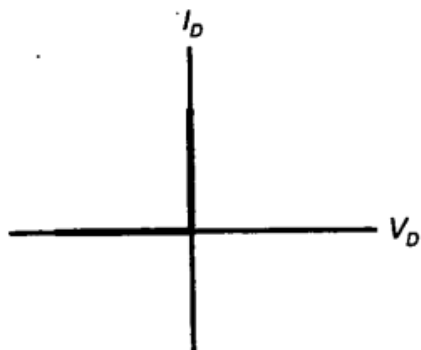
3ª aproximación

iii) Para cálculos precisos: **Modelo ideal + Generador V_γ + resistencia en serie r_D**

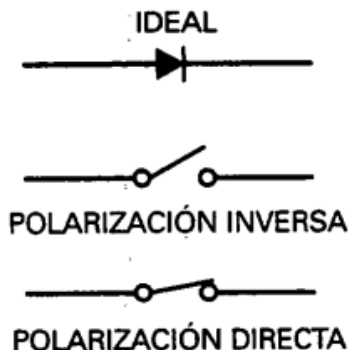


El diodo en circuitos electrónicos

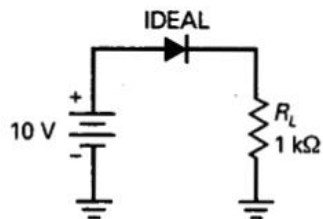
Aproximación Ideal o 1ª aproximación



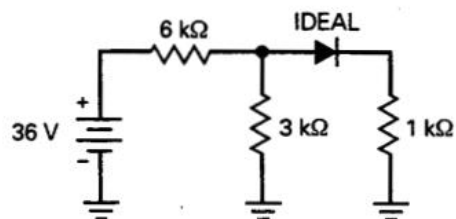
(a)



(b)



(a)



(b)

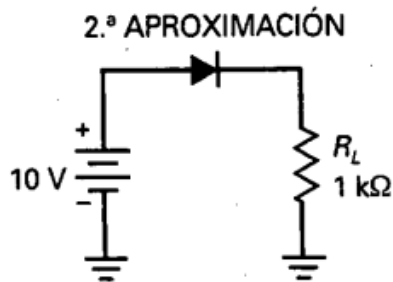
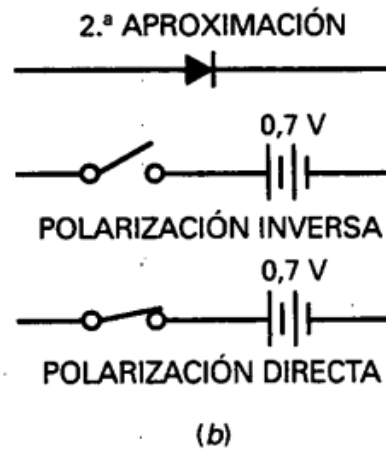
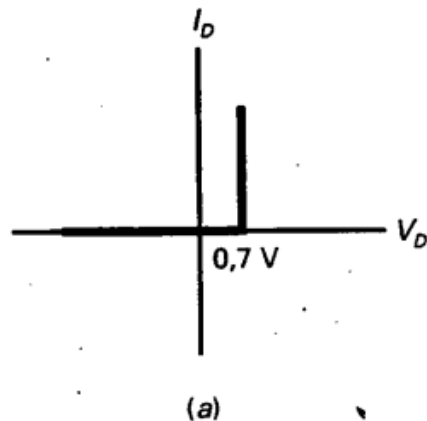
Resolución de los circuitos = calcular tensión en la carga V_L y corriente en la carga I_L

a) $V_L = 10 \text{ V}; I_L = 10 \text{ mA}$

b) $V_L = 4 \text{ V}; I_L = 4 \text{ mA}$

El diodo en circuitos electrónicos

2ª Aproximación



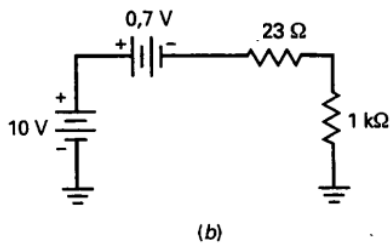
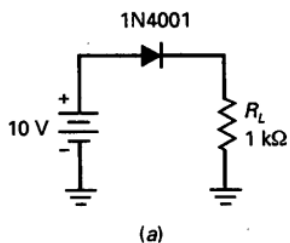
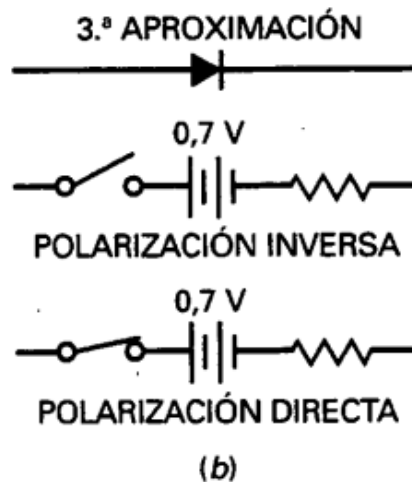
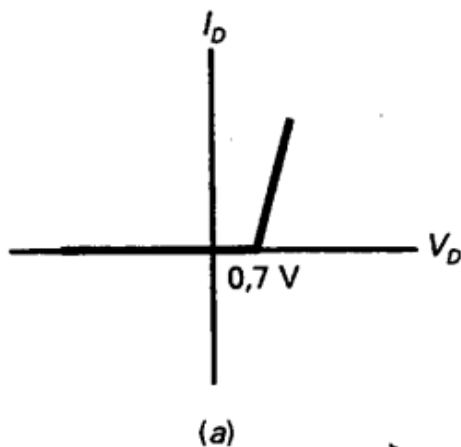
Resolución del circuito = calcular tensión en la carga V_L y corriente en la carga I_L

a) $V_L = 9,3 \text{ V}; I_L = 9.3 \text{ mA}$

Figura 3-8

El diodo en circuitos electrónicos

3ª Aproximación

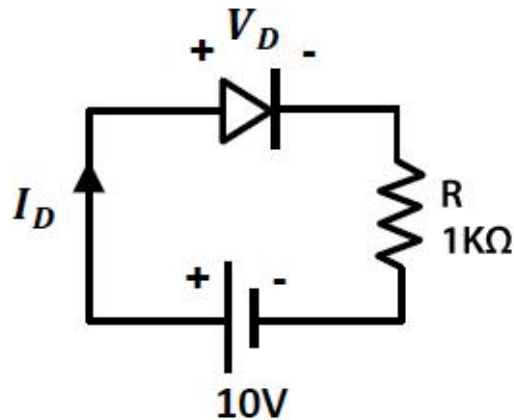


Calcular tensión en la carga V_L y corriente en la carga I_L
Resolución del circuito con resistencia interna = 23Ω .
a) $V_L = 9,09 \text{ V}$; $I_L = 9.09 \text{ mA}$

Figura 3-11

Ejemplo con diodo ideal

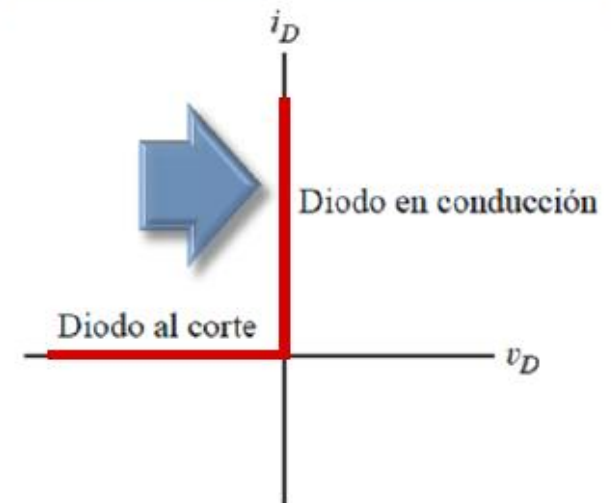
- Ahora que conocemos la **curva característica del diodo ideal**, vamos a ver como usarla para analizar circuitos sencillos y ver que coincide con lo visto antes.



$$V_D = 0 \text{ V}$$

$$V_R = 10 \text{ V}$$

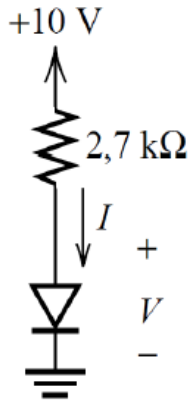
$$I_D = 10 \text{ mA}$$



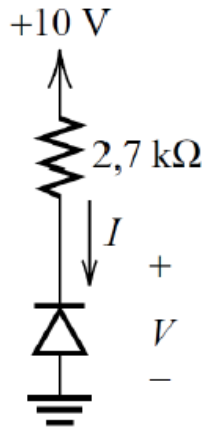
Vemos que el valor de la resistencia nos sirve para imponer el valor de la corriente que circula por el circuito, pues el diodo no ofrece ninguna imposición (deja pasar cualquier corriente que el resto del circuito solicite).

Diodo ideal en circuitos

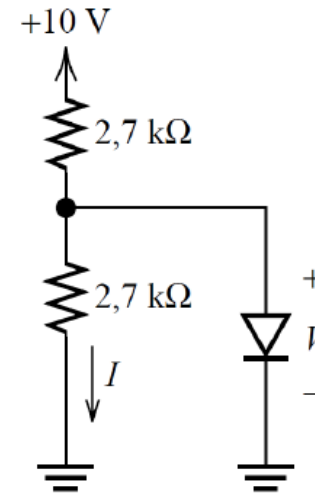
- **Ejercicio:** Suponiendo diodos ideales, hallar los valores de I y de V en los circuitos.



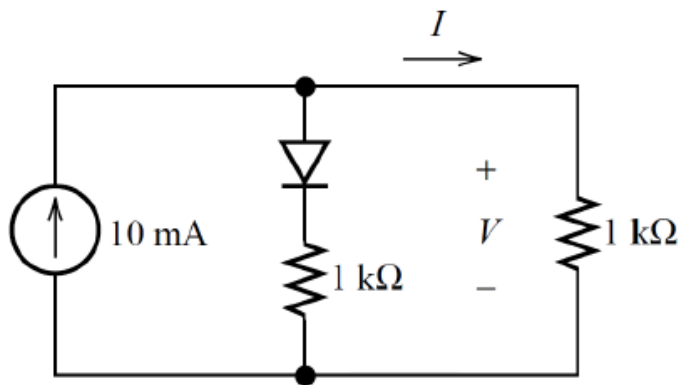
(a)



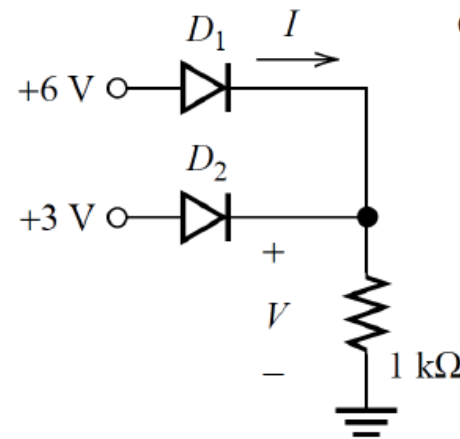
(b)



(c)



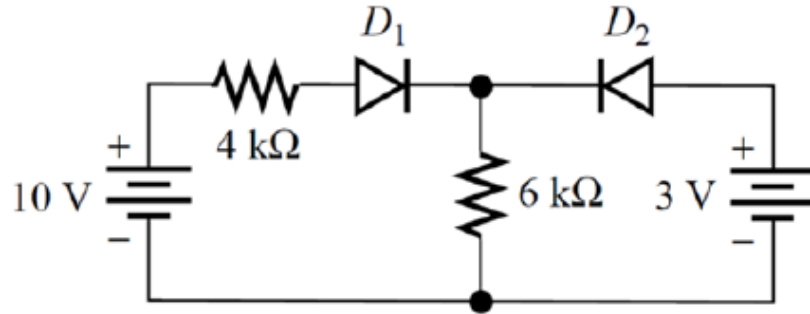
(d)



(e)

Ejemplo con diodo ideal

- **Ejemplo:** analizar el siguiente circuito usando el modelo del diodo ideal.

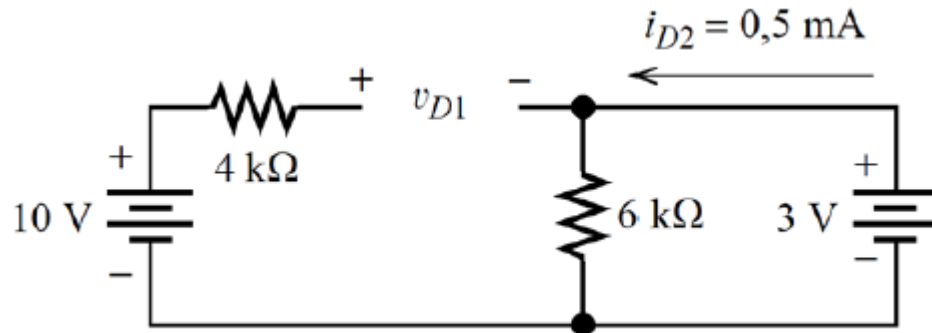


Para analizar circuitos con más de un diodo, unos pueden estar con conducción y otros en corte, pero a priori no sabemos nada. Así, el método en este caso es el siguiente:

1. Hacemos una suposición de cual está al corte y cual en conducción.
2. Sustituimos en el circuito cada diodo por su modelo equivalente (cortocircuito en caso de conducción y circuito abierto en caso de corte).
3. Analizamos el circuito y vemos si se cumple la suposición. Si hay alguna incoherencia es que no es correcta y debemos hacer otra suposición.

Ejemplo con diodo ideal

- Comenzamos suponiendo que **D1 está en corte y D2 conduce**:



- Al resolver obtenemos:

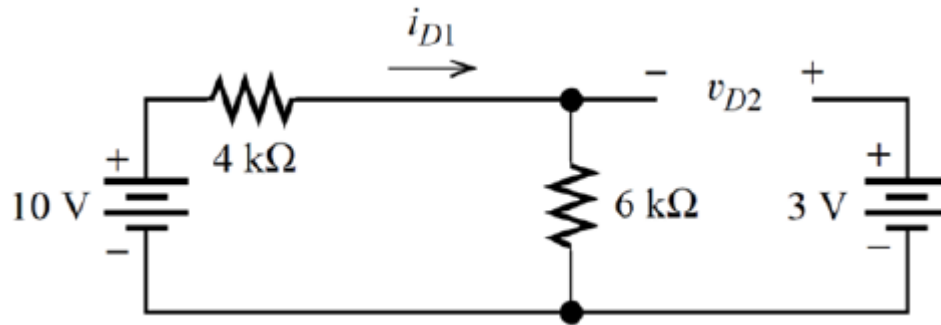
- $I_{D2} = 0,5 \text{ mA}$ (ok)
- $V_{D1} = 7 \text{ V}$ (conduce!)

- La corriente en D2 es positiva por lo la suposición de que D2 conduce parece ser correcta.
- Sin embargo, también tenemos que $V_{D1} = 7 \text{ V}$, lo que no es coherente, ya que debería caer una tensión negativa. Si fuera positiva entraría en conducción.
- Es por ello que tenemos que **cambiar la suposición**.

Hambley 2ª ed. Pag 144. ejemplo 3.3

Ejemplo con diodo ideal

- Ahora suponemos que **D1** está en conducción y **D2** en corte:



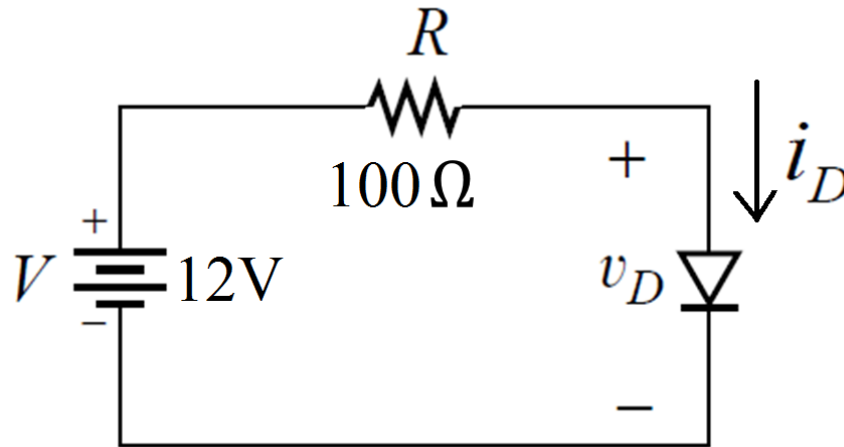
- Al resolver obtenemos:

- $I_{D1} = 1 \text{ mA}$
- $V_{D2} = -3 \text{ V}$

- Estos valores sí son coherentes con las presunciones que hemos hecho sobre los diodos y, por tanto, correctas.

El diodo en circuitos electrónicos

Ejemplo: Determine el voltaje y la corriente a través del diodo para cada uno de los modelos del diodo. Determine también el voltaje de caída en la resistencia (V_R). Suponga que $r_D = 10\Omega$ y $V_\gamma = 1V$.



Sol.:

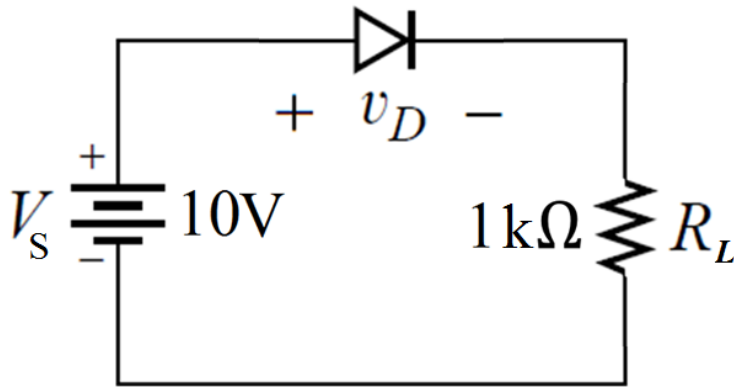
i) $I_D=0,12 A, V_R=12V;$

ii) $I_D=0,11 A, V_R=11 V;$

iii) $I_D=0,10 A, V_R=10V, V_D=2V (V_\gamma = 1V, V_{R_D} = 1V).$

El diodo en circuitos electrónicos

Ejemplo: Calcular la corriente, tensión y potencia en la resistencia de carga, la potencia en el diodo y la potencia total del circuito usando el modelo equivalente ii). Suponer diodo de Silicio con $V_\gamma = 0,7V$.



$$V_L = V_S - V_D$$

$$I = \frac{V_L}{R_L} = \frac{9,3}{1k} = 9,3mA$$

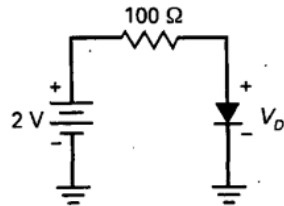
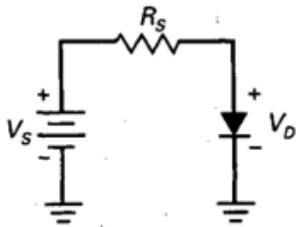
$$P_L = I \cdot V_L = 9,3mA \cdot 9,3V = 86,5mW$$

$$P_D = I \cdot V_D = 9,3mA \cdot 0,7V = 6,51mW$$

$$P_T = P_L + P_D = 86,5mW + 6,51mW \cong 93mW$$

Recta de Carga / Valores de corriente y tensión en el diodo

La recta de carga se utiliza para hallar el valor exacto de la corriente y la tensión del diodo. Las rectas de carga son especialmente útiles en el análisis de corriente y tensión de los transistores. Más adelante también utilizaremos la recta de carga para analizar el comportamiento de los transistores.



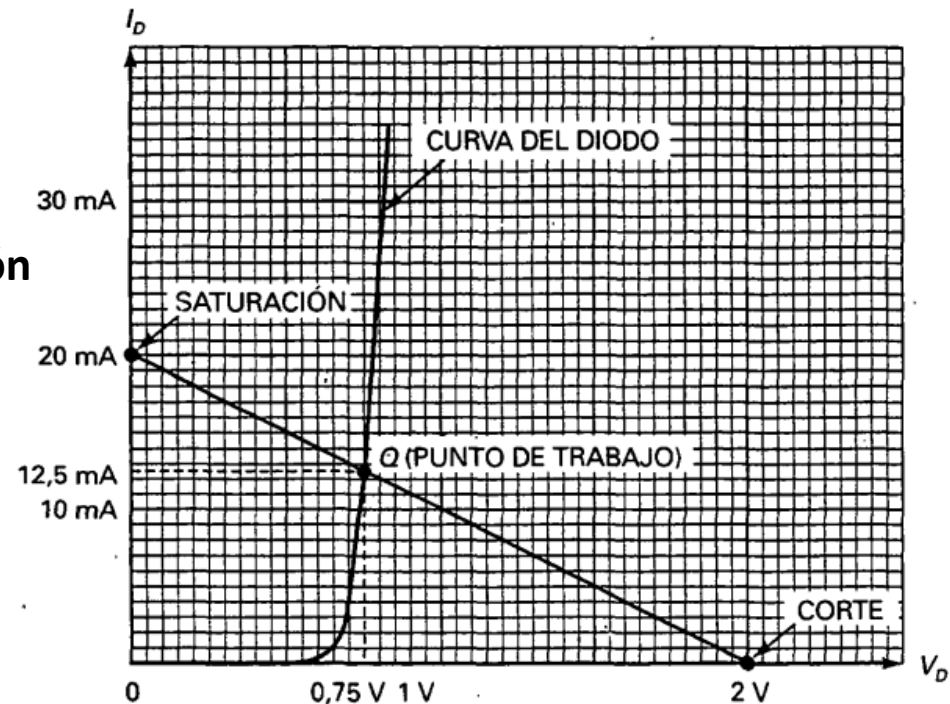
$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R_S}$$

- **Punto de saturación**

$$V_D = 0 \rightarrow I_D = 20 \text{ mA}$$

- **Punto de corte**

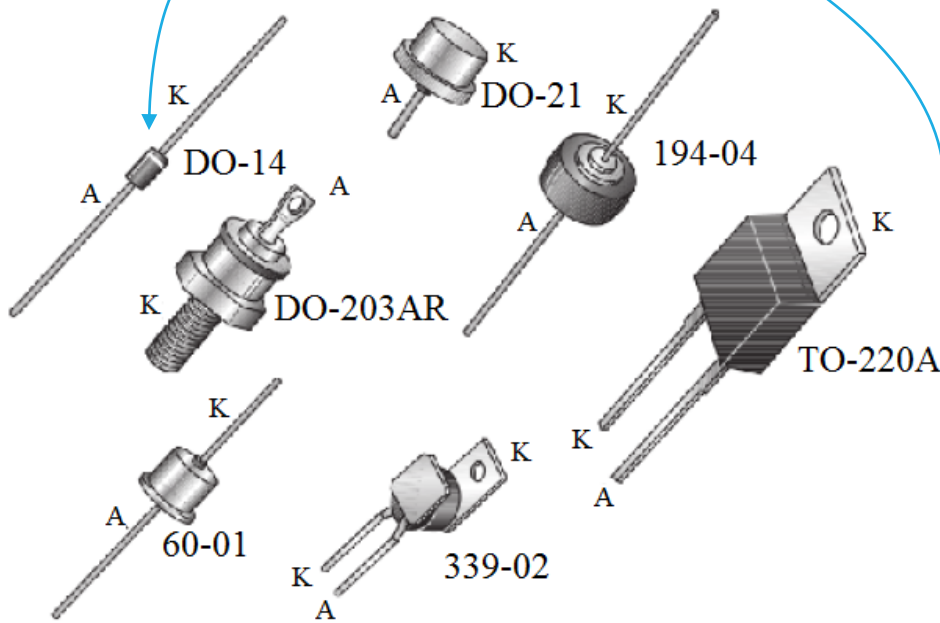
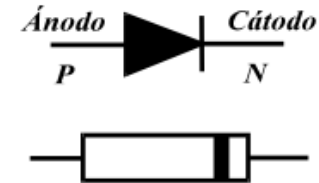
$$I_D = 0 \rightarrow V_D = 2 \text{ V}$$



El diodo de unión pn

Encapsulados típicos en diodos

- El **cátodo** (K) normalmente **se marca con una banda**, pestaña o algún otro elemento.



Encapsulados de diodos para montaje superficial



SOD-123



SOD-323



SOT-23



SMA/DO-214AC

El diodo de unión pn

Parámetros típicos en diodos

$I_{F(AV)}$ Intensidad media directa: Máxima cantidad de corriente (en valor medio) admisible



V_{RRM} Valor de tensión de ruptura en polarización inversa (varía según el modelo de diodo)

V_F caída de tensión en polarización directa (V_D)

I_R Corriente que circula en polarización inversa (I_S)

PRIMARY CHARACTERISTICS	
$I_{F(AV)}$	1.0 A
V_{RRM}	50 V to 1000 V
I_{FSM} (8.3 ms sine-wave)	30 A
I_{FSM} (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
V_F	1.1 V
I_R	5.0 μ A
T_J max.	150 °C

I_{FSM} Intensidad de pico repetitiva, tenemos dos valores según forma de onda



FEATURES

- Low forward voltage drop
- Low leakage current
- High forward surge capability
- Solder dip 275 °C max. 10 s, per JESD 22-B106
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



RoHS
COMPLIANT

TYPICAL APPLICATIONS

For use in general purpose rectification of power supplies, inverters, converters and freewheeling diodes application.

Note

- These devices are not AEC-Q101 qualified.

MECHANICAL DATA

Case: DO-204AL, molded epoxy body
Molding compound meets UL 94 V-0 flammability rating
Base P/N-E3 - RoHS compliant, commercial grade

Terminals: Matte tin plated leads, solderable per J-STD-002 and JESD 22-B102

E3 suffix meets JESD 201 class 1A whisker test

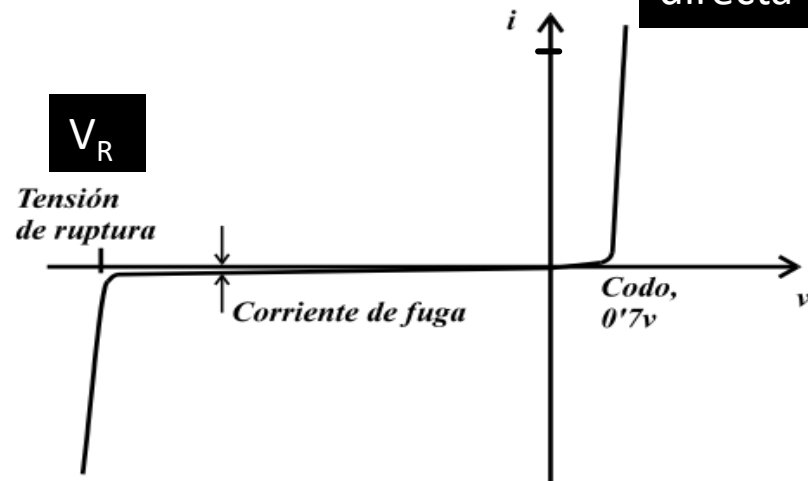
Polarity: Color band denotes cathode end

El diodo de unión pn (Datasheet)

Parámetros típicos Diodos:



Más importantes



PRIMARY CHARACTERISTICS	
$I_{F(AV)}$	1.0 A
V_{RRM}	50 V to 1000 V
I_{FSM} (8.3 ms sine-wave)	30 A
I_{FSM} (square wave $t_p = 1$ ms)	45 A
V_F	1.1 V
I_R	5.0 μ A
T_J max.	150 °C

maximum forward current I_F
reverse breakdown voltage V_R

Tema 2. DIODOS

Parte B



Curso 2023-2024

Electrónica 2º curso
Grado de Ingeniería Aeroespacial



Tema 2 . DIODOS.

Parte A. Semiconductores y Diodos (Unión PN)

Parte B. Circuitos de aplicación con Diodos (Conversión AC/DC)
y diodos de propósito especial

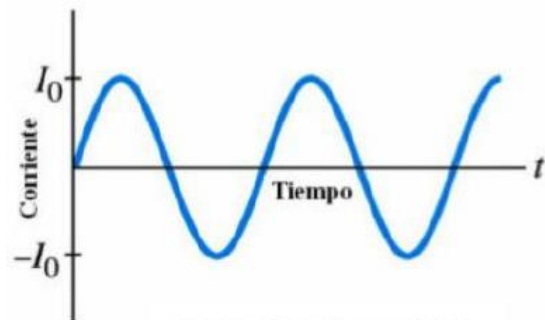
Índice

Parte B. Circuitos de aplicación con Diodos (Conversión AC/DC) y diodos de propósito especial

- Rectificación y regulación: conversión AC/DC
- Rectificador de media onda + filtro
- Rectificador de onda completa + filtro
 - Con toma central del transformador
 - Con puente de diodos
- Diodo Zener
- Circuitos reguladores de tensión
- Diodo Schottky
- Otros diodos - optoelectrónica: Led, Láser, fotodiodo, optoacoplador

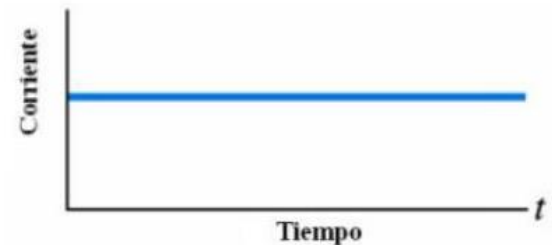
Conversión AC/DC

- La alimentación de prácticamente todos los equipos electrónicos es mediante una fuente DC (Direct current, corriente continua o CC)
- Este voltaje puede provenir de una batería o de la red eléctrica AC (Alternating current, corriente alterna o CA).
- Si procede de la red eléctrica, necesitamos un conversor AC/DC entre el enchufe y el equipo.



Corriente alterna (AC)

Varia con el tiempo en forma sinusoidal tanto el voltaje como la corriente

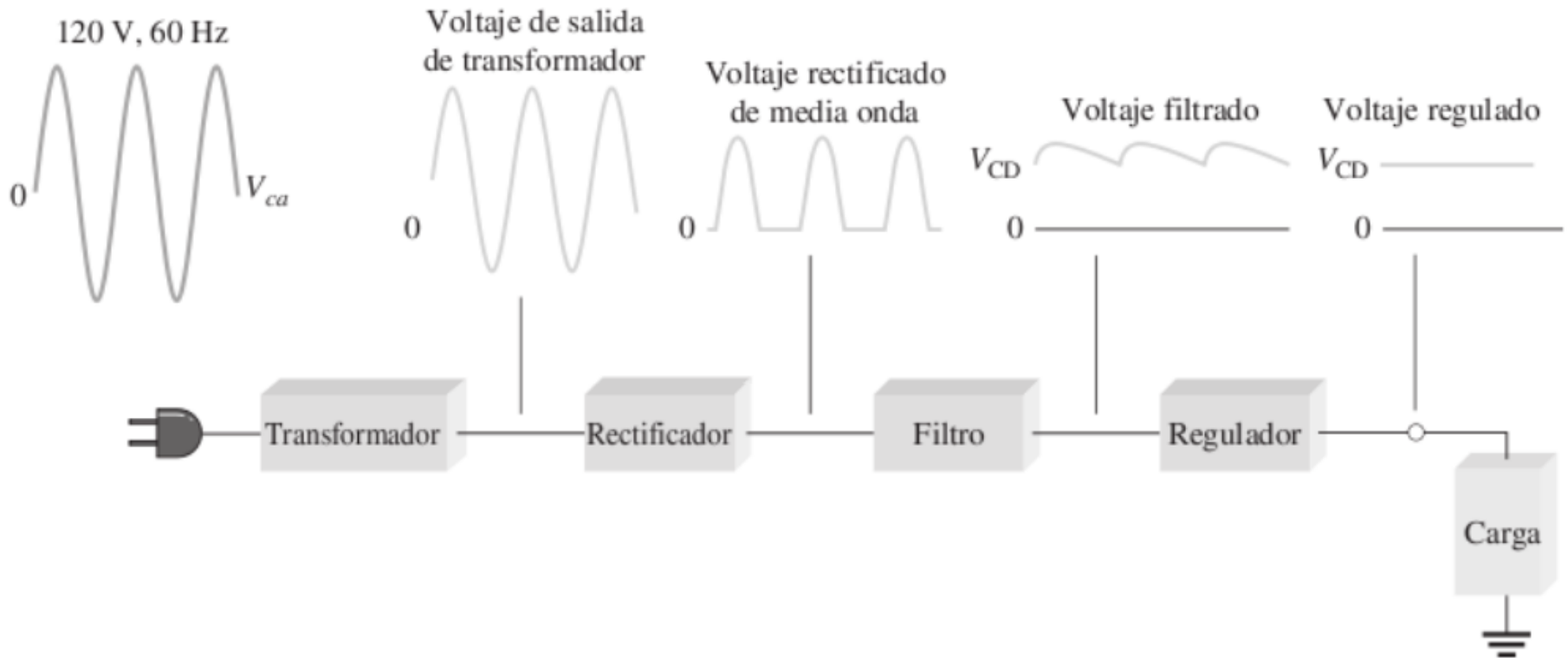


Corriente continua (DC)

No varía con el tiempo

Conversión AC/DC

- La **rectificación** y la **regulación** conforman dos de los bloques fundamentales de un conversor AC/DC, los cuales **convierten voltaje de AC** (corriente alterna) a **DC** (corriente continua).



Conversión AC/DC

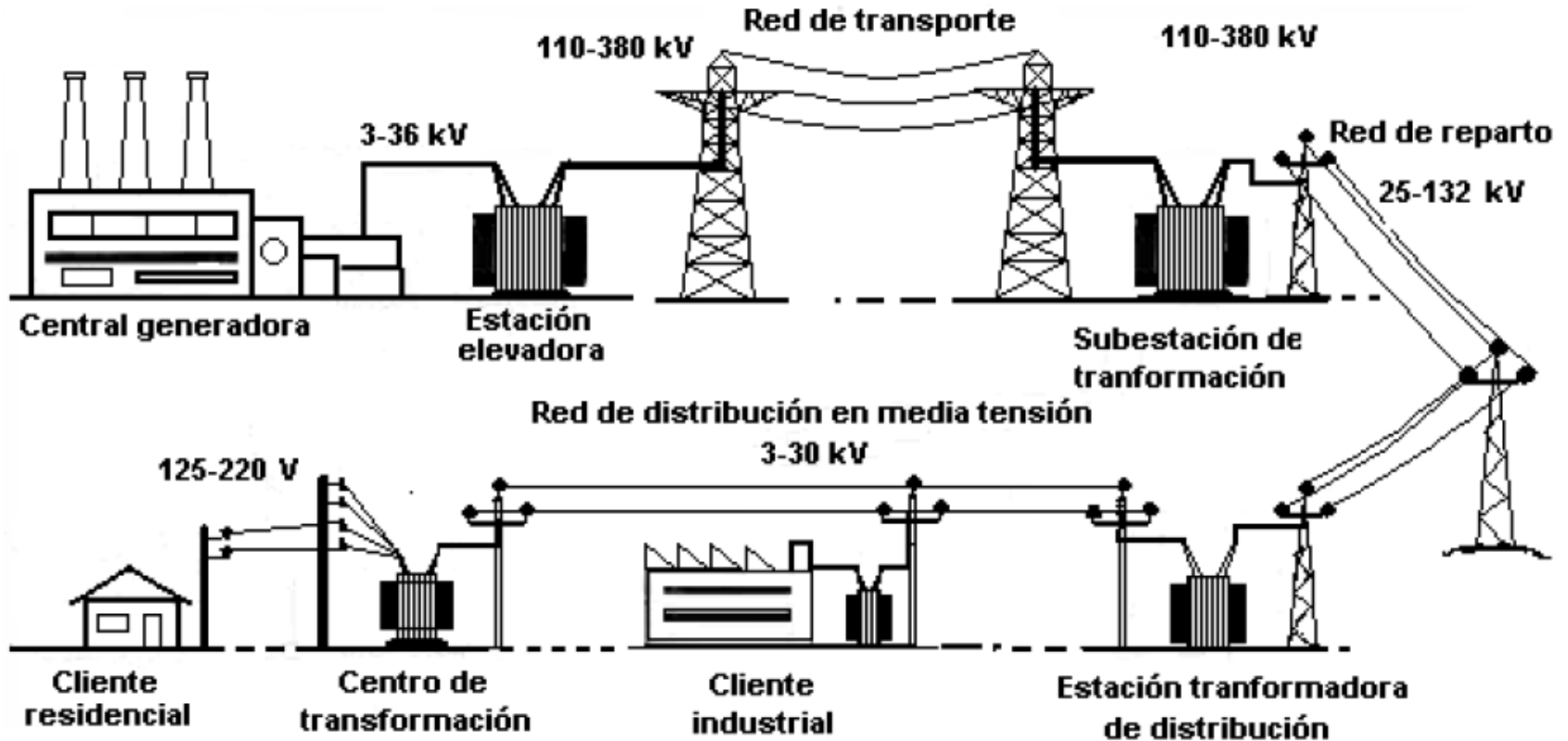
□ Entonces ¿Por qué se transmite en AC?

- Es necesario transportar la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas a los largo de grandes distancias.
- Para ello, es necesario **minimizar** las pérdidas eléctricas debidas a la disipación de calor (efecto Joule) en la línea. Estas son **directamente proporcionales** a la resistencia del conductor y al **cuadrado de la corriente que lo atraviesa**.
- Por tanto, **si se transmite una corriente eléctrica menor habrá menores pérdidas**.
- Dado que la energía eléctrica transmitidas es $\left. \begin{array}{l} E = P \cdot t \\ P = V \cdot I \end{array} \right\} \Rightarrow E = V \cdot I \cdot t$
- Podemos transmitir la misma cantidad de energía haciendo cambios en tensión y corriente manteniendo el producto $V \cdot I$

- Tensión doméstica: 220V
- Baja tensión: menos de 1.000V
- Media tensión: hasta 30.000V
- Alta tensión: hasta 66.000V

Conversión AC/DC

□ Entonces ¿Por qué se transmite en AC?

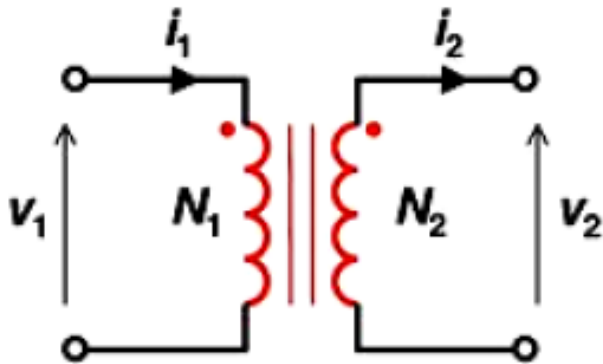


- ❖ Necesidad de aumentar y disminuir la tensión varias veces desde la central al enchufe de casa.

Conversión AC/DC

□ Entonces ¿Por qué se transmite en AC?

- La elevación de tensión en DC no es simple: se logra conectando dínamos en serie.
- Sin embargo, en AC se cuenta con un dispositivo sencillo y eficiente: **el transformador**:

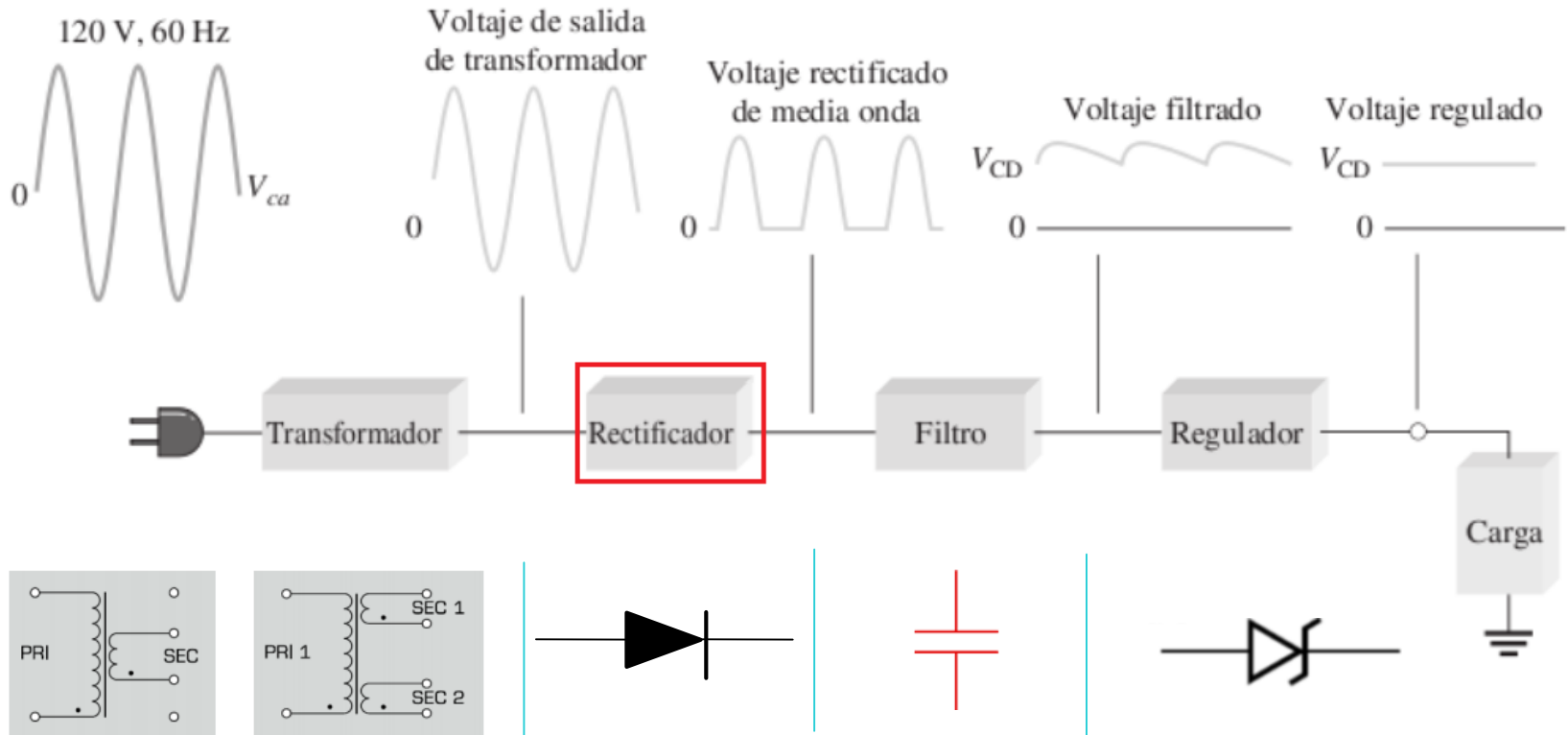


$$V_2 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) V_1$$

Un transformador es un dispositivo electromagnético que permite **aumentar o disminuir** el voltaje y la intensidad de una **corriente alterna** de forma tal que su producto permanezca constante (es decir, manteniendo la potencia).

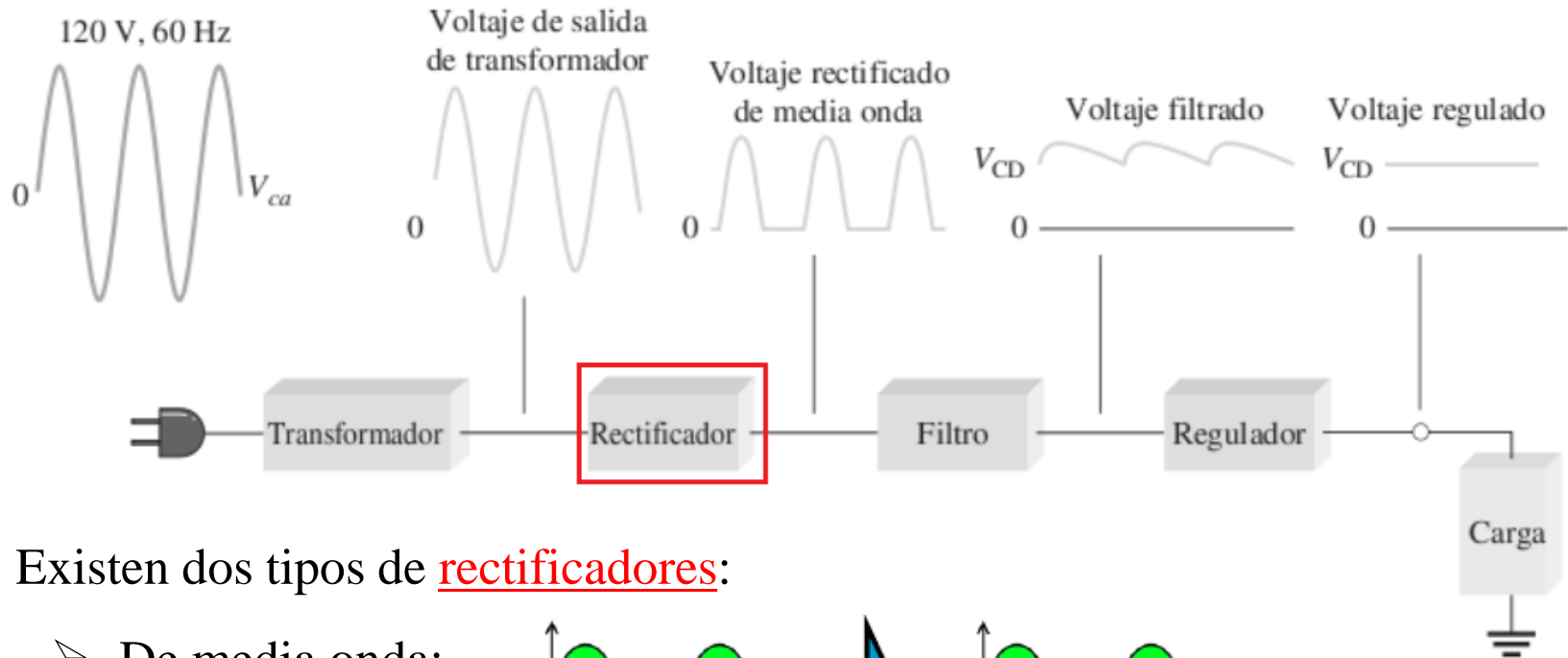
Conversión AC/DC

AC-DC (Alternating Current to Direct Current)



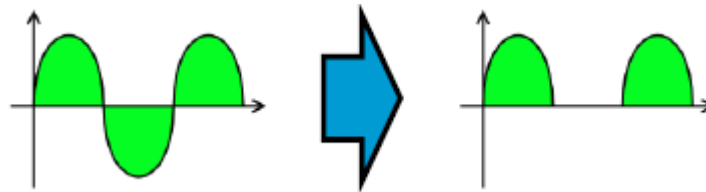
pc, portatil,
teléfono, etc

Rectificador



□ Existen dos tipos de rectificadores:

➤ De media onda:



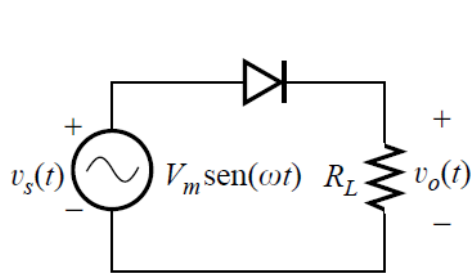
➤ De onda completa:



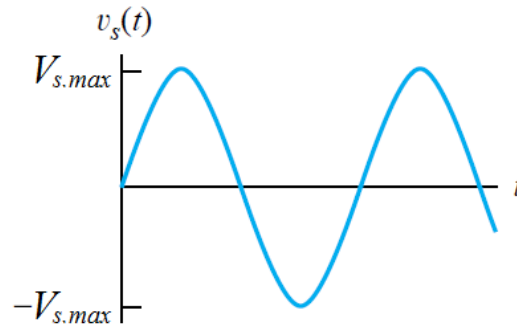
pc, portatil,
teléfono, etc

Rectificador de media onda

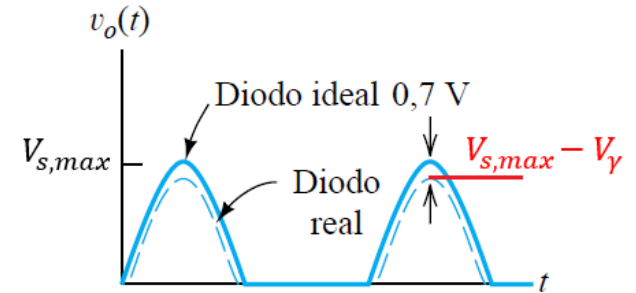
Compuesto básicamente por un **diodo común** en serie con la resistencia de carga.



(a) Diagrama del circuito



(b) Tensión de la fuente en función del tiempo



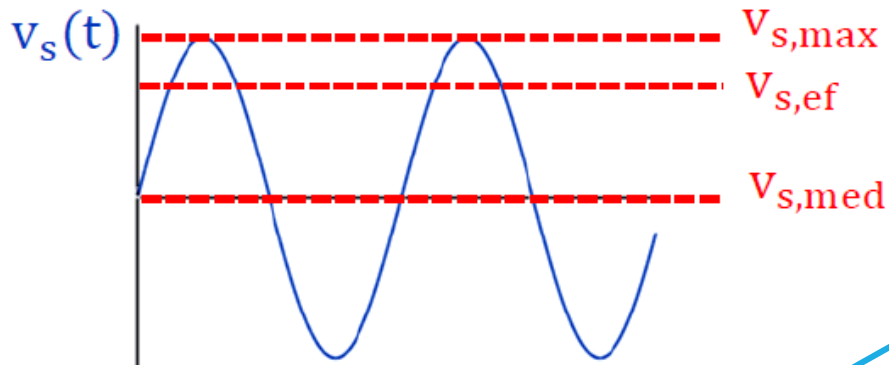
(c) Tensión de la carga en función del tiempo

Sólo llegan a la resistencia los semi-ciclos positivos de la fuente, ya que el diodo conduce en los positivos y entra en corte en los negativos.

- Si $v_s < 0 \rightarrow$ diodo polarizado en inverso (cto. abierto, $i = 0$).
- Si $v_s > 0 \rightarrow$ diodo polarizado en directa.

Rectificador de media onda

Parámetros de la tensión de entrada V_s de una señal en alterna.



- Voltaje de la fuente:

$$v_s(t) = v_{s,max} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

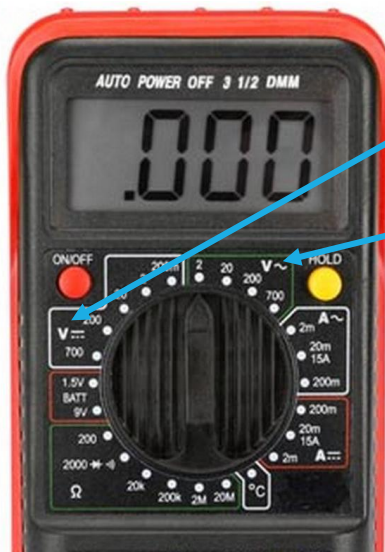
- Valor promedio de V_s :

$$v_{s,med} = \frac{1}{T} \int_0^{T_0} v_o(t) dt = 0$$

- Valor eficaz o rms de V_s :

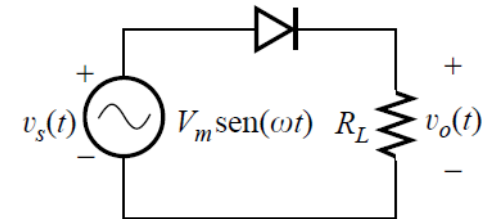
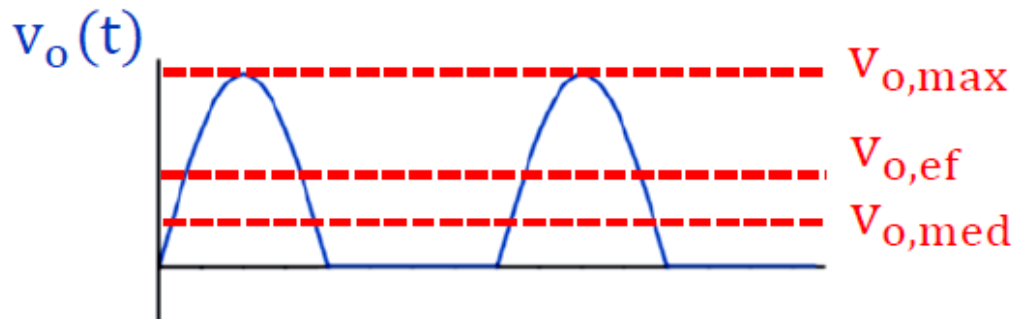
$$v_{s,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_0} v_o^2(t) dt} = \frac{v_{s,max}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot v_{s,max}$$

V_{rms} = V eficaz (root mean square) = valor equivalente de tensión en continua que produciría el mismo efecto calorífico (disipación de potencia) sobre una resistencia.



Rectificador de media onda

➤ Parámetros de la tensión de salida V_o aplicando **aprox. 2:**



(a) Diagrama del circuito

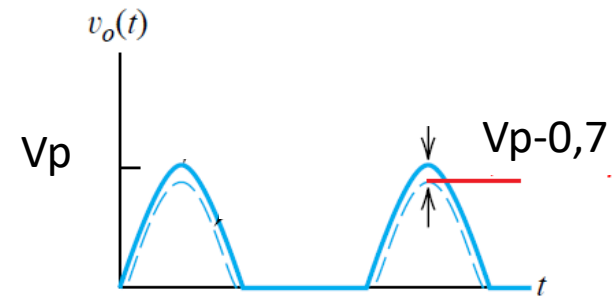
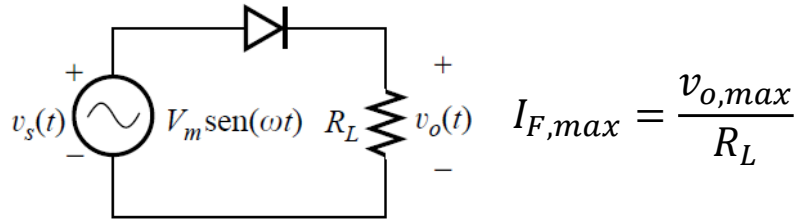
- Voltaje máximo en la carga: $v_{o,max} = v_{s,max} - V_\gamma$
- Valor eficaz de V_o : $v_{o,rms} = \frac{v_{o,max}}{2} = 0,5 \cdot v_{o,max}$
- Valor promedio de V_o : $v_{o,med} = \frac{v_{o,max}}{\pi} = 0,318 \cdot v_{o,max}$

Rectificador de media onda

➤ Es necesario tener en consideración los dos valores límites que pueden dañar el diodo:

- **Máxima corriente en directa (I_{FM}):**

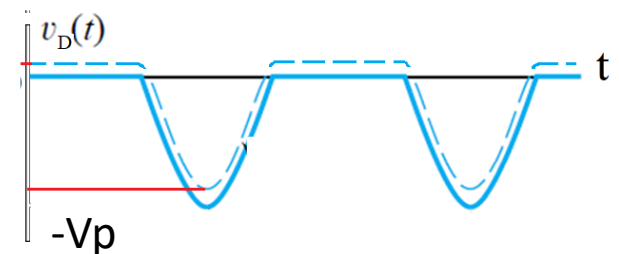
La corriente que circula por el diodo debe ser inferior I_{FM}



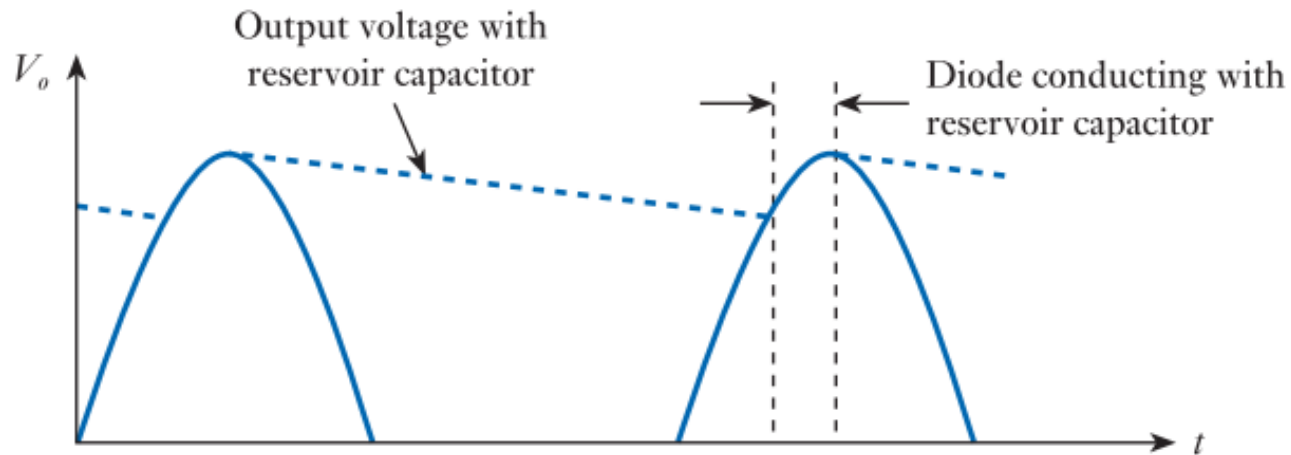
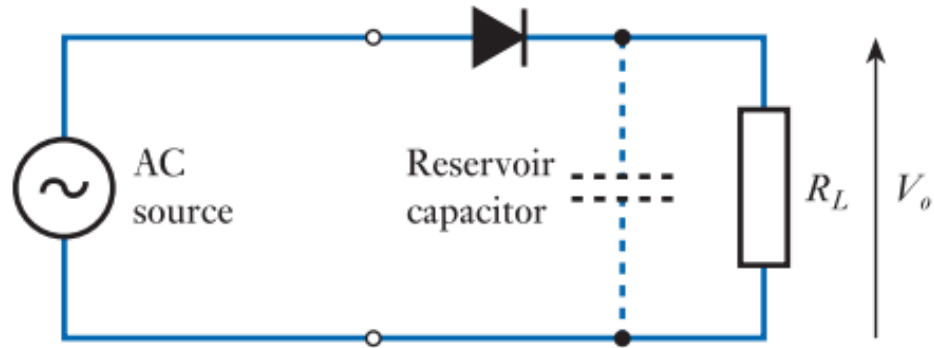
Margen de seguridad 25%.

- **Tensión inversa de ruptura (V_{BR}):**

Cuando el diodo se encuentra en polarización inversa se comporta como un circuito abierto; V_{BR} tiene que ser menor que $-V_p$ para prevenir un daño permanente en el diodo



Rectificador de media onda + filtro



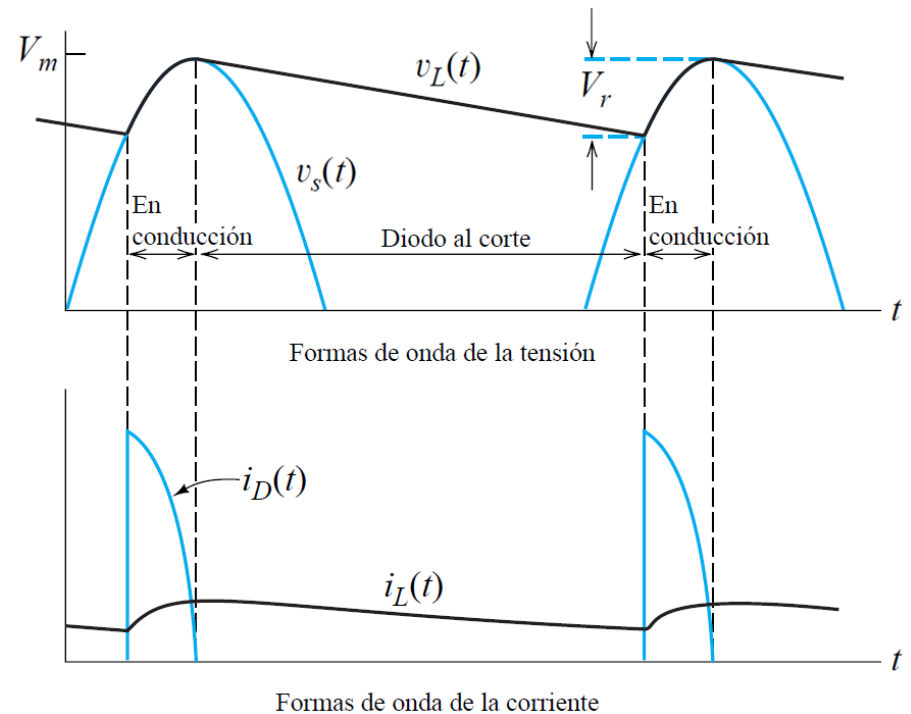
Rectificador de media onda + filtro

Se observa cómo $v_o(t)$ se va aproximando a una tensión constante (DC) con una pequeña componente de alterna (AC), llamada tensión de **rizado** (V_r).

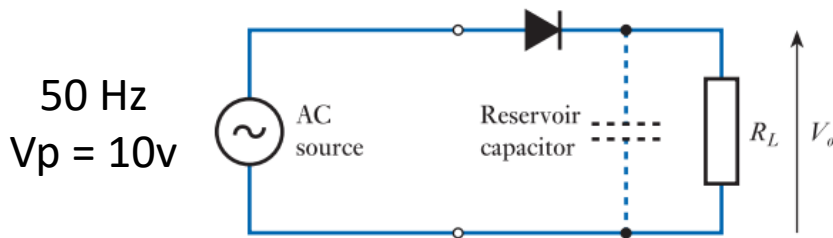
$$V_r = \frac{I}{f \cdot C}$$

I: corriente por la carga en continua
C: capacidad condensador
f: frecuencia de rizado

Este rizado se puede disminuir con un condensador de mayor capacidad.

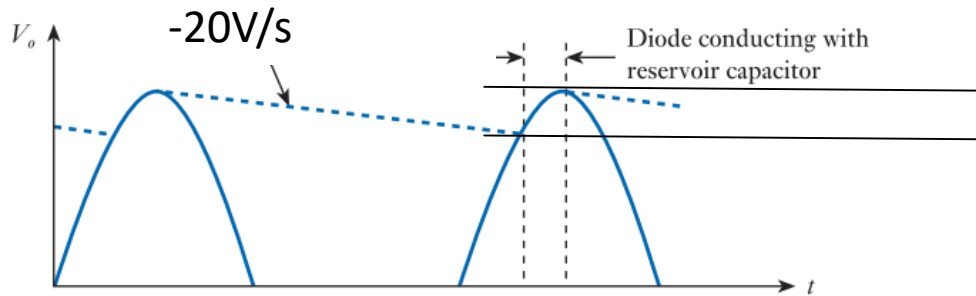


Rectificador de media onda + filtro



$C = 10\text{mF}$
 $I = 200\text{mA}$

Recuerda!
 $C [\text{F}] = \frac{Q}{V}$



¿Cuál es la tensión de rizado V_r ?

$$V_r = \frac{I}{f \cdot C} = \frac{200 \text{ mA}}{50 \cdot 10\text{mF}} = 0.4\text{V}$$

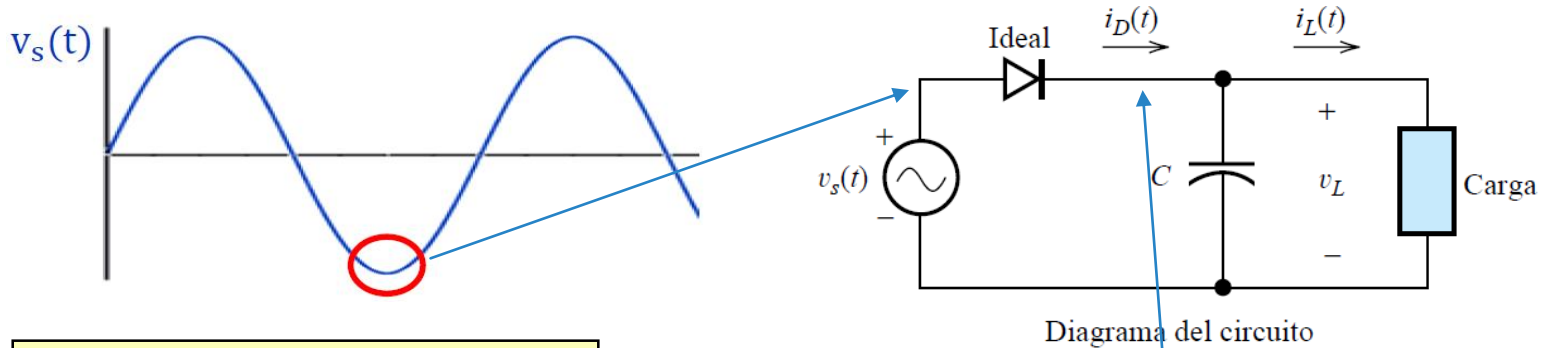
$$V_C = \frac{q}{C} \quad \rightarrow \quad \text{Diferenciando respecto al tiempo} \quad \rightarrow \quad \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{I}{C} = \frac{0.2\text{A}}{0.01\text{F}} = -20\text{V/s}$$

El condensador se descarga durante el periodo de la señal de entrada $f=50\text{Hz}$, $T = 20 \text{ ms}$.

Durante este tiempo de 20 ms la tensión cae a -20V/s , entonces $V_r = 0.02 \times 20 = 0.4\text{V}$

Rectificador de media onda + filtro

En este circuito, cuando el diodo está inversamente polarizado, la tensión inversa que soporta es mayor.



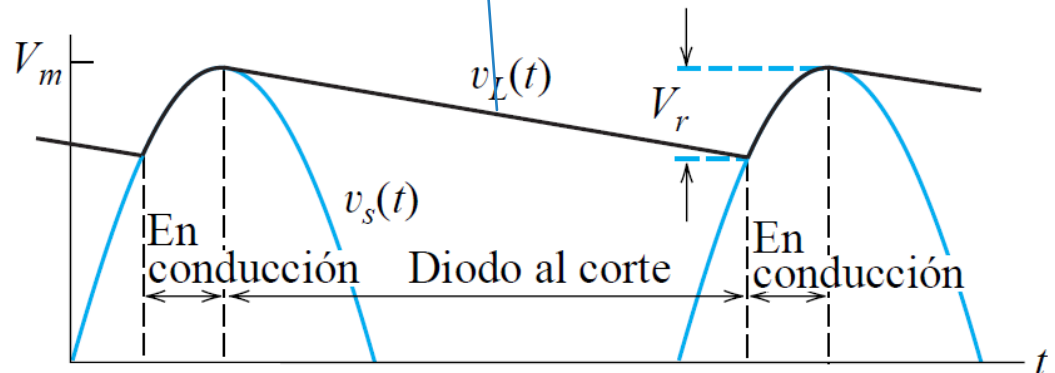
Como es posible observar gráficamente, el punto crítico se da cuando:

$$V_{ánodo} = -v_{s,max};$$

$$V_{cátodo} \approx +v_{s,max};$$

Por tanto:

$$V_D \approx -2v_{s,max};$$

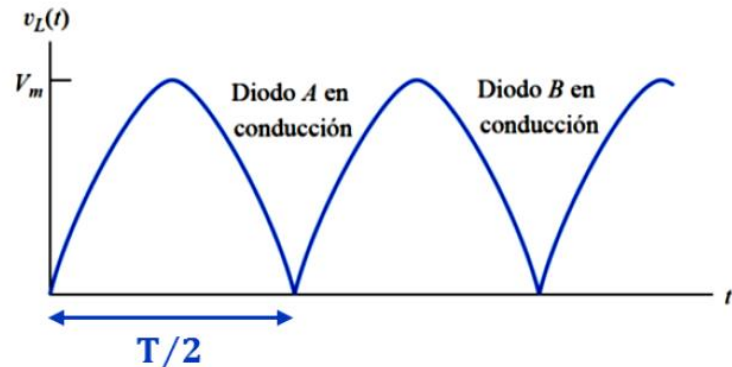
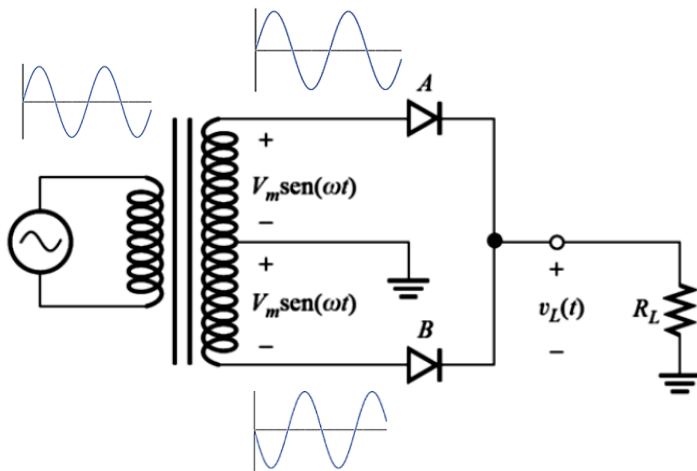


¡OJO con Tensión inversa de ruptura (V_{BR})!

Rectificador de onda completa

□ Con toma central en el transformador:

- Consisten en dos rectificadores de media onda con fuentes de tensión desfasadas y una carga común.
- Los diodos conducen en semi-ciclos alternos.
- Se precisa de un transformador con toma central para aislar la carga de la corriente alterna.

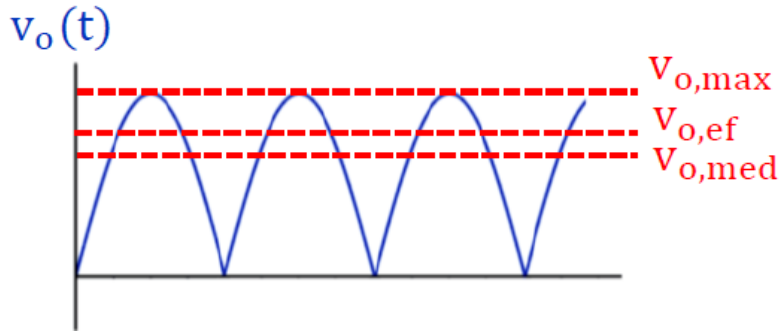


- La frecuencia de la señal de salida es el doble que de la entrada.

$$\text{Onda completa: } f_{\text{out}} = 2f_{\text{in}}$$

Rectificador de onda completa

□ Con toma central en el transformador



$$v_{o,max} = v_{s,max} - V_{\gamma}$$

$$v_{o,rms} = \frac{v_{o,max}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot v_{o,max}$$

$$v_{o,med} = \frac{2v_{o,max}}{\pi} = 0,636 \cdot v_{o,max}$$

➤ **Tensión de ruptura en inversa:** Observando alguno de los diodos cuando está en corte podemos apreciar que, para el valor pico de tensión alterna en la entrada:

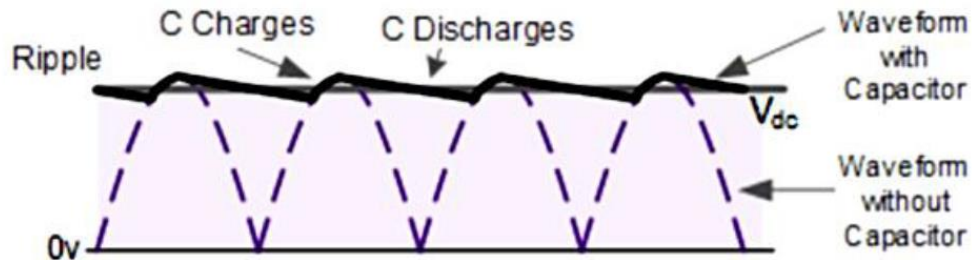
- En el ánodo cae: $V_{ánodo} = -v_{s,max}$;
- La tensión que cae en el cátodo es la misma que cae en la resistencia, esto es: $V_{cátodo} = +v_{s,max}$

Por tanto la tensión que cae es $-2v_{s,max}$:

Rectificador de onda completa

□ Con toma central en el transformador + condensador de filtrado.

- Al igual que en el rectificador de media onda, si queremos obtener una tensión de salida más constante, colocamos un condensador de gran capacidad paralelo a la carga.



$$C = \frac{I_{L,med}}{f_r V_r}$$

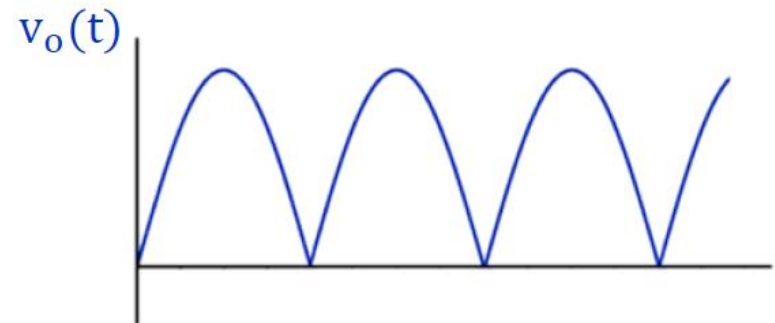
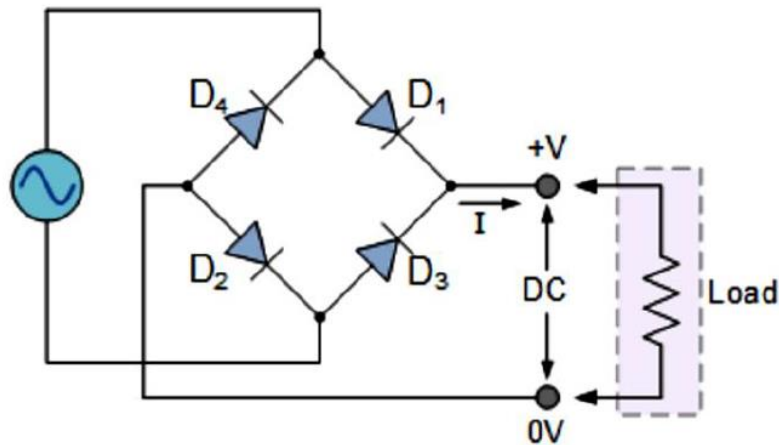
$$f_r = 2f_s$$

- Tensión de ruptura en inversa: Sigue siendo la misma que sin el filtro
– $2v_{s,max}$.

Rectificador de onda completa

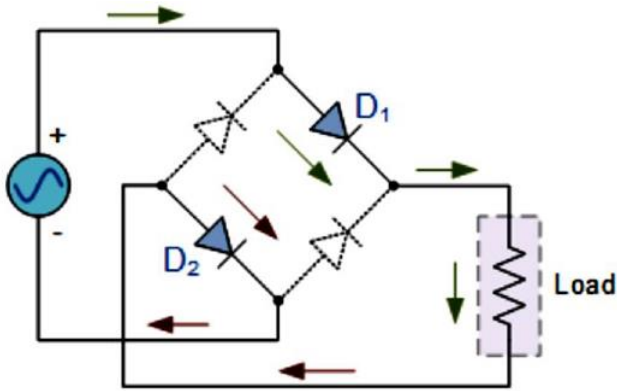
❑ Con puente de diodos.

- Es la configuración más empleada en rectificadores de onda completa.
- No es necesario un transformador para desfasar la señal de entrada.
- Se emplean 4 diodos en puente y conducen de forma alternada dos y dos en cada semi-ciclo.

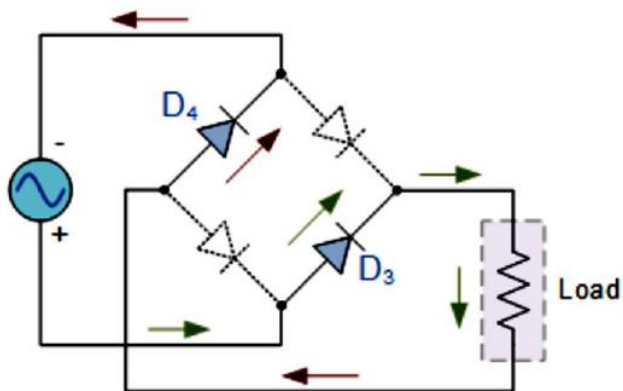
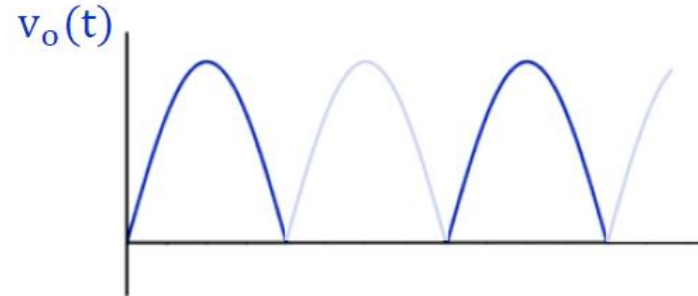


Rectificador de onda completa

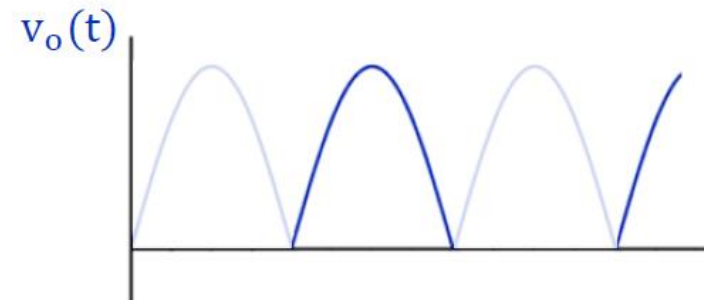
□ Con puente de diodos.



- Semiciclo positivo: D1 y D2 conducen, D3 y D4 en corte.



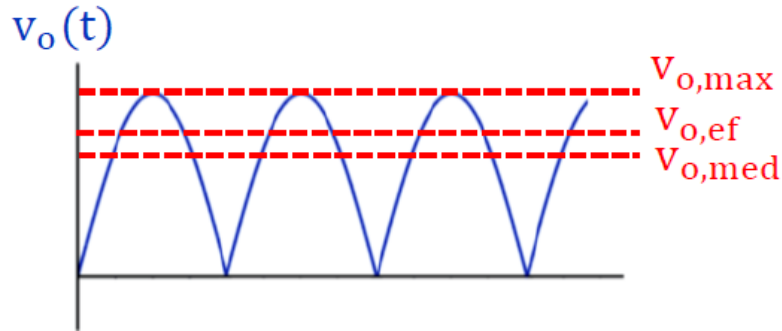
- Semiciclo negativo: D1 y D2 en corte, D3 y D4 conducen.



➤ En ambos semiciclos la corriente circula en el mismo sentido.

Rectificador de onda completa

□ Con puente de diodos



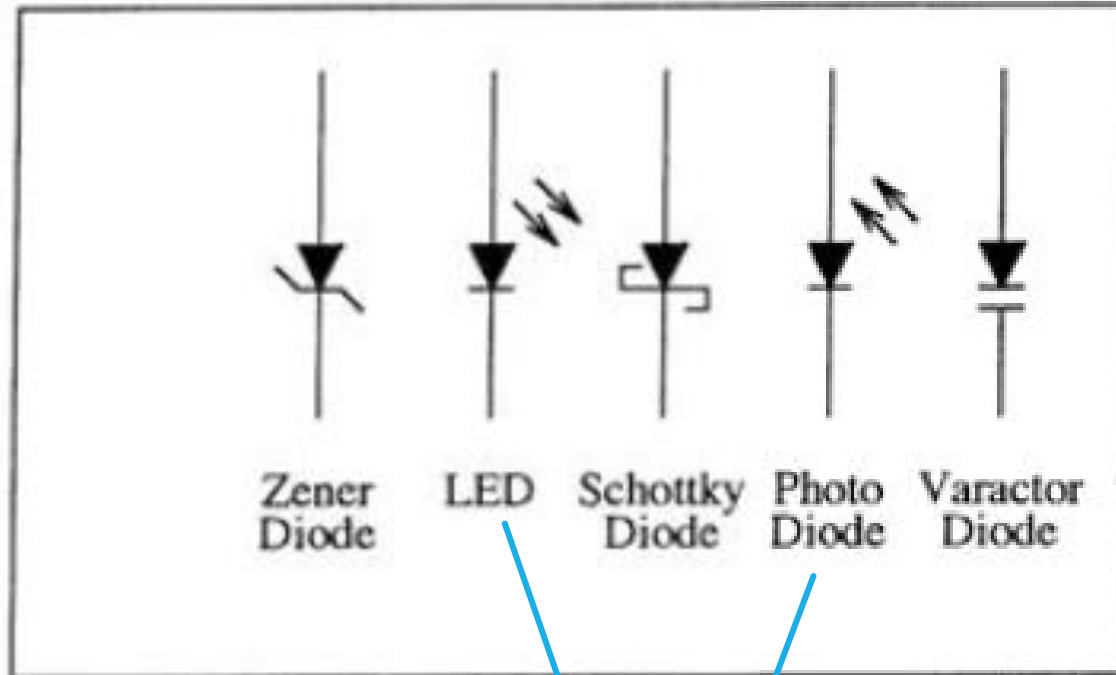
$$v_{o,max} = v_{s,max} - 2V_\gamma$$

$$v_{o,rms} = \frac{v_{o,max}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot v_{o,max}$$

$$v_{o,med} = \frac{2v_{o,max}}{\pi} = 0,636 \cdot v_{o,max}$$

- **Tensión de ruptura en inversa:** En este caso la tensión que cae en cada diodo que no conduce es $-v_{s,max}$, mejorando las prestaciones de la anterior configuración. No es necesario un diodo con tensión de ruptura tan alto.

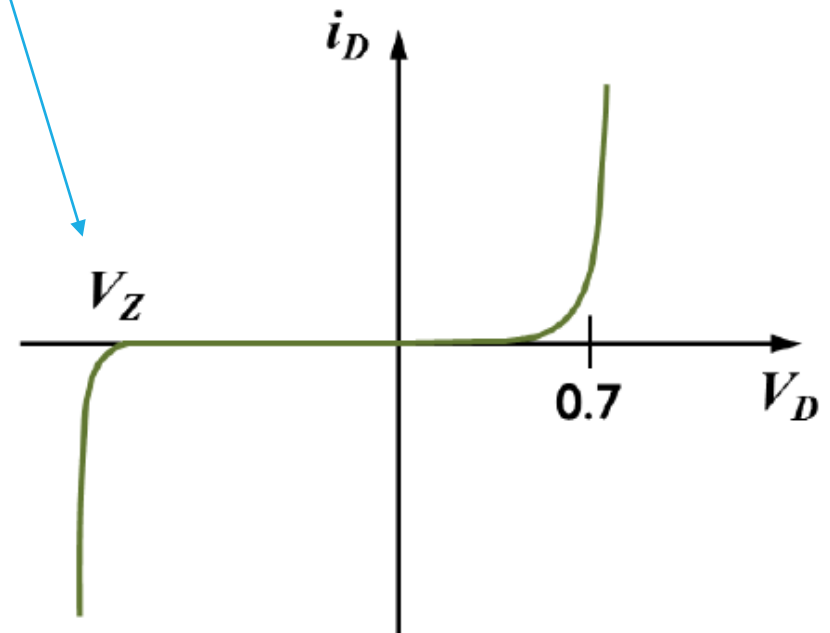
Diodo de propósito especial



Optoelectrónica:
Las flechas significan
emisión/absorción de
luz

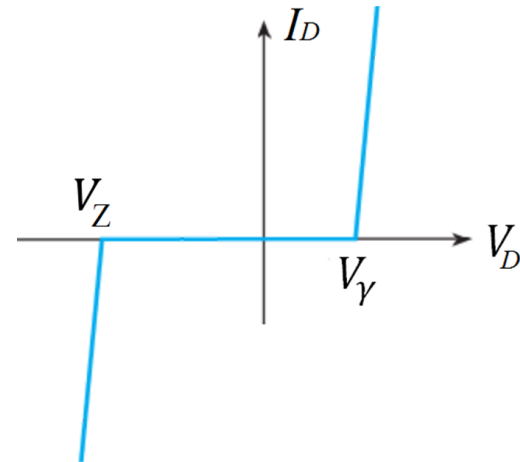
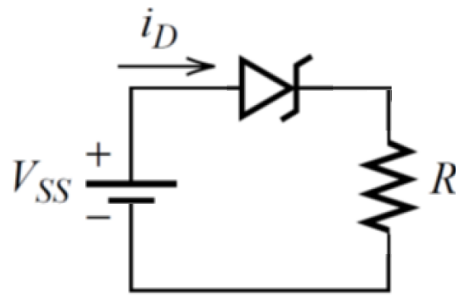
Diodo Zener

- Fabricados especialmente para trabajar en la región de ruptura (sin dañarse)
- En el resto de zonas (conducción y corte) se comporta como un diodo común.
- Tensión de ruptura = **Tensión Zener o V_Z**
- La tensión Zener puede tomar diferentes valores dependiendo de su fabricación (niveles de dopados).
- Esto permite utilizar el Diodo Zener como referencia de tensión porque hay zeners de valores diferentes. $V_Z = 3.3V, 4.5V, 6V, \text{ etc}$



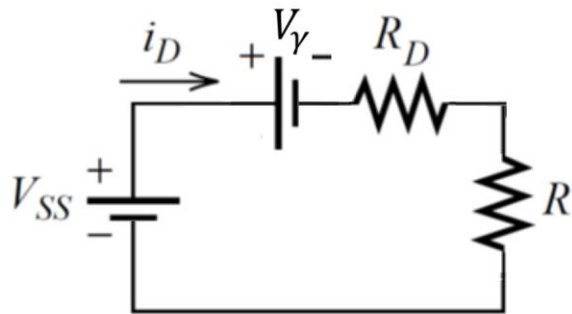
Diodo Zener

□ Aplicando el modelo equivalente 3:



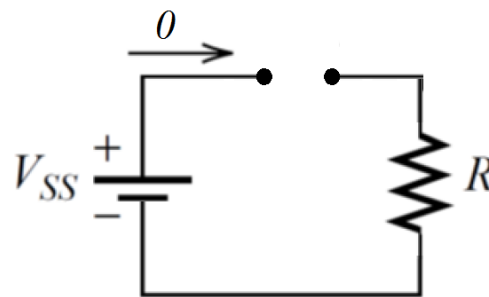
Diodo en conducción

Cuando $V_{SS} > V_Y$



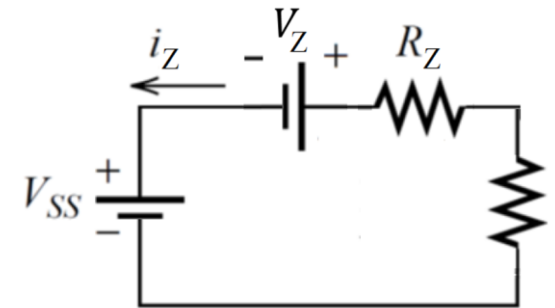
Diodo en corte

Cuando $V_Z < V_{SS} < V_Y$



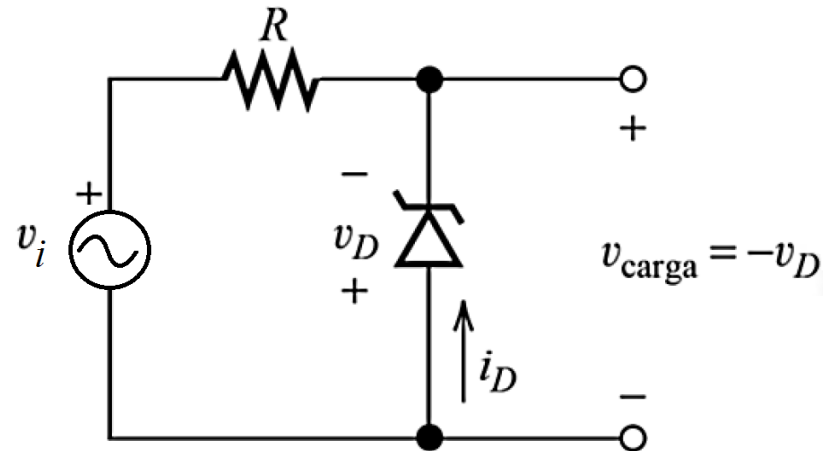
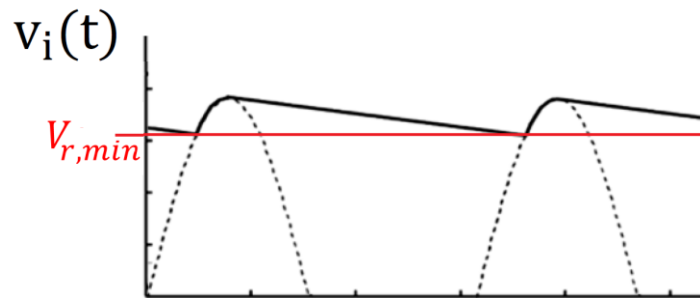
Diodo en ruptura

Cuando $V_{SS} < V_Z$



Regulador de tensión

- Como vimos en diapositivas anteriores, los circuitos rectificadores generan salidas con rizado. Cuando el rizado es pequeño, la señal se aproxima a una señal continua.
- Para conseguir una señal totalmente continua, colocaremos tras el rectificador y el filtro capacitivo un regulador de tensión.

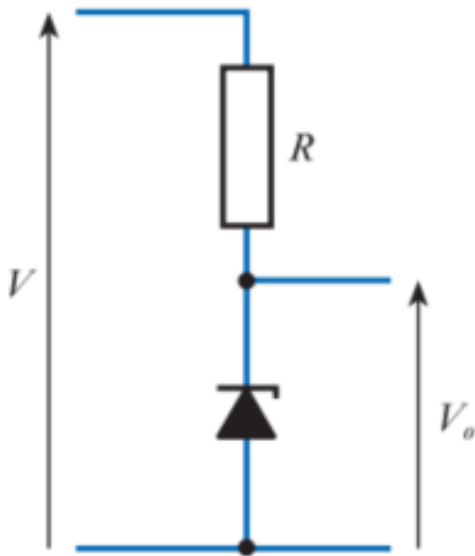


- Para que el diodo esté en ruptura: $V_{r,min} > V_R + V_Z$

Es decir, El valor mínimo de la componente de alterna de V_i tiene que superar la caída de tensión en la resistencia y en el Zener.

Regulador de tensión

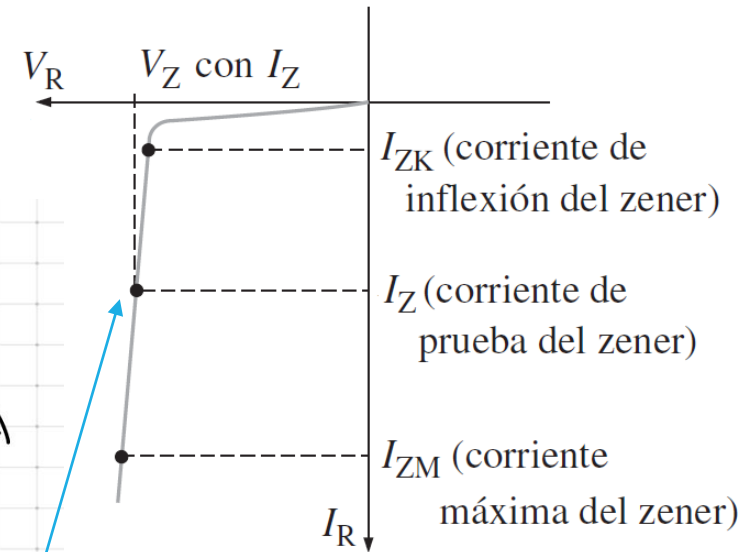
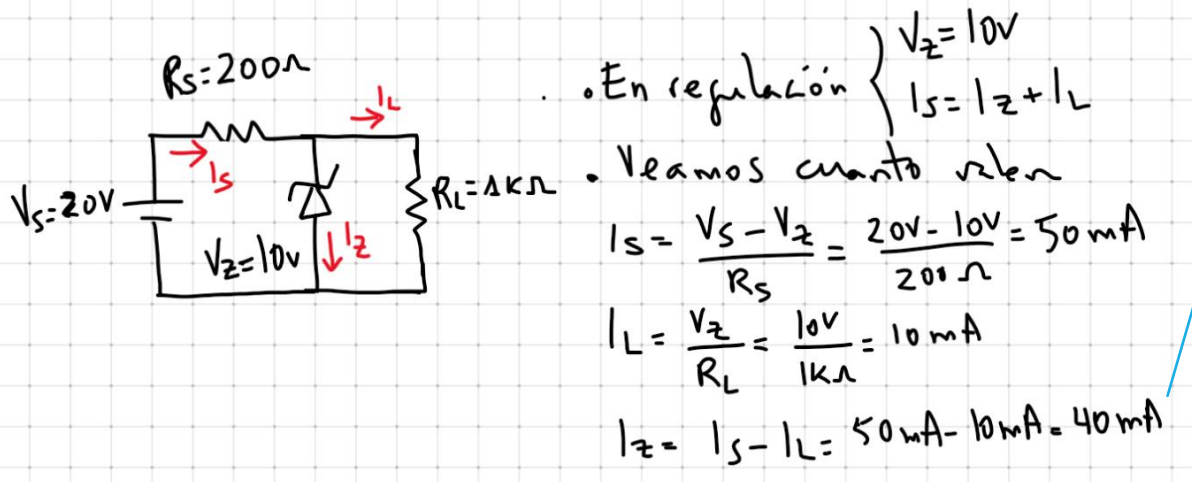
Un circuito simple en el que el diodo zener actúa como **referencia de tensión**



- El diodo zener está conectado en polarización inversa.
 - Si V es mayor que $V_Z + V_R$, la unión romperá y el diodo conducirá en inversa.
 - Así, aparece una tensión siempre constante en V_o , independientemente del valor de la tensión de entrada.
-
- A este circuito se le conoce como circuito regulador de tensión o referencia de tensión

Punto Límite de funcionamiento del Zener

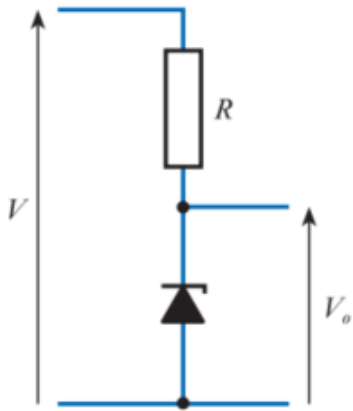
- El diodo debe permanecer en zona de ruptura en todas las condiciones → Debe haber corriente por el diodo



- ¿Cuándo se puede perder la regulación?

- V_S demasiado baja respecto a $V_Z \rightarrow I_Z \approx 0$ ej: $V_S = 12V \rightarrow I_S = 10mA, I_L = 10mA, I_Z = 0$.
- R_L demasiado baja $\rightarrow I_L$ muy alta $\rightarrow I_Z \approx 0$ ej: $R_L = 200\Omega \rightarrow I_L = 50mA, I_S = 50mA, I_Z = 0$.
- R_S demasiado alta $\rightarrow I_S$ muy baja $\rightarrow I_Z \approx 0$ ej: $R_S = 1k\Omega \rightarrow I_S = 10mA, I_L = 10mA, I_Z = 0$.

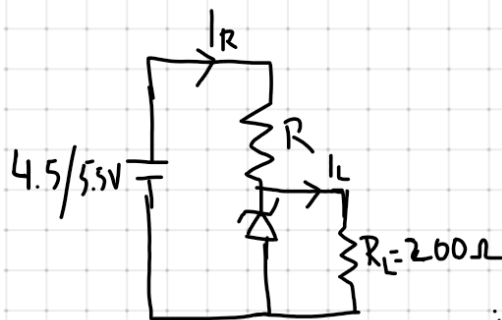
Regulador de tensión



- El valor de R se debe escoger de tal forma que la caída de tensión causada por la corriente no sea grande como para reducir el voltaje del diodo zener por debajo de su zona de ruptura y perder la regulación.

$$V = V_R + V_Z \quad \longrightarrow \quad V - V_R = V_Z$$

Ejemplo: Diseñar una referencia de tensión de 3.6 V que carga una $R=200\Omega$ siendo $V_{in} \approx 4.5$ y 5.5V.



$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{3,6V}{200\Omega} = 18\text{mA}$$

$$V_{in} = V_R + V_Z$$

$$\text{min. } \left\{ \begin{array}{l} 4.5V = V_R + 3,6V \\ V_R = 4,5V - 3,6V = 0,9V \end{array} \right.$$

$$V_R = 4,5V - 3,6V = 0,9V$$

$$I_R = I_Z + I_L \Rightarrow I_Z = 0 \Rightarrow I_R = I_L = 18\text{mA} = \frac{V_R}{R}$$

↙ mínimo ↘

$$R = \frac{0,9V}{18\text{mA}} = 50\Omega$$



$$R < 50\Omega \rightarrow R_{\text{estandar}} 47\Omega$$

Regulador de tensión

Table 1.2 Preferred values tolerance series

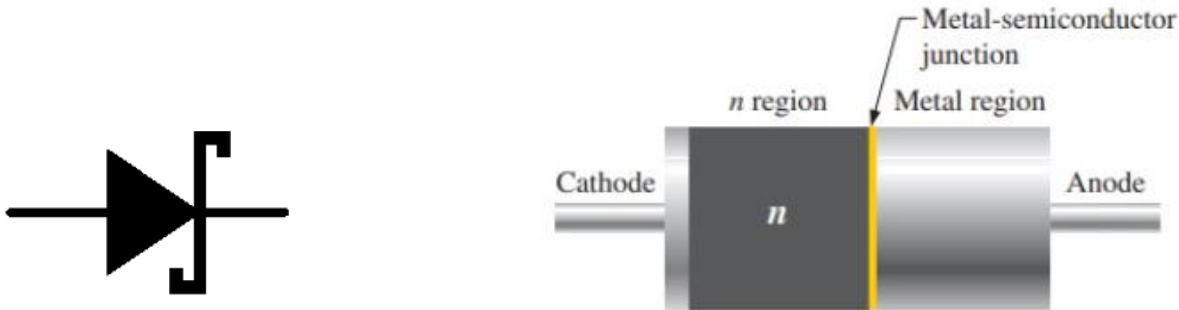
																	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8											
																	E6 series 20% tolerance																
																	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2					
																	E12 series 10% tolerance																
1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1																
																	5.6	6.2	6.8	7.6	8.2	9.1											
																	E24 series 5% tolerance																
1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33	1.37	1.40	1.43																		
1.47	1.50	1.54	1.58	1.62	1.65	1.69	1.74	1.78	1.82	1.87	1.91	1.96	2.00	2.05	2.10																		
2.15	2.21	2.26	2.32	2.37	2.43	2.49	2.55	2.61	2.67	2.74	2.80	2.87	2.94	3.01	3.09																		
3.16	3.24	3.32	3.40	3.48	3.57	3.65	3.74	3.83	3.92	4.02	4.12	4.22	4.32	4.42	4.53																		
4.64	4.75	4.87	4.99	5.11	5.23	5.36	5.49	5.62	5.76	5.90	6.04	6.19	6.34	6.49	6.65																		
6.81	6.98	7.15	7.32	7.50	7.68	7.87	8.06	8.25	8.45	8.66	8.87	9.09	9.31	9.53	9.76																		
																	E96 series 1% tolerance																

The numbers then repeat, but each (taking the E96 set as an example) multiplied by ten, up to 97.6 Ω , then multiplied by 100 up to 976 Ω and so on.

Type	Abbreviation	IEC (International)	ANSI (US)
Fixed resistor	R		

Otros diodos

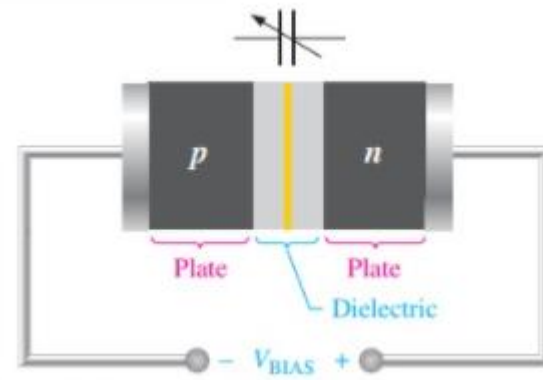
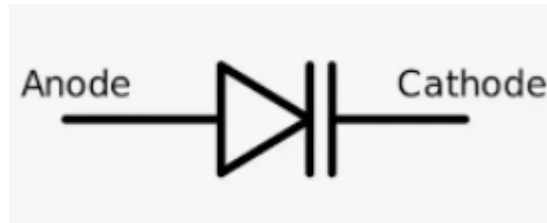
□ **Diodo Schottky:** Son diodos formados por unión metal – semiconductor.



- Proporcionan conmutaciones muy rápidas entre los estados de inversa y conducción directa ($< 1ns$).
- Tienen muy baja tensión umbral ($0,2 < V_{\gamma} < 0,4$).
- Ideal para aplicaciones en alta frecuencia.

Otros diodos

- **Diodo Varactor / Varicap / De capacidad variable:** Diodo en polarización inversa separado por una capa de aislante

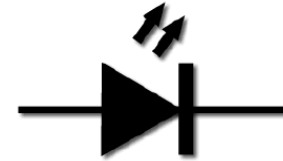


- Actúa como un condensador de capacidad variable.

Otros diodos opto-electrónicos

❑ Diodo LED (Light Emitting Diode)

- Emiten luz cuando se polarizan en directa.
- En el proceso de recombinación electrón – hueco de la BC a la BV el electrón cede energía en forma de calor o luz.



Dependiendo del material semiconductor, la luz de emisión toma distintos colores.



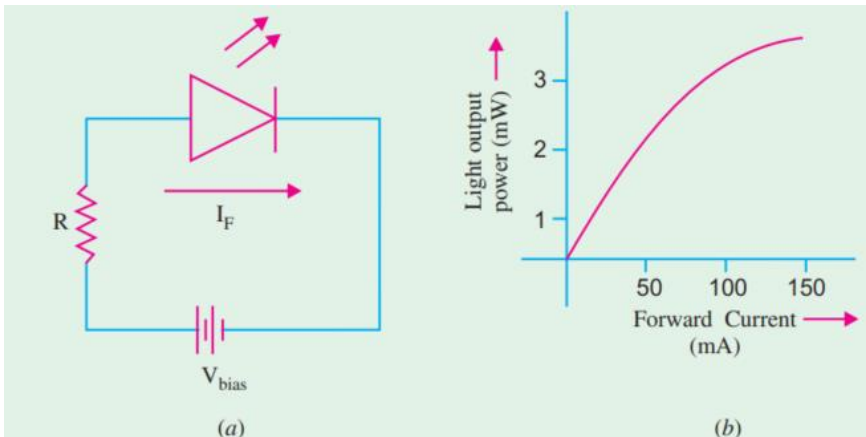
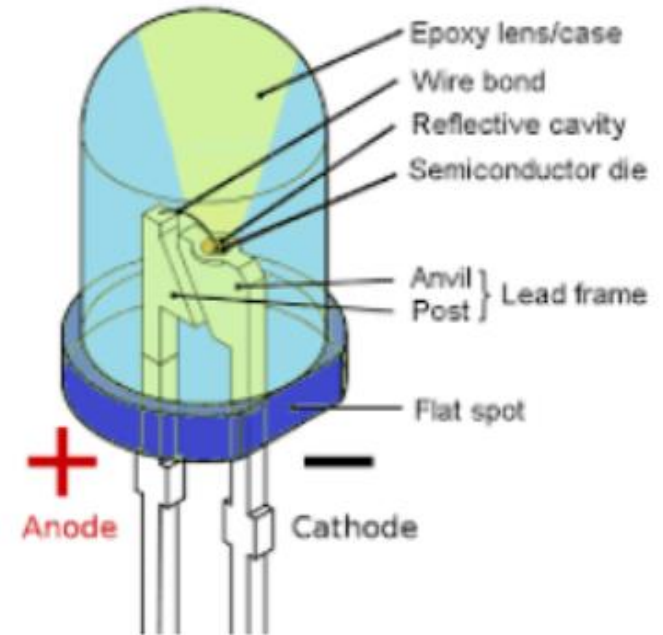
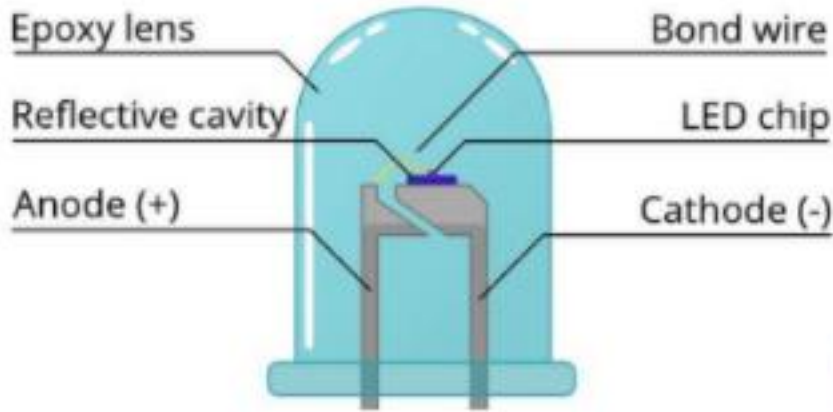
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	V_F @ 20mA
GaAs	850-940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630-660nm	Red	1.8v
GaAsP	605-620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585-595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550-570nm	Green	3.5v
SiC	430-505nm	Blue	3.6v
GaN	450nm	White	4.0v

Note: Abbreviations for materials: Al, aluminium; As, arsenic; C, carbon; Ga, gallium; In, indium; N, nitrogen; P, phosphorus; Si, silicon. Oblique stroke indicates one semiconductor on a substrate of another; for example GaAsP/GaAs means gallium-arsenic-phosphorus on gallium arsenide.

- La utilización del LED es más ventajosa porque consume menos y produce menos calor que las lámparas incandescentes.
- Los LEDs también duran más tiempo que las lámparas incandescentes.

Dispositivos opto-electrónicos

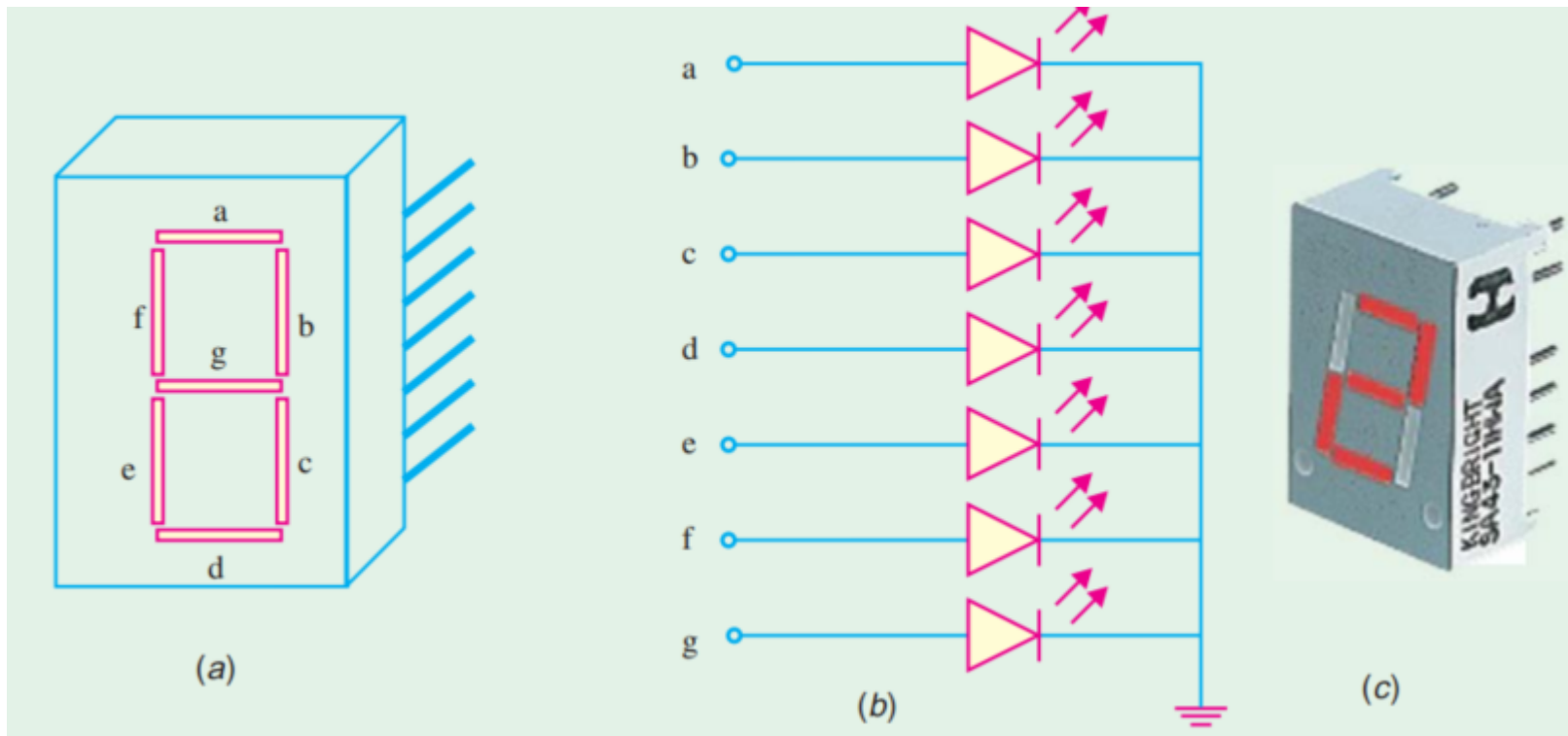
Inside LED (Light Emitting Diode)



Dispositivos opto-electrónicos

7-segment display

Consiste en 7 diodos que pueden formar números del 0 al 9.

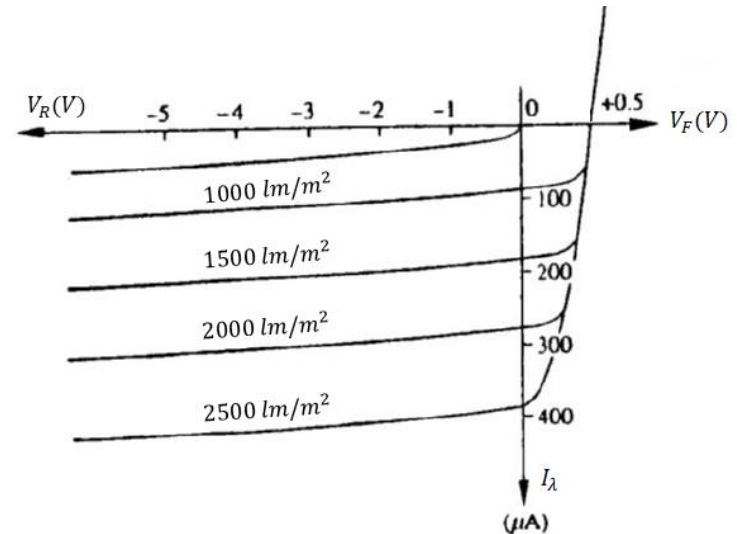


Dispositivos opto-electrónicos

□ **Fotodiodo:** Este emplea como sensor/detector de luz.

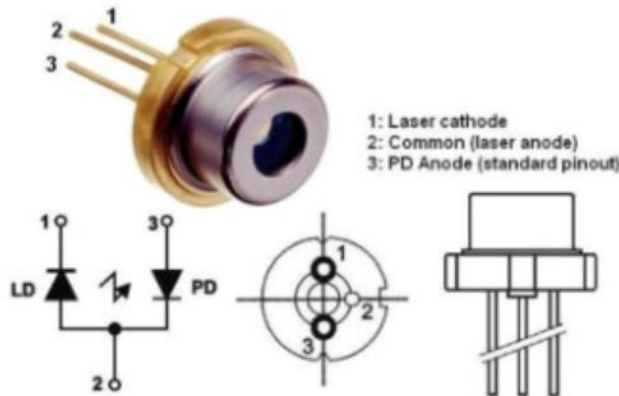


- Este diodo trabaja con **polarización inversa**, pero sin llegar a la zona de ruptura como los Zener.
- En este caso la corriente inversa de saturación I_s , varía con la luz incidente.

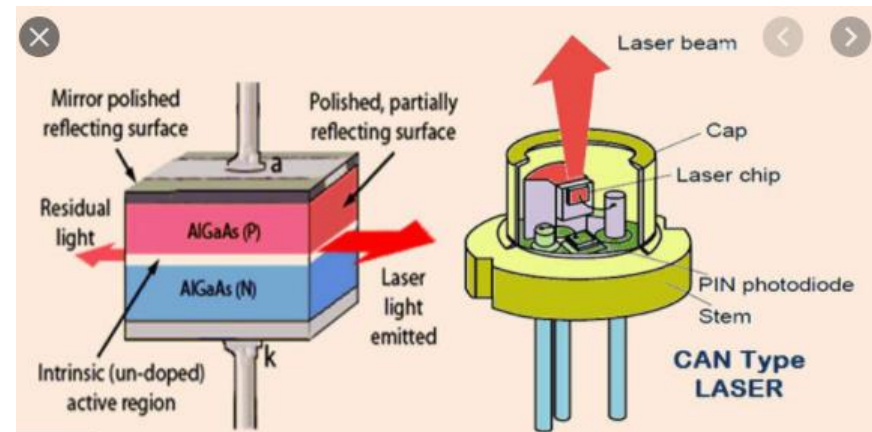


Dispositivos opto-electrónicos

- ❑ **Diodo Láser (Light amplification by stimulated emission of radiation):** Los fotones se emiten en fase. Luz coherente y potente: comunicaciones fibra óptica, impresoras, lectores cd, etc.



Simbología e identificación de los Pines del diodo láser

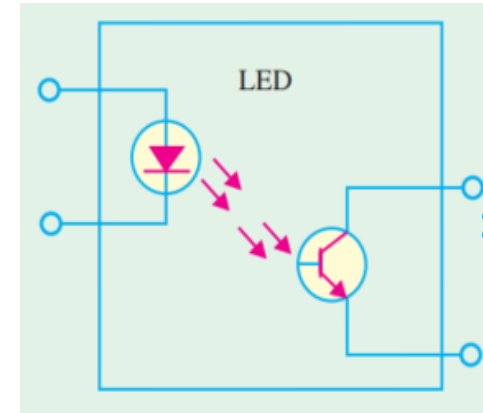
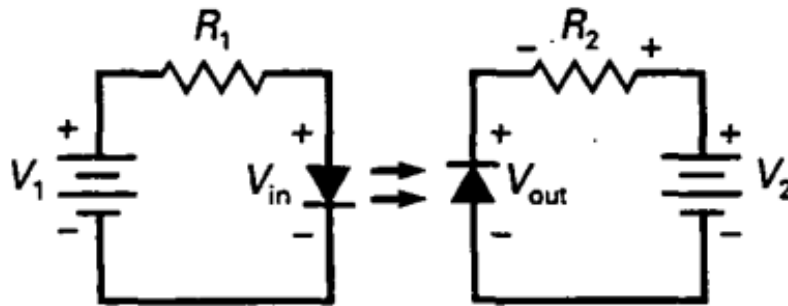


- laser pointers.
- fiber optic communications.
- barcode readers.
- laser printing.
- laser scanning.



Dispositivos opto-electrónicos

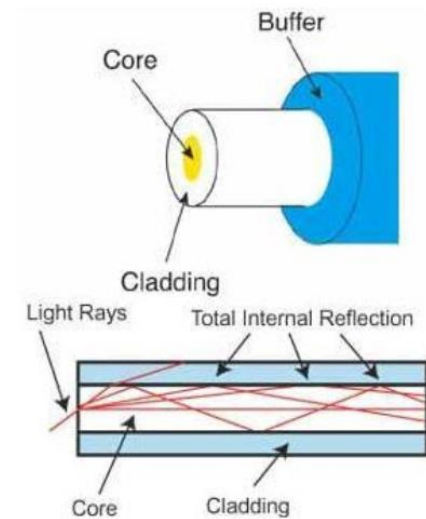
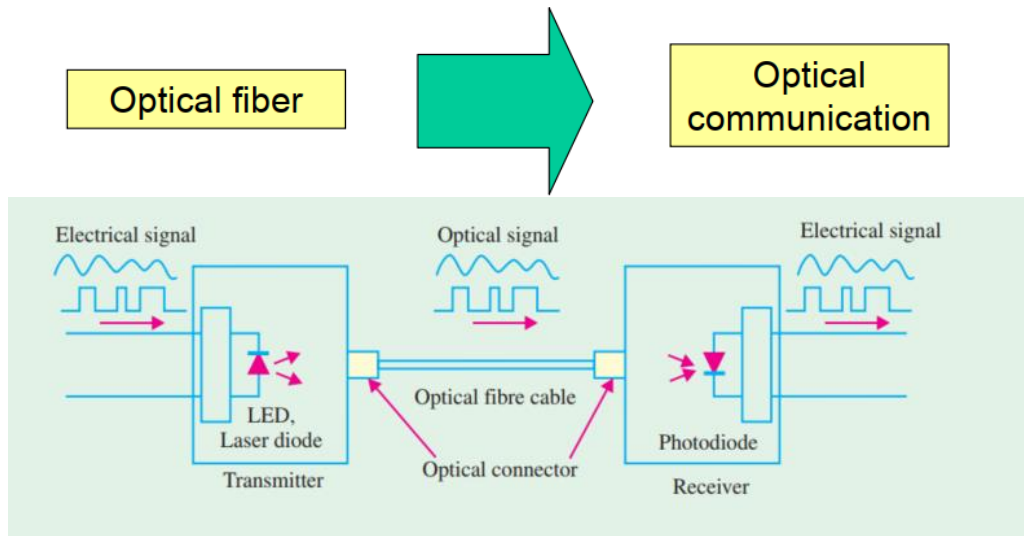
❑ **Optoacoplador:** combina led y fotodiodo / led y fototransistor.



- La función principal es aislar un circuito de otro, aun permitiendo el control del segundo circuito mediante el primero.
- Normalmente se pretende aislar los circuitos para proporcionar protección frente a variaciones grandes de tensión que podrían producir el daño sobre el dispositivo.

Dispositivos opto-electrónicos

- ❑ **Comunicaciones Fibra óptica:** combina laser, fotodiodo y fibra.

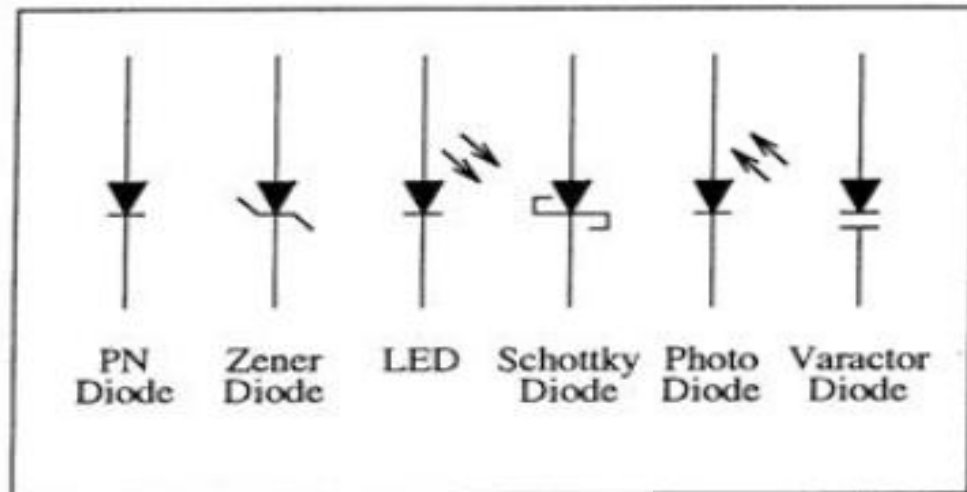


Ver Video Optoelectronics (Campus Virtual)

Resumen diodos

Cuando hayas estudiado este tema debes ser capaz de:

- Explicar las funciones básicas de un diodo dentro de circuitos eléctricos y describir las características principales de un diodo ideal.
- Describir las características eléctricas de los metales, aislantes y semiconductores.
- Discutir los materiales de dopado para los semiconductores y la fabricación de diodos semiconductores
- Describir las características típicas de un diodo y ser capaz de pintar su característica I-V
- Conocer el uso de los diferentes diodos de propósito especial, incluido el zener.
- Diseñar un rango de circuitos que explotan las características de los diodos semiconductores.



Tema 3. Transistores bipolares (Bipolar Junction Transistor o BJT)

Curso 2023-2024

Electrónica 2º Curso

Grado de Ingeniería Aeroespacial

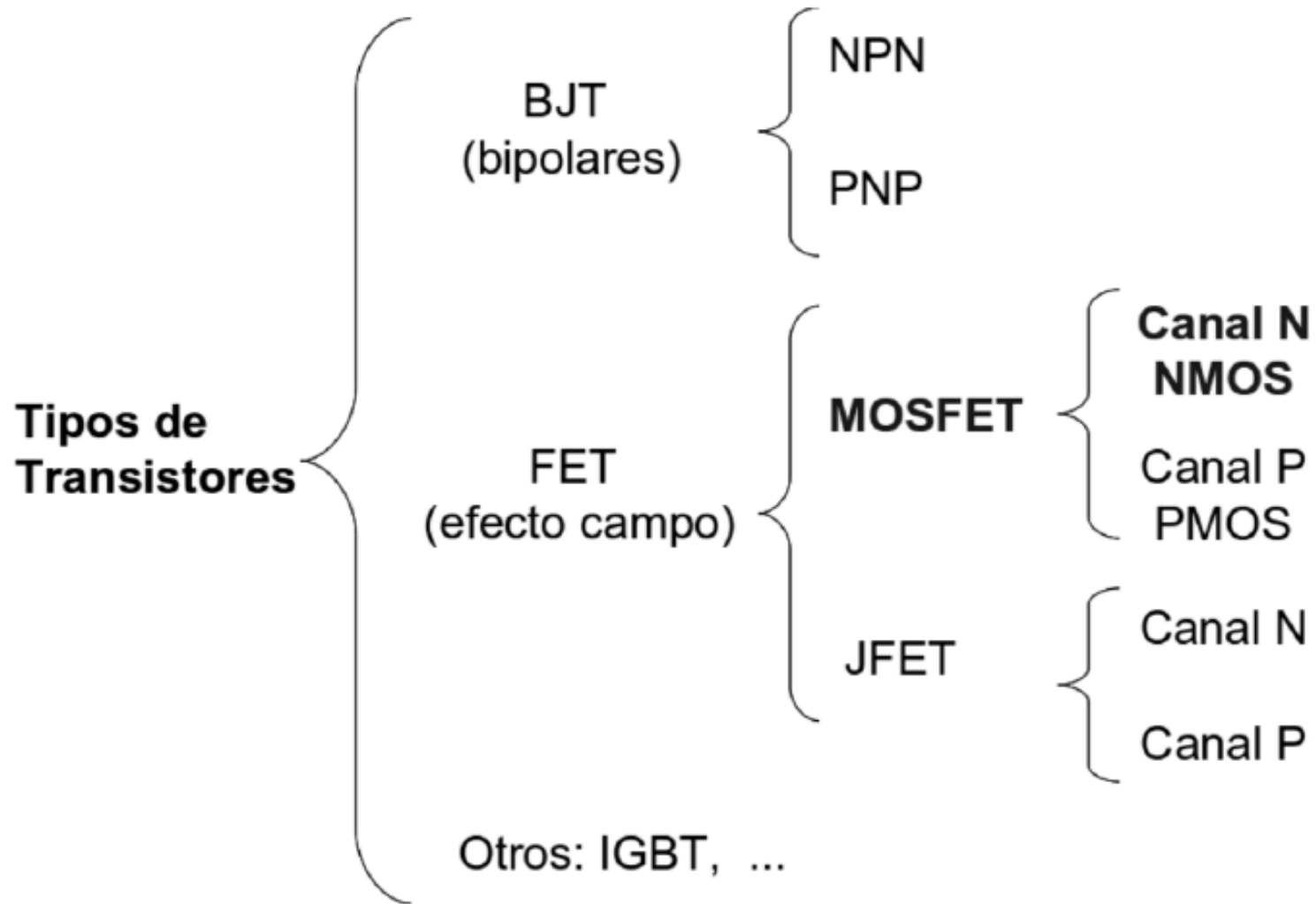


Índice

Resumen

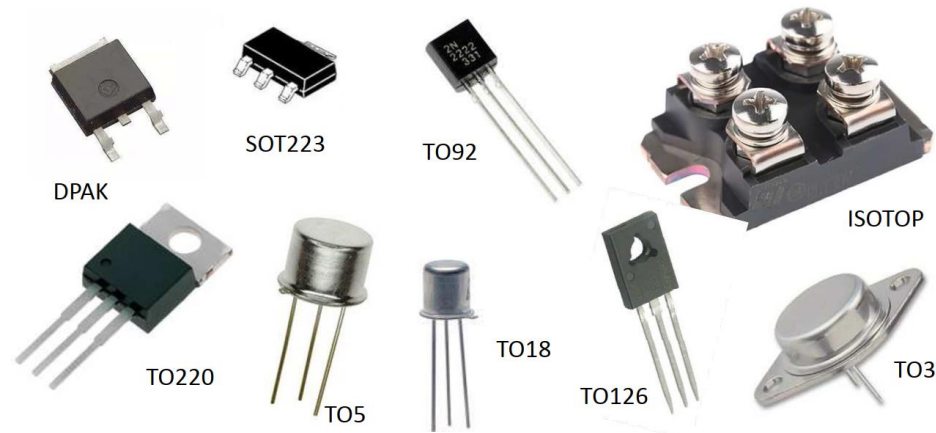
- Tipos de transistores principales: BJT y MOSFET
- Describir la estructura de un BJT
- Describir su comportamiento: fuente de corriente
- Transistor BJT: estructura y terminales, curva característica
- Describir sus principales aplicaciones
 - BJT como conmutador (switch)
 - BJT como amplificador
- Dimensionar circuitos simples con BJT's
- Interpretar los datos de los fabricantes:
 - datasheet (hoja de datos)
 - packaging (encapsulados)

Introducción



Introducción

- Los transistores (como los diodos) se fabrican utilizando silicio o germanio, a parte de otras aleaciones de semiconductores más exóticas como puede ser el arseniuro de galio (GaAs) o el arseniuro de indio galio (InGaAs).
- Los transistores más comunes son de Silicio.



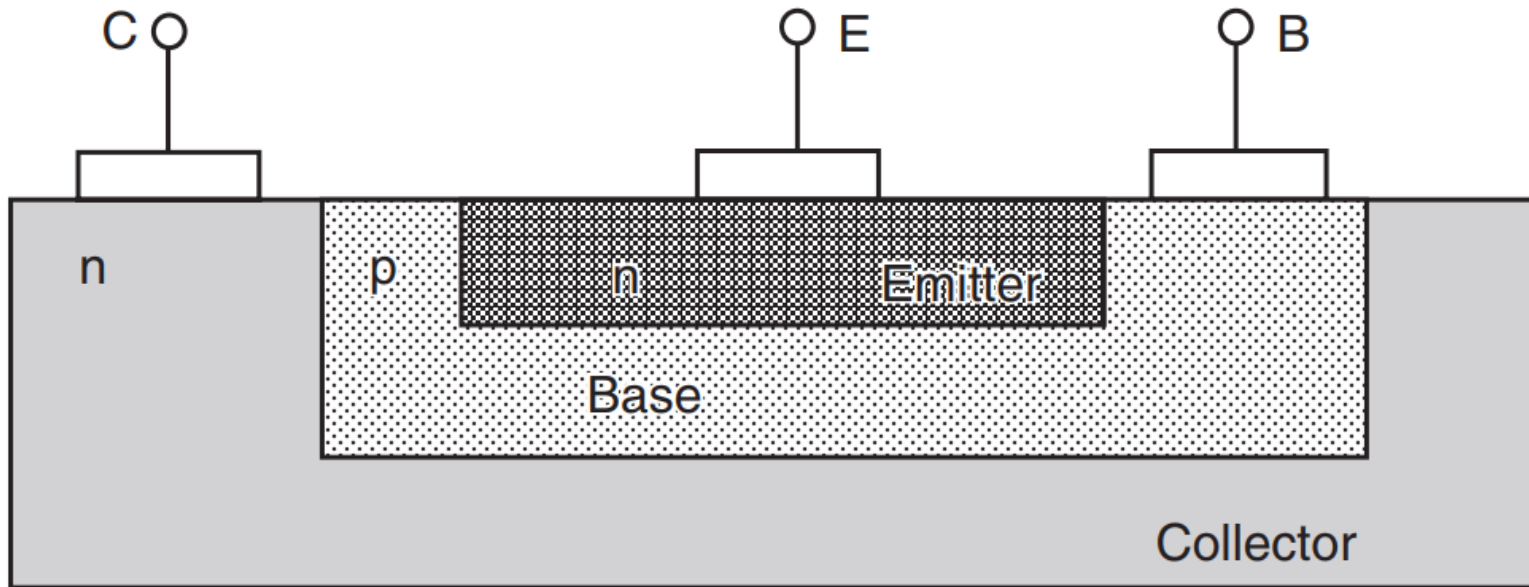
- Es importante conocer como funcionan los transistores ya que los podemos encontrar el cualquier circuito electrónico de forma discreta (encapsulados de la foto) o formando parte de un circuito integrado más complejo (amplificadores operacionales, microprocesadores, etc)
- Ellos conforman la base de los circuitos integrados (CI) que actualmente conforman al electrónica actual.

Transistor Bipolar (BJT)

- ❑ **Transistor Bipolar de Unión o BJT (Bipolar Junction Transistor)**
 - **Funciones:** Amplificación, conmutación y regulación.
 - **Ventajas:** Los BJT tienen **mayor ganancia** que los FET (Field Effect Transistor). Es decir, pueden **aportar mayor corriente**.
 - **Inconvenientes:** Tiene menor resistencia de entrada y **consume más potencia** que el FET.
 - Componentes principales de los sistemas electrónicos (analógicos y digitales)
 - Bipolar: 2 tipos de portadores de carga participan en la conducción: electrones y huecos.

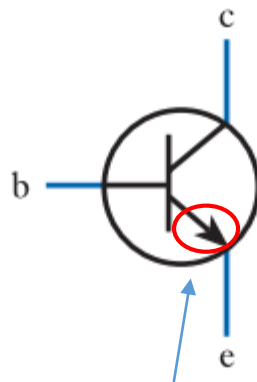
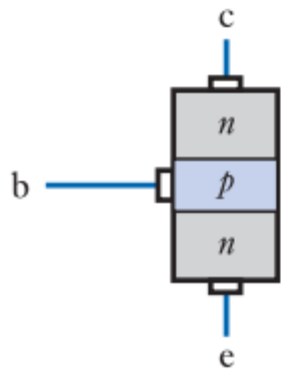
Transistor Bipolar (BJT)

Schematic outline of the *bipolar junction* transistor (BJT)

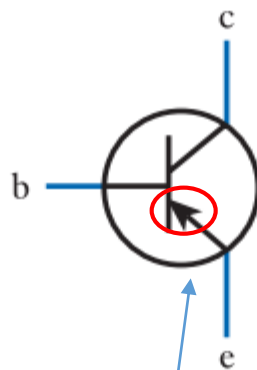
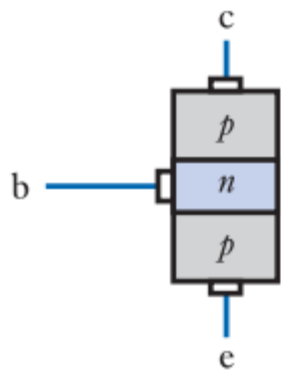


Estructura BJT: Construcción Física

2 polaridades posibles: NPN o PNP

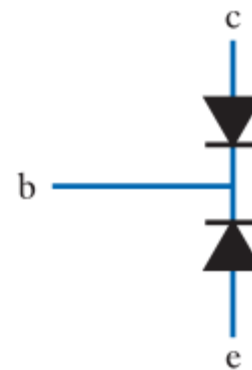
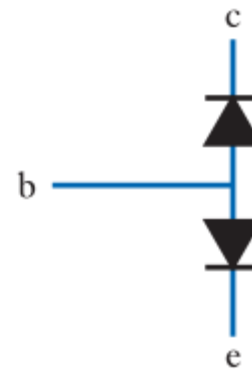


(a) An *n*pn transistor



(b) A *p*np transistor

Son 2 diodos enfrentados



- **La Flecha:** indica el terminal emisor y la dirección de la corriente.
- NPN flecha hacia afuera. →
- PNP flecha hacia dentro. ←
- NPN y PNP funcionan igual pero se invierte la polaridad de los voltajes y las corrientes

Introducción

➤ Transistor BJT sin polarización: npn ó pnp

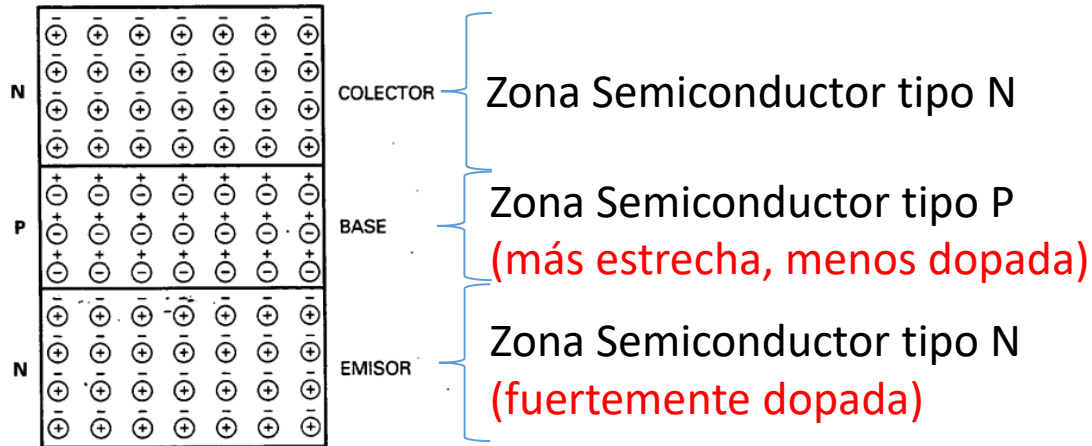


Figura 6-1. Estructura de un transistor.

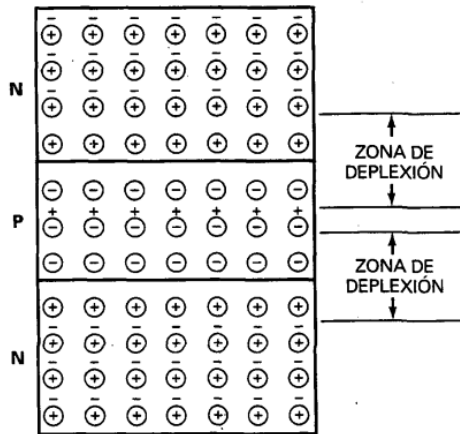
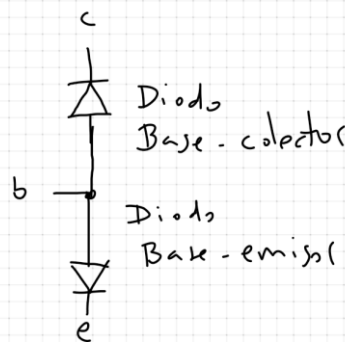


Figura 6-2. Zonas de deplexión.

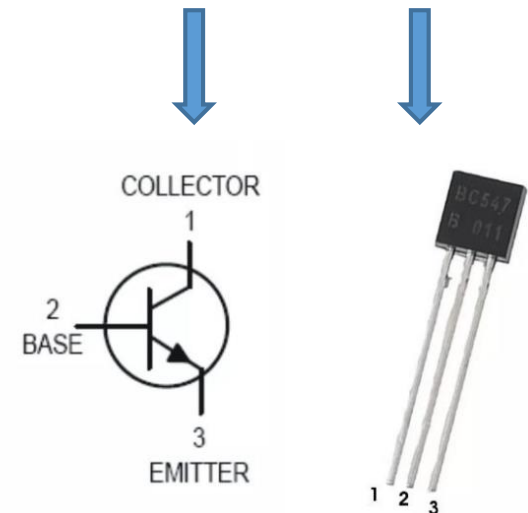
Son 2 diodos enfrentados



3 terminales:
emisor, base y colector.

Símbolo electrónico

Componente electrónico



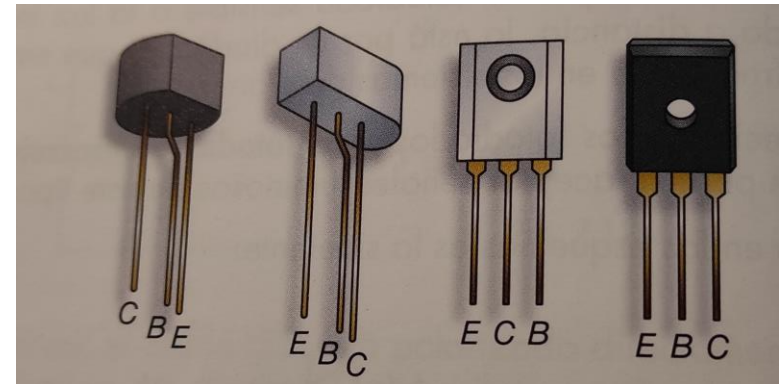
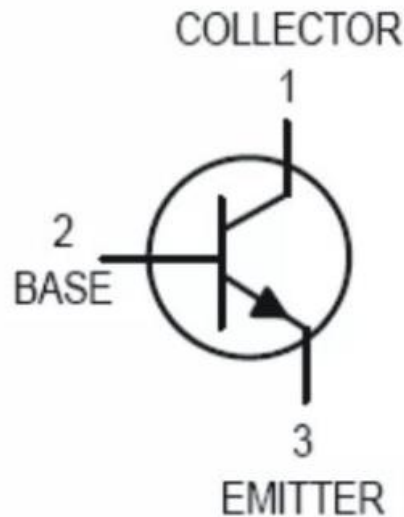
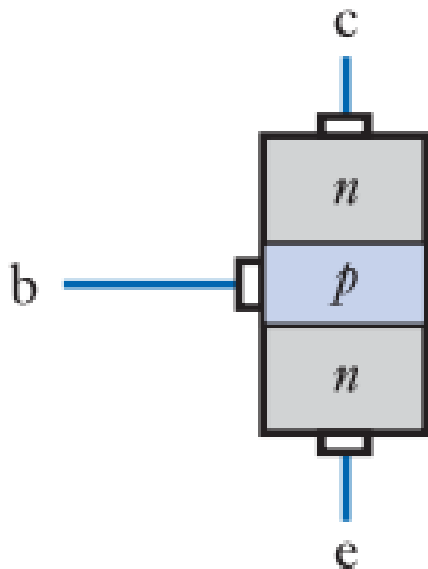
Introducción

3 terminales

E: emisor/emitter

B: base / base

C: colector / collector



Nota

□ Notación de corrientes y tensiones en circuitos con transistores

□ Subíndices dobles

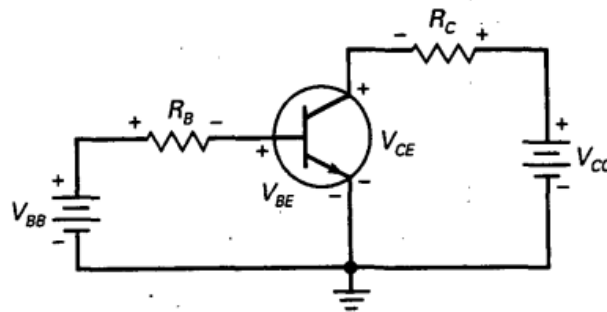
En los circuitos de transistores se usa notación de doble subíndice. Cuando los subíndices son iguales, la tensión representa una fuente (V_{BB} y V_{CC}).

Cuando los subíndices son diferentes representan las tensiones entre dos puntos (V_{BE} y V_{CE}).

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_{CB} = V_C - V_B$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$

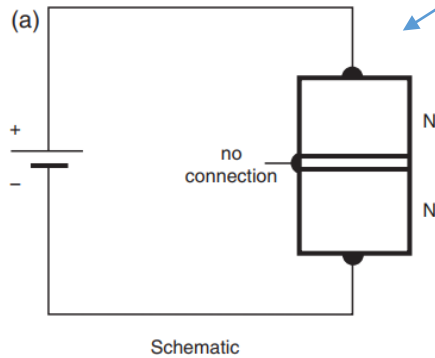


Los subíndices simples se usan para las tensiones de los nodos, es decir, tensiones entre el punto del subíndice y masa.

Los subíndices en mayúsculas indican valores DC.

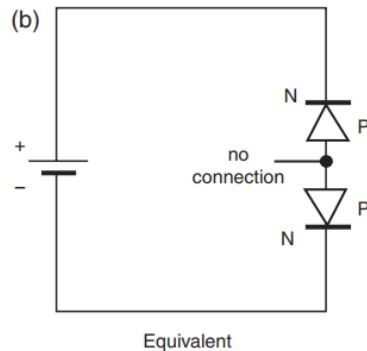
Funcionamiento BJT

Considerando el transistor NPN conectado como se indica en la figura



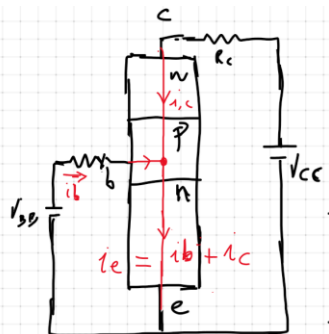
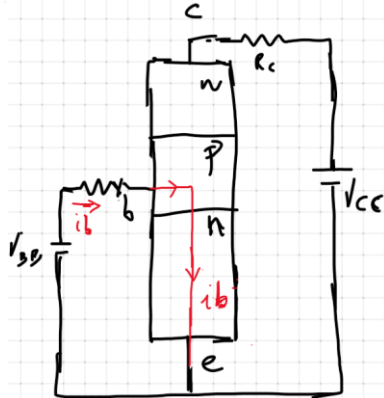
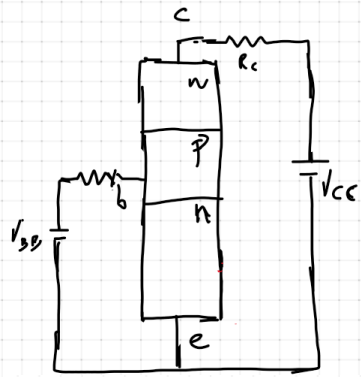
Si no se aplica tensión en la base o, con polarización inversa entre la base y el emisor, no hay portadores en la unión base-emisor.

La tensión inversa entre el colector y la base hace que tampoco fluya corriente en la unión base-colector.

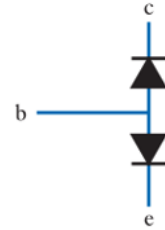


Para que el transistor pueda operar correctamente como amplificador, **deben ser polarizadas correctamente las dos uniones pn** con fuentes de tensión externas.

Funcionamiento BJT (Región Activa)



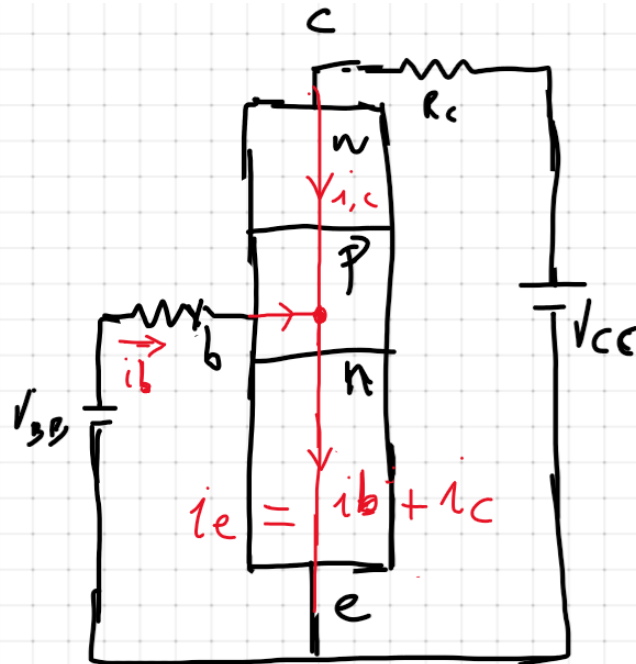
- 1) V_{BB} polariza en directa el diodo base-emisor $V_{be} > 0,7V$
 V_{CC} polariza en inversa el diodo base-colector



- 2) I_b fluye hacia el emisor (electrones desde el emisor hacia la base)
- 3) Los electrones se agolpan (apelotonan) en la base que es muy estrecha por fabricación
- 4) Los electrones acumulados en la base pueden pasar al colector, creando un movimiento de e^- del emisor al colector.

Funcionamiento BJT (Región Activa)

5) La corriente de colector I_C depende del proceso de fabricación del transistor (dopados n y p).



Se cumple la ecuación más importante del transistor definida por la constante **Beta** o H_{FE} (**H**ybrid **p**arameter **F**orward current gain common **E**mitter) y es una medida de la ganancia en corriente en DC que presenta el transistor

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

β es una característica de cada transistor.
Puede variar entre 5 – 500

6) La corriente de emisor (I_E) es la suma de la corriente de base (I_B) más la corriente de colector (I_C).

$$I_E = I_B + I_C$$

$I_C \gg I_B \rightarrow$ Amplificación $\beta \sim 100$ (peta)

$I_C = \beta I_B$ $I_C \sim 100 I_B$ (I_C es siempre mucho mayor que I_B)

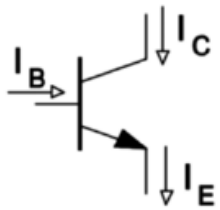
$I_E \approx I_C$ $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$ (alfa)

$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \sim 0,99$

Funcionamiento BJT

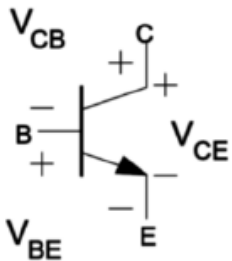
➤ Se cumplen las leyes de Kirchhoff en el transistor.

■ De corrientes:



$$I_E = I_B + I_C$$

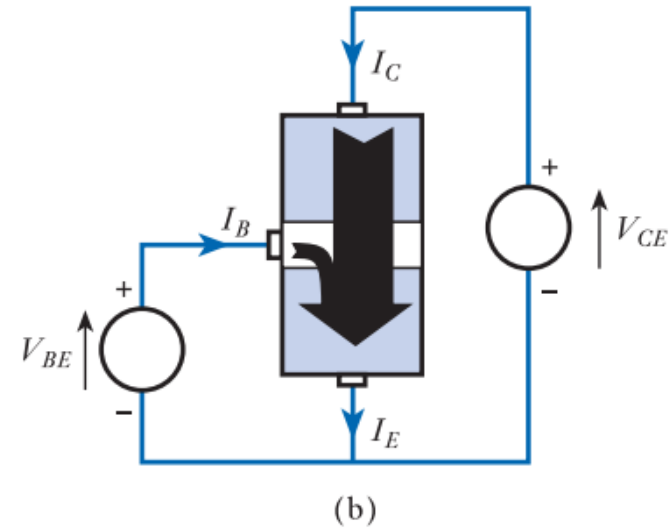
■ De tensiones:



$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

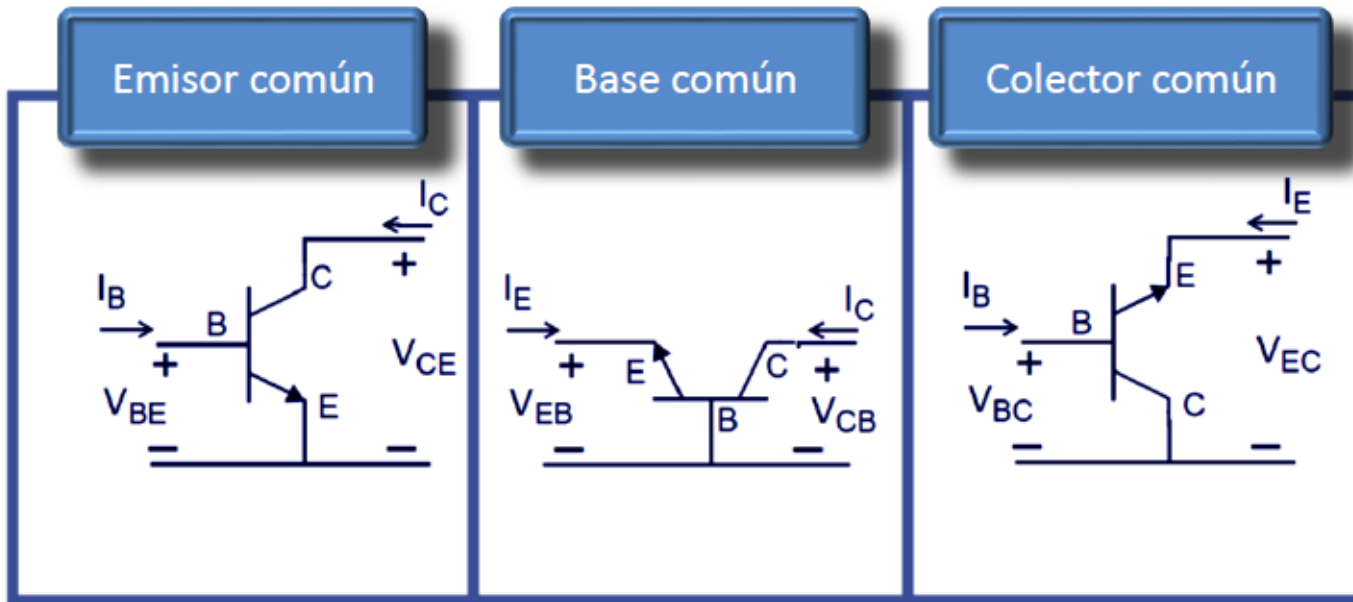
$$V_{CE} = V_C - V_E$$

$$V_{BE} = V_B - V_E$$



Funcionamiento BJT

- Polarizamos el BJT con dos fuentes de tensión o corriente para conseguir las diferentes formas de operación del dispositivo.
- Dependiendo qué terminal escogido para que sea común a las tensiones, existen 3 posibles configuraciones:



- La más usada con diferencia es la configuración en *emisor común*, que será la que veremos nosotros.

Funcionamiento BJT

❑ Zonas de funcionamiento o regiones de operación (2 diodos = 4 configuraciones):

1. **Activa**: Unión B-E en directa y unión B-C en inversa.

Uso: Amplificador



b-c inversa

b-e directa

2. **Corte**: Ambas uniones inversamente polarizadas.

Uso: Conmutador (OFF)



b-c inversa

b-e inversa

3. **Saturación**: Ambas uniones directamente polarizadas.

Uso: Conmutador (ON)



b-c directa

b-e directa

4. **Activa inversa**: Unión B-E en inversa y unión B-C en directa.

No se suele utilizar en la práctica.



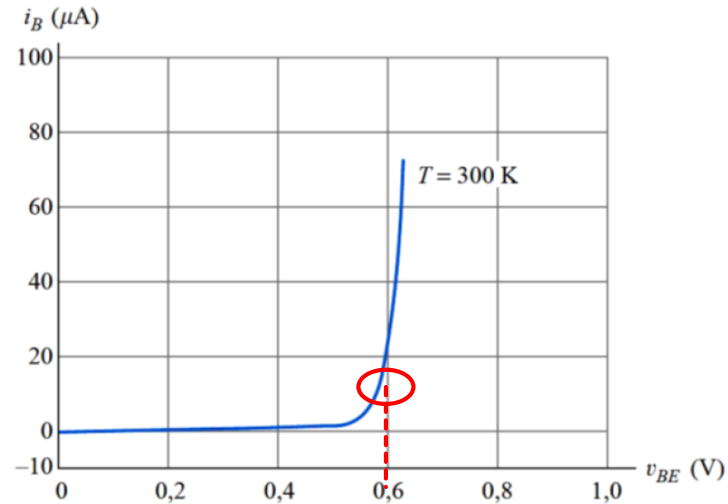
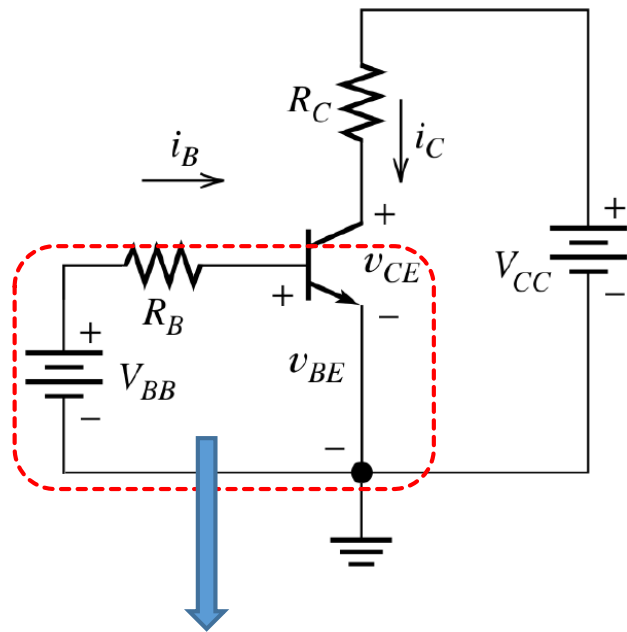
b-c directa

b-e inversa

Funcionamiento BJT

Curvas características emisor común NPN:

Curva característica de entrada: Idéntica a la curva característica del diodo.



(Ley de tensiones de Kirchhoff)

$$V_{BB} = I_B \cdot R_B + V_{BE} \rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$E_{ejemplo} = \frac{2V - 0,7V}{100k\Omega} = 13 \mu A$$

-6
10⁶ micro
↑

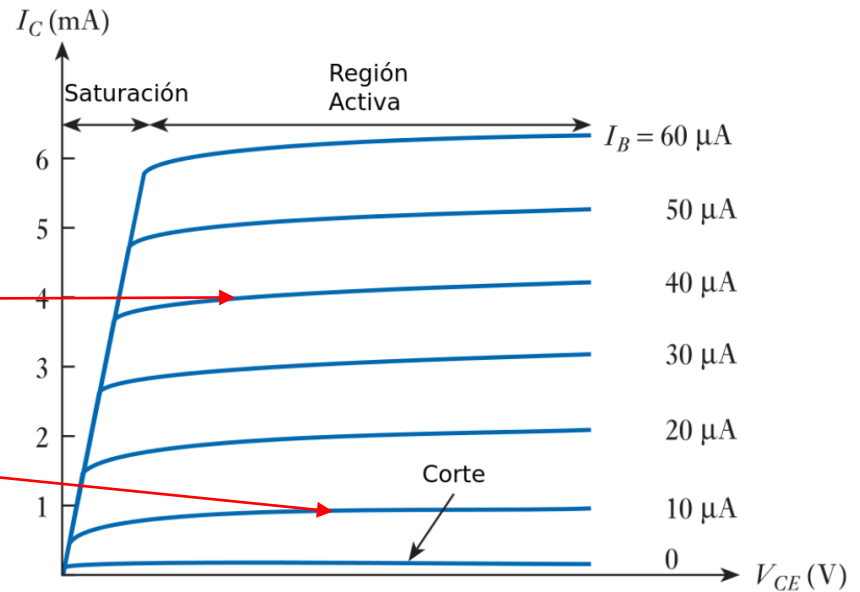
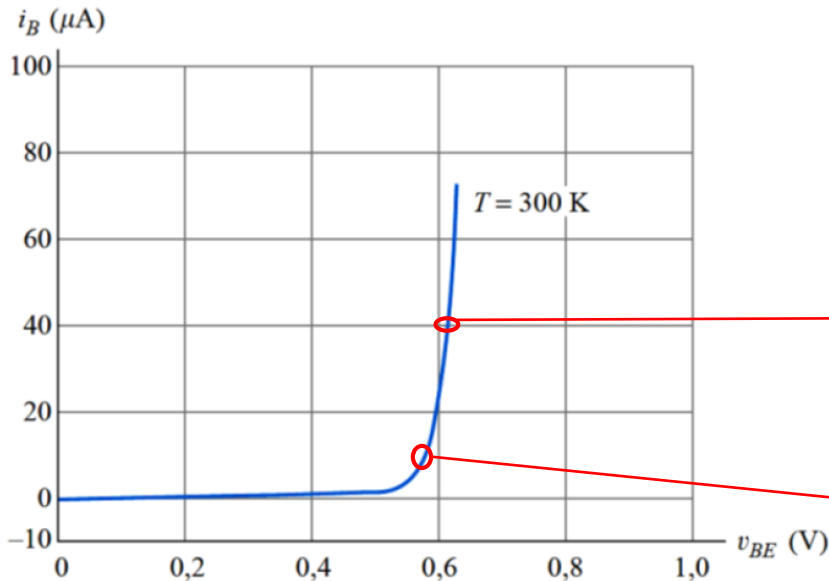
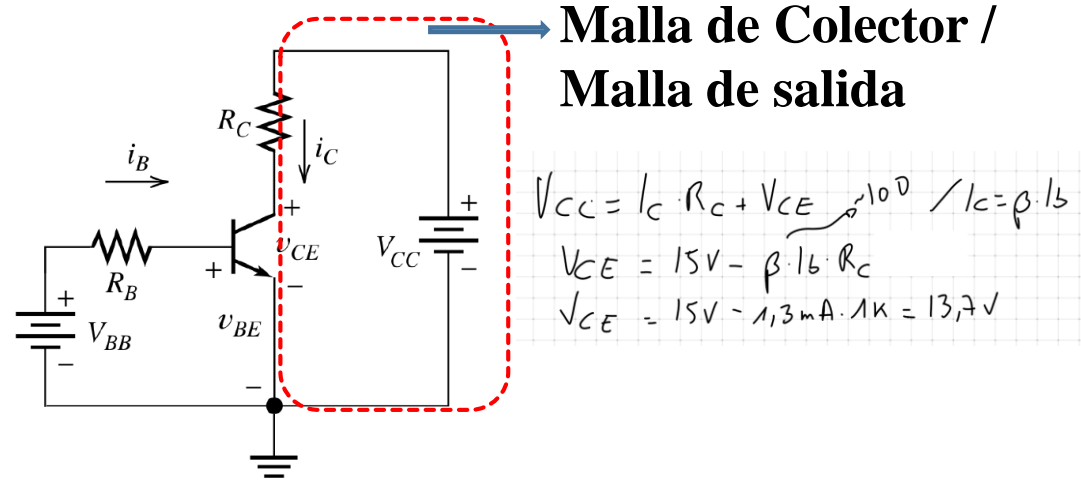
Malla de Base / Malla de entrada →

Funcionamiento BJT

Curvas características emisor común NPN:

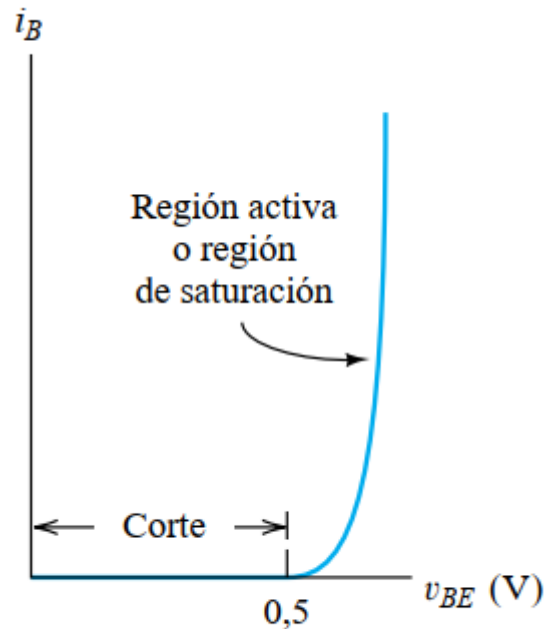
Curva característica de salida.

Para cada valor de I_B en la entrada, tenemos un valor de I_C en la salida

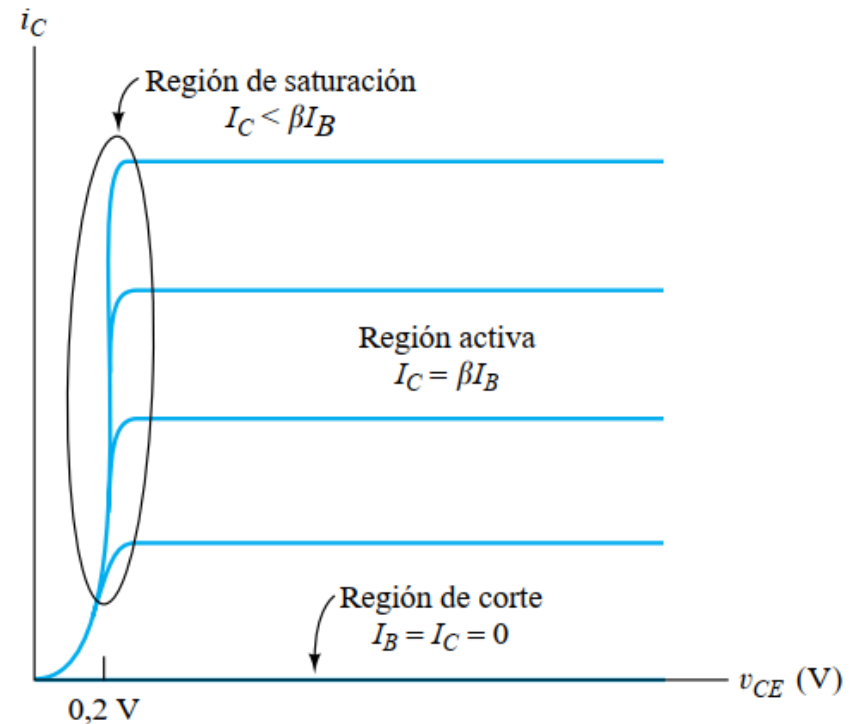


Funcionamiento BJT

Curvas características emisor común NPN:

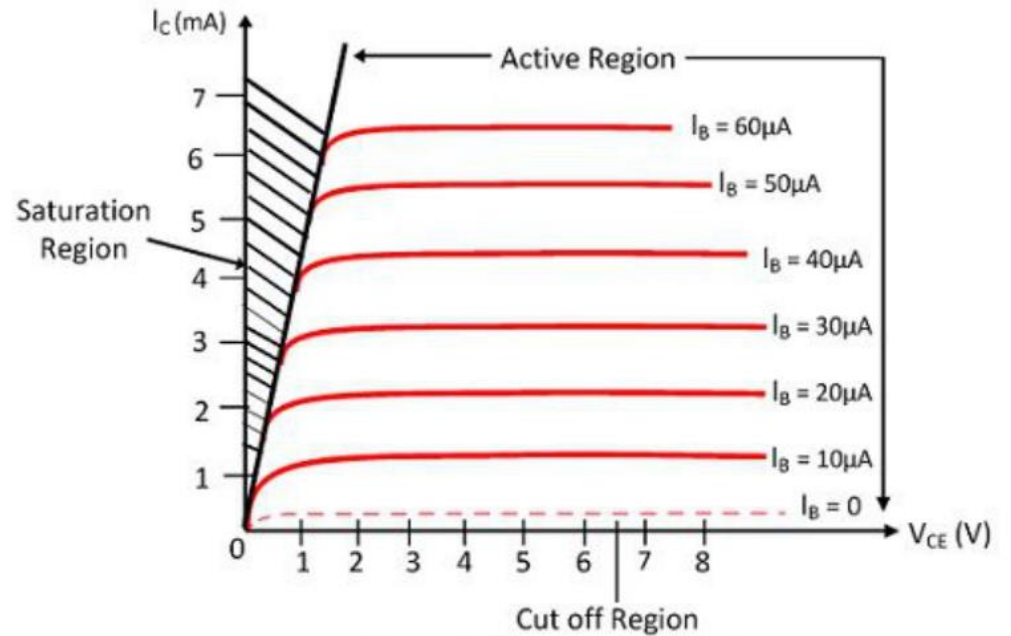
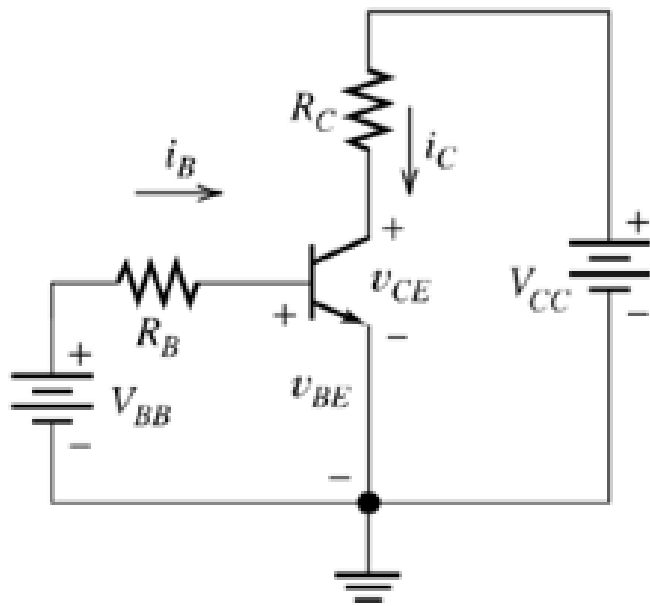


(b) Curvas características de entrada



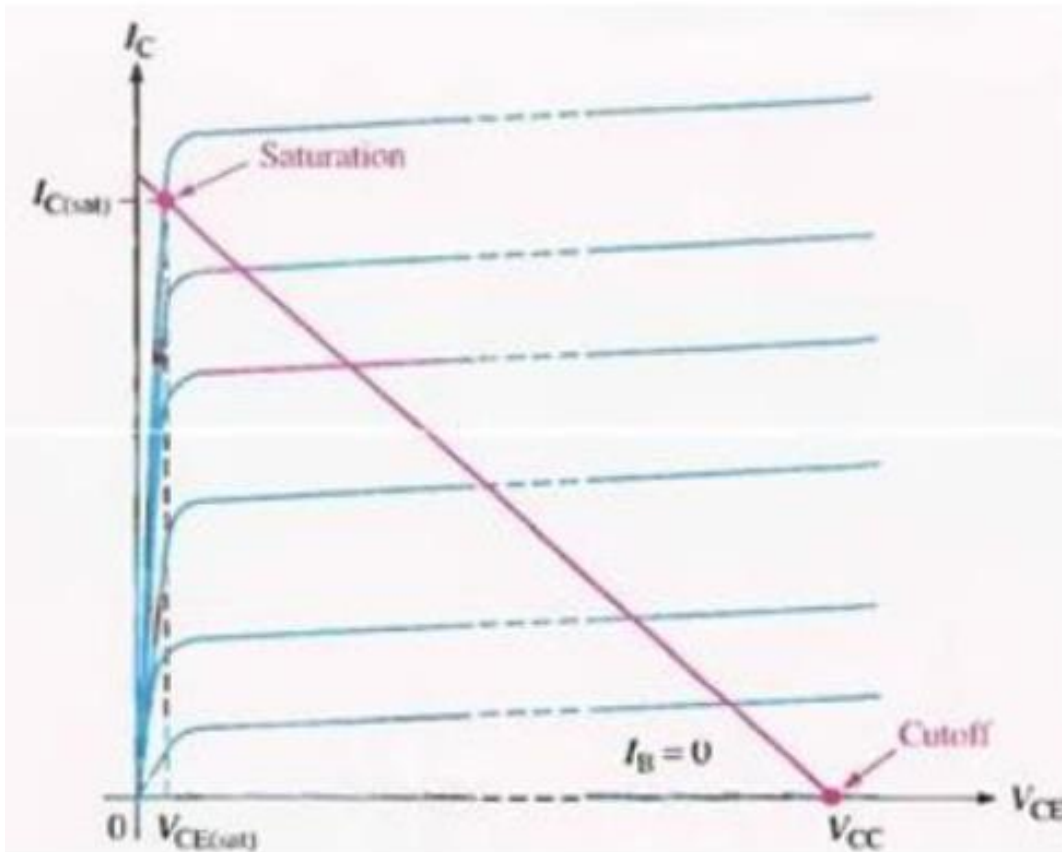
(a) Curvas características de salida

Curvas características de salida (Emisor común)



Funcionamiento BJT

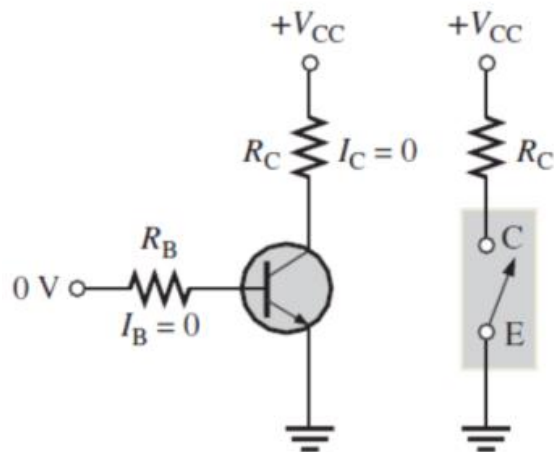
Las regiones de **corte** (cut-off), **saturación** (saturation) y **activa** (active) se ilustran en relación a la curva característica del transistor mediante la **recta de carga**.



- La parte inferior de la recta de carga es la **región de corte**, donde $I_C = 0$ y $V_{CE} = V_{CC}$.
- La parte superior de la recta de carga es la **región de saturación**, donde $I_C = I_{C(sat)}$ y $V_{CE} = V_{CE(sat)}$.
- Entre la región de corte y saturación, a lo largo de la línea de carga, el transistor está en la **región activa**.

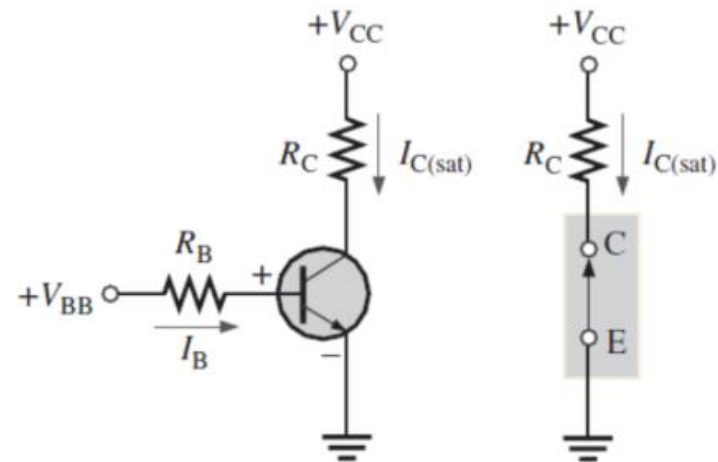
BJT como conmutador

- Cuando el transistor se utiliza como un **conmutador electrónico**, normalmente se opera alternativamente entre las **regiones de corte y saturación**.
- Los circuitos digitales hacen uso extensivo de los transistores como conmutadores.



(a) Corte-interruptor abierto

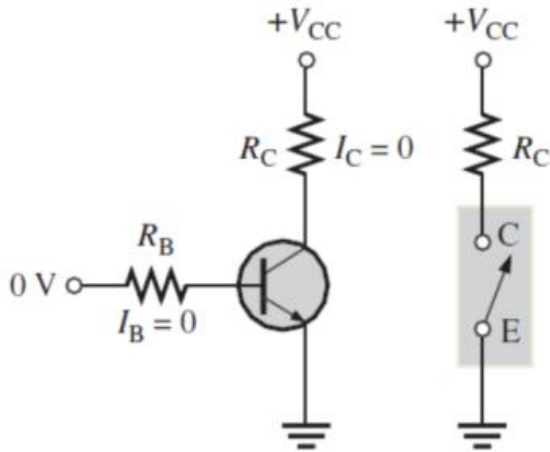
(a) La unión base-emisor no está polarizada en directa, por lo que $I_B = 0$.



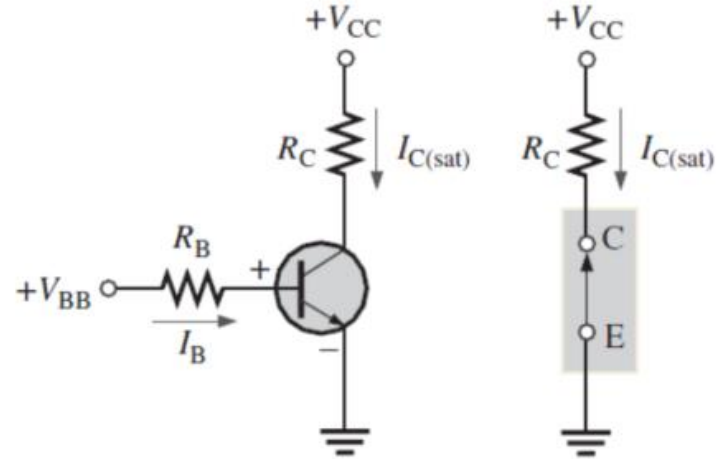
(b) Saturación-interruptor cerrado

(b) La corriente de base que se introduce es suficientemente alta como para causar al colector alcanzar su región de saturación.

BJT como conmutador



(a) Corte-interruptor abierto



(b) Saturación-interruptor cerrado

Condición de corte:

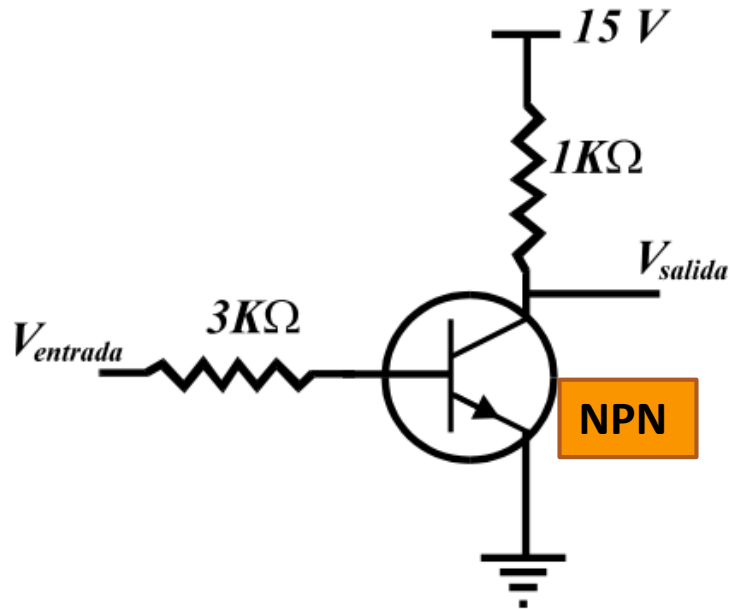
$$V_{ce}(\text{cut-off}) = V_{cc}$$

Condición de saturación:

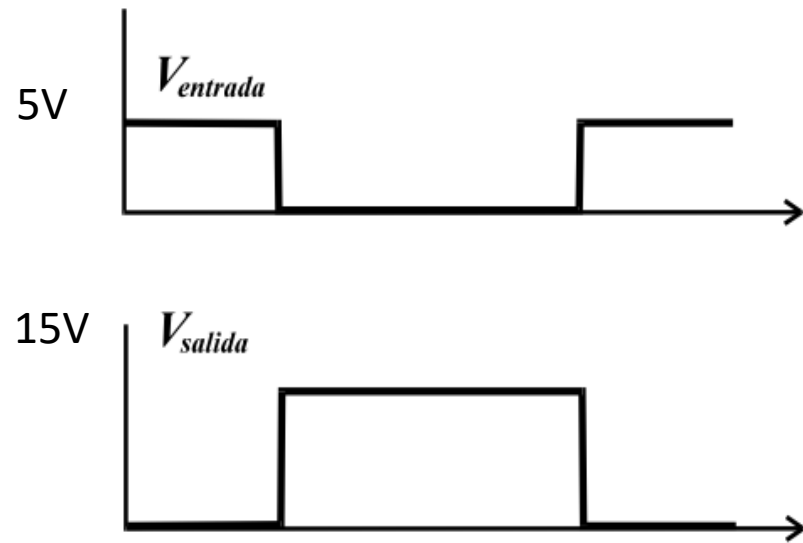
$$I_{c(sat)} = \frac{V_{cc} - V_{ce(sat)}}{R_c} \approx \frac{V_{cc}}{R_c}$$

$$I_{b(min)} = \frac{I_{c(sat)}}{\beta} = \frac{V_{cc}}{\beta \cdot R_c}$$

BJT como conmutador



Lógica inversa



- Cuando $V_{\text{entrada}} = 5V$, el transistor está en la región de saturación y parece un circuito cerrado. $V_{\text{salida}} = 0V$.

$$I_B = \frac{5V - 0.7V}{3K\Omega} = 1.43mA$$

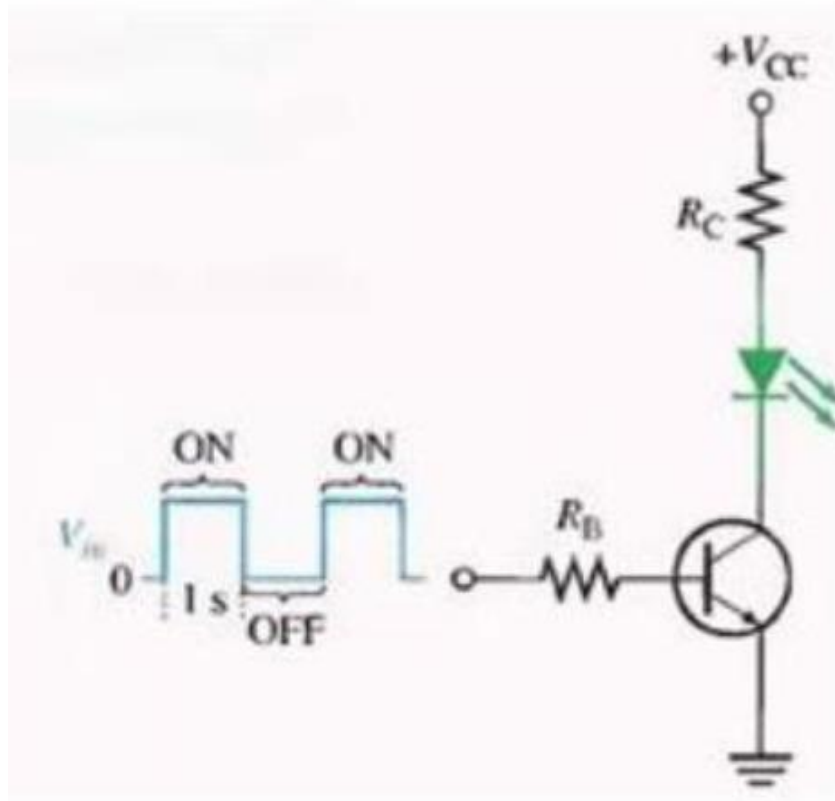
$$I_{C(sat)} = \frac{15V}{1k\Omega} = 15mA$$

$I_{C(sat)}$ es 10 veces mayor que I_B , suficiente para hacer entrar al transistor en la región de saturación

- Cuando $V_{\text{entrada}} = 0V$, el transistor está en corte. $V_{\text{salida}} = 15V$.

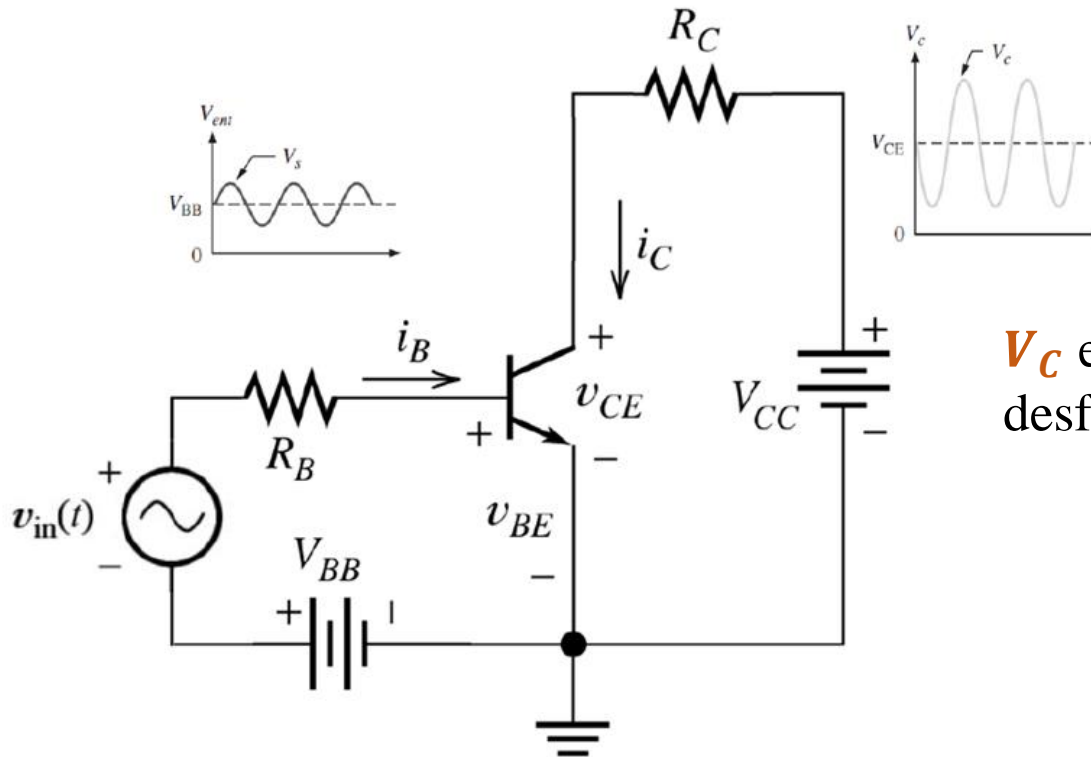
El transistor como conmutador

Un circuito sencillo con el transistor como conmutador para encender o apagar un LED.



BJT como amplificador

□ Amplificador en emisor común NPN:



V_C es una versión amplificada de V_B y desfasada 180° (*invertida*).

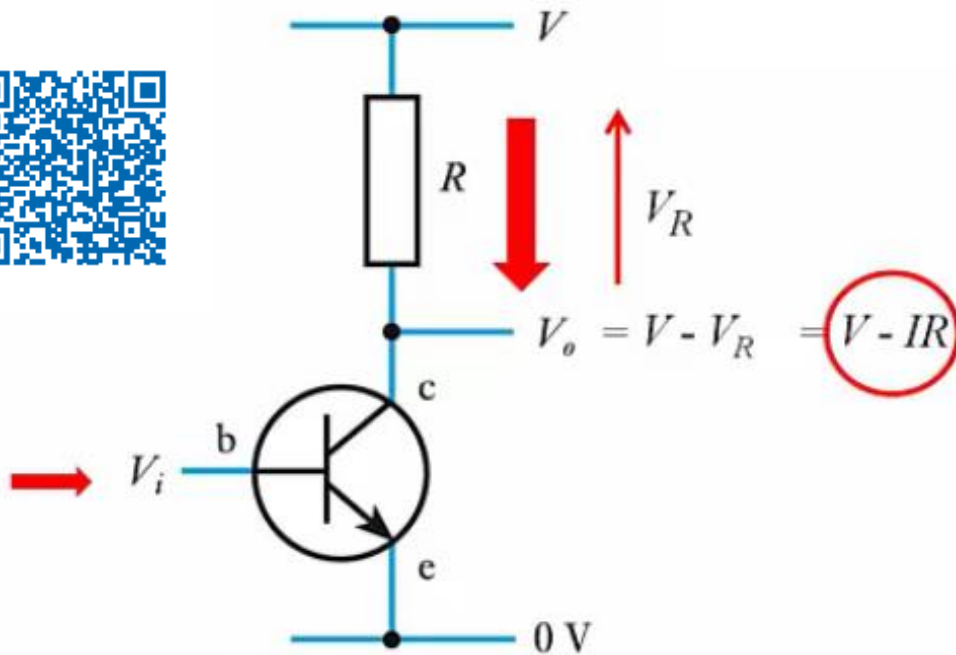
$$V_C = V_{CC} - i_C R_C$$

V_{BB} y V_{CC} deben **polarizar** el circuito en un **punto de trabajo** adecuado para que funcione como amplificador.

BJT como amplificador



Video 19A



Transistor Amplifica I_c

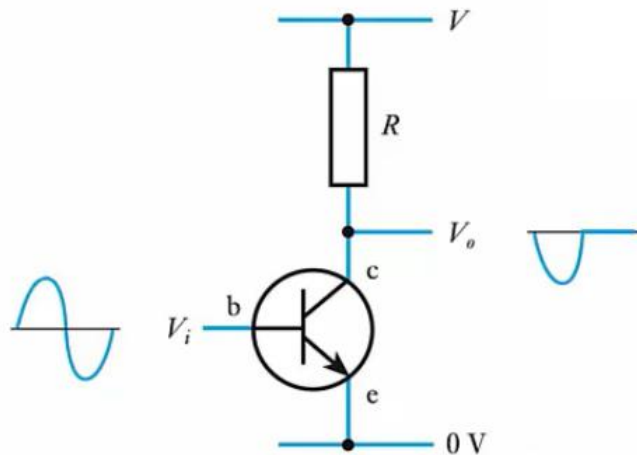
Si V_i (i_b) aumenta $\rightarrow I_c$ aumenta de forma amplificada ($I_c = \beta \cdot I_b$)

La caída de tensión en la resistencia es mayor y la salida V_o es menor.

Amplificador Inversor

Si V_i aumenta \rightarrow Salida V_o disminuye

BJT como amplificador



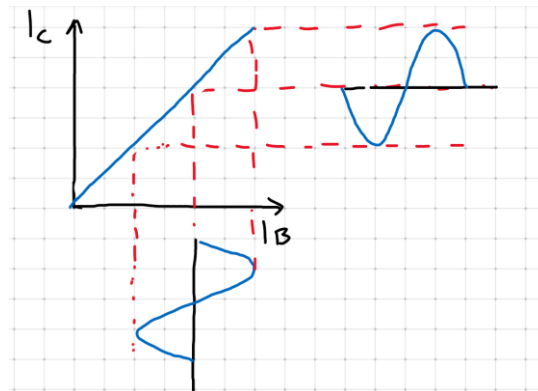
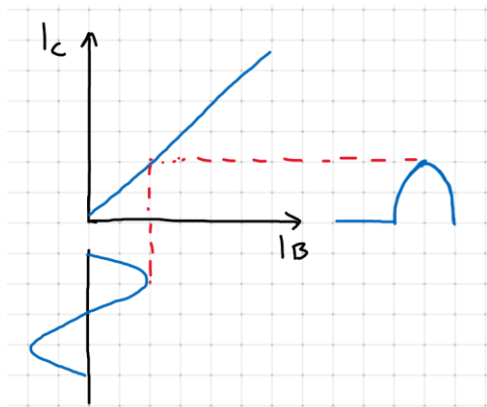
Vo invertida

Semiciclo positivo: $V_i > 0.7\text{v} \rightarrow V_o \sim -V_i$

Semiciclo negativo: $V_i < 0.7\text{v} \rightarrow V_o = 0$

Si $V_i < 0.7$ el transistor no conduce (OFF).

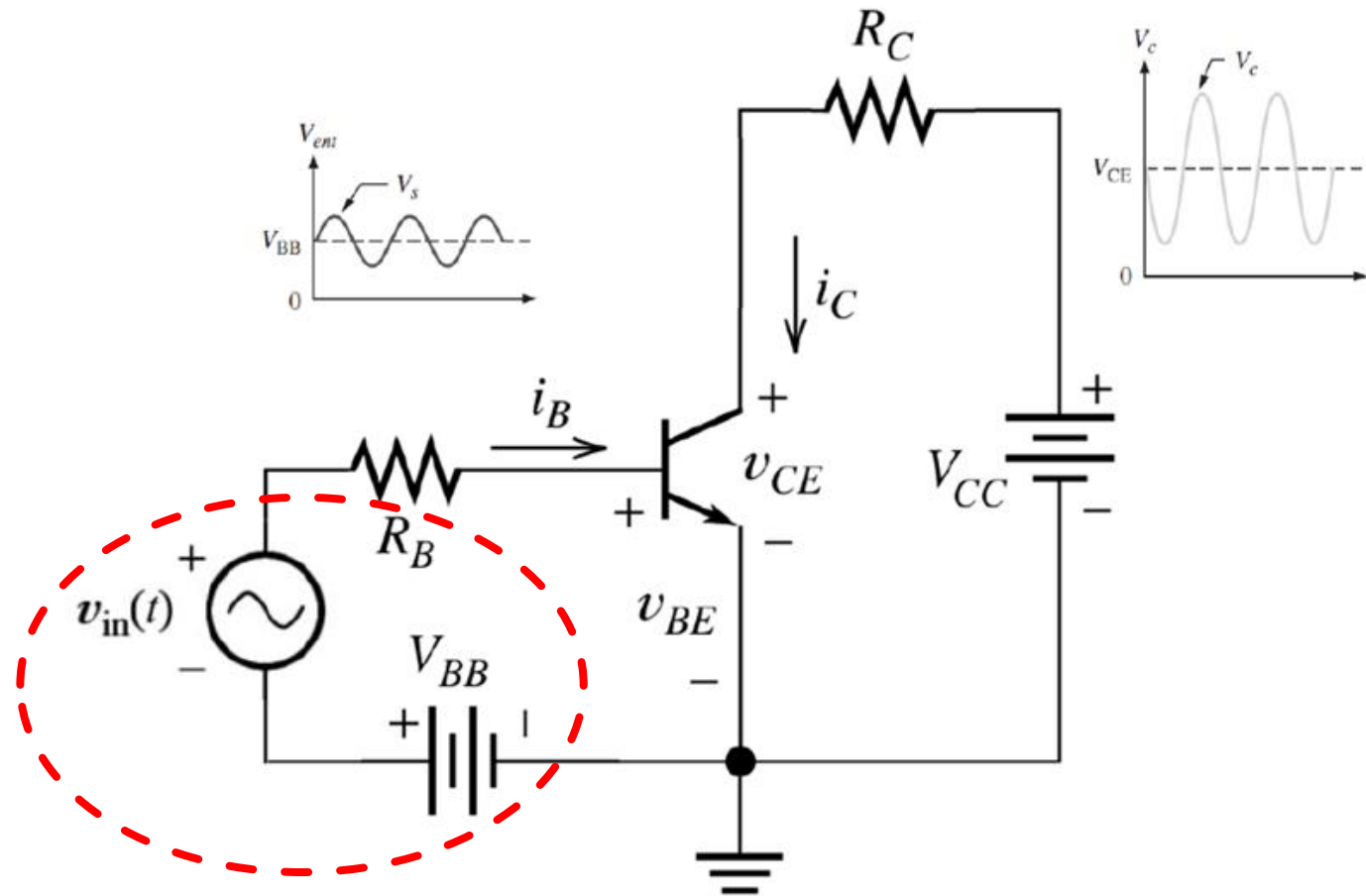
La salida V_o está representada por la corriente en el colector I_c



La solución es establecer un offset en la corriente de entrada.

Es equivalente a añadir una corriente constante en la entrada y sobre ella variar la entrada V_i

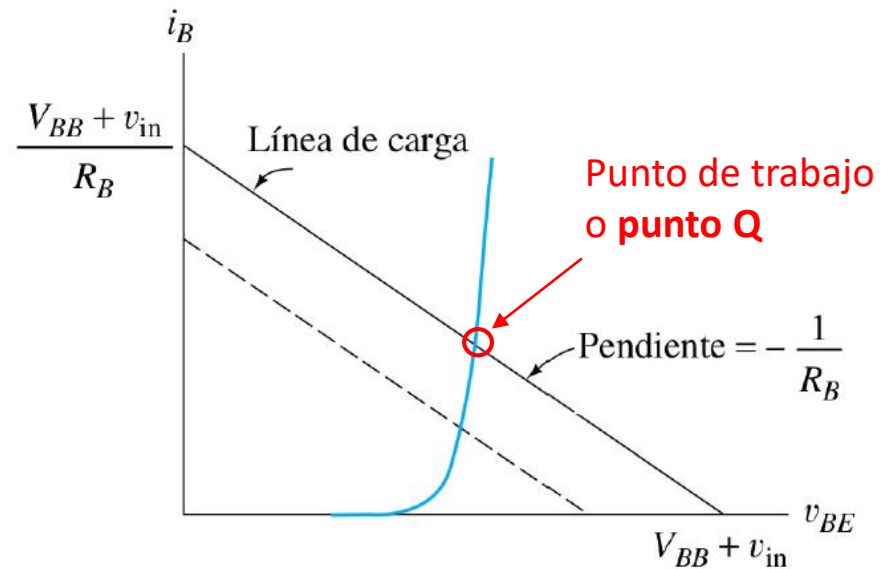
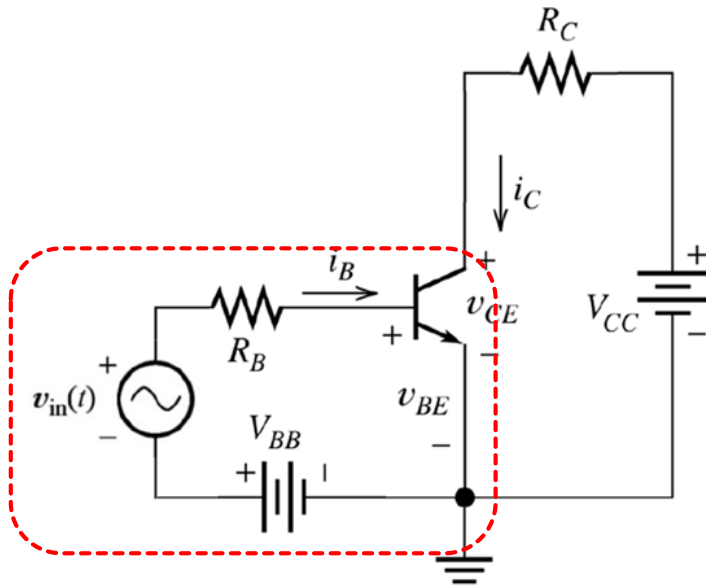
BJT como amplificador



BJT como amplificador

□ Línea de carga de la entrada:

- Aplicando Kirchhoff: $V_{BB} + v_{in}(t) = R_B i_B(t) + V_{BE}(t)$

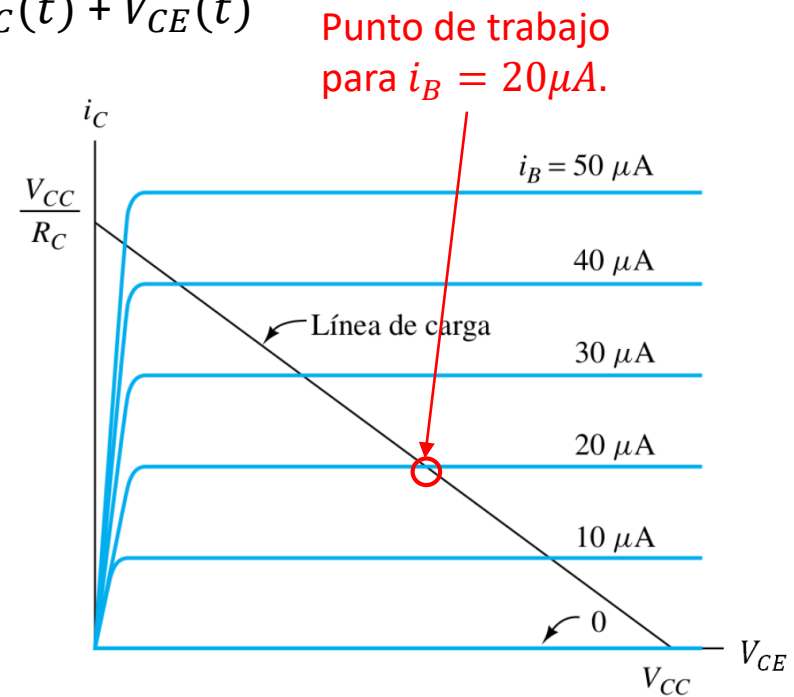
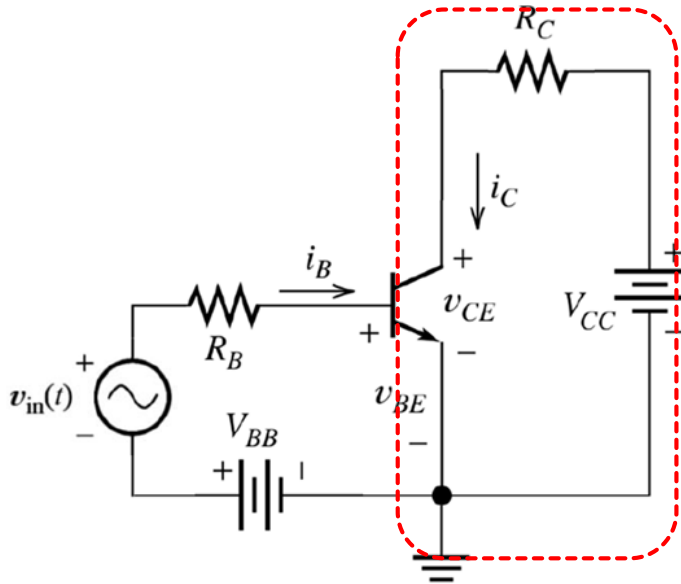


- Como $v_{in}(t)$ es una señal CA, cuando aumenta la línea de carga se desplaza de forma paralela hacia arriba y cuando disminuye al contrario.

BJT como amplificador

□ Línea de carga de la salida:

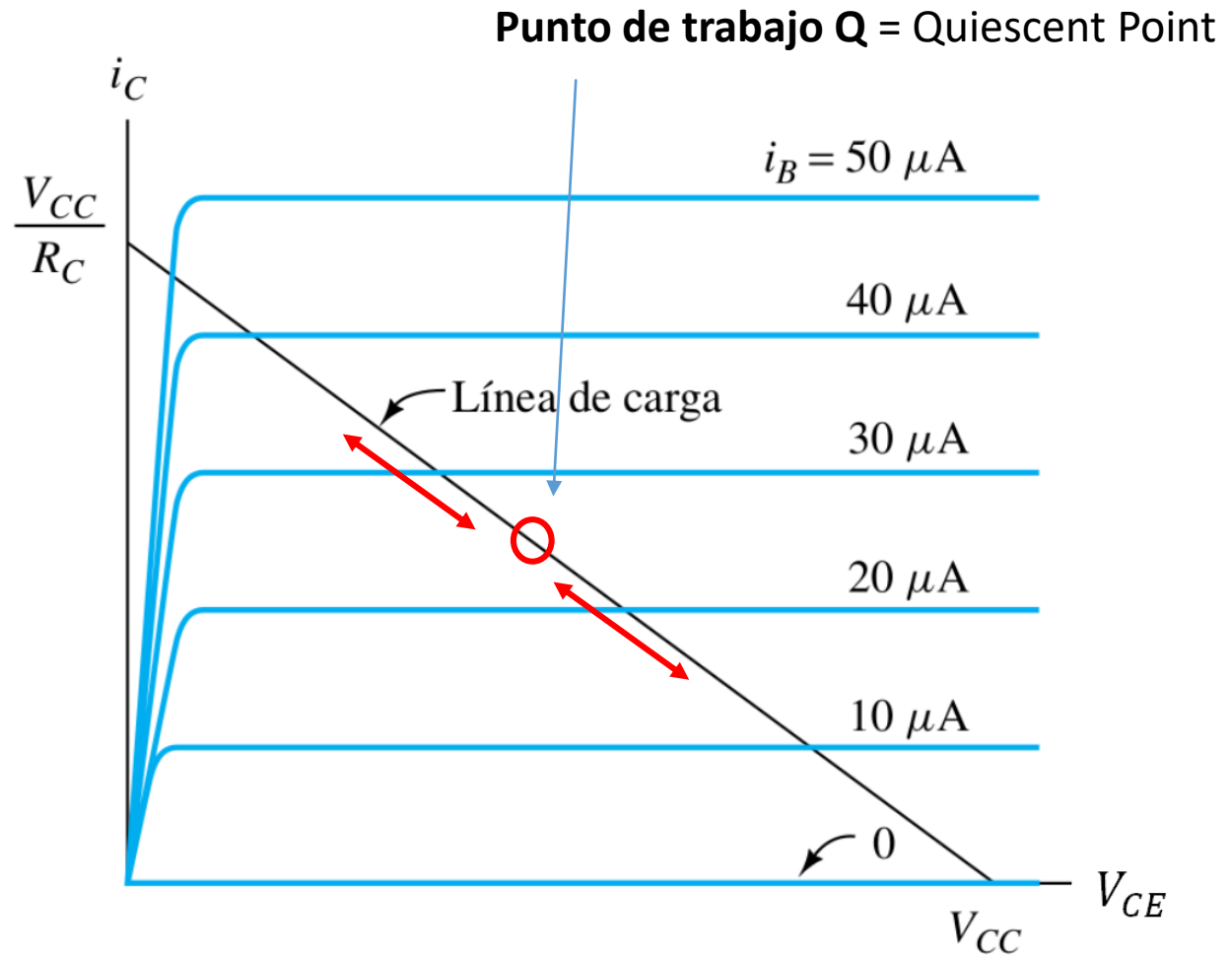
➤ Aplicando Kirchhoff: $V_{CC} = R_C i_C(t) + V_{CE}(t)$



➤ Si $v_{in}(t)$ cambia i_B cambia y Q oscila arriba o abajo.

BJT como amplificador

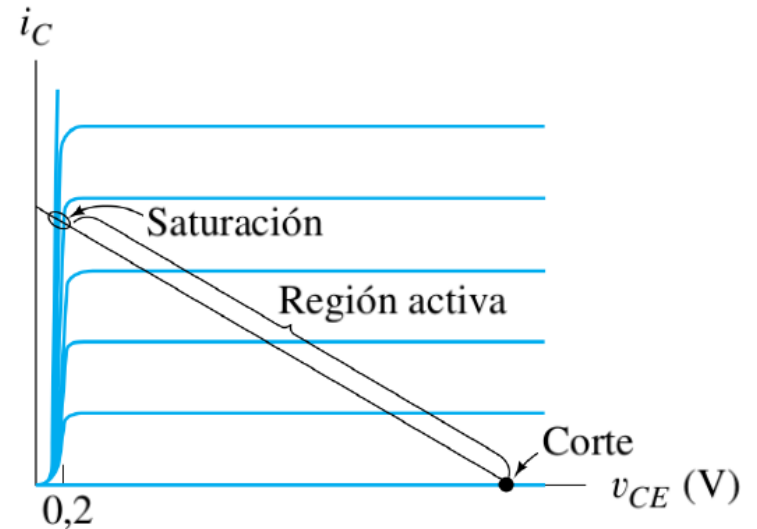
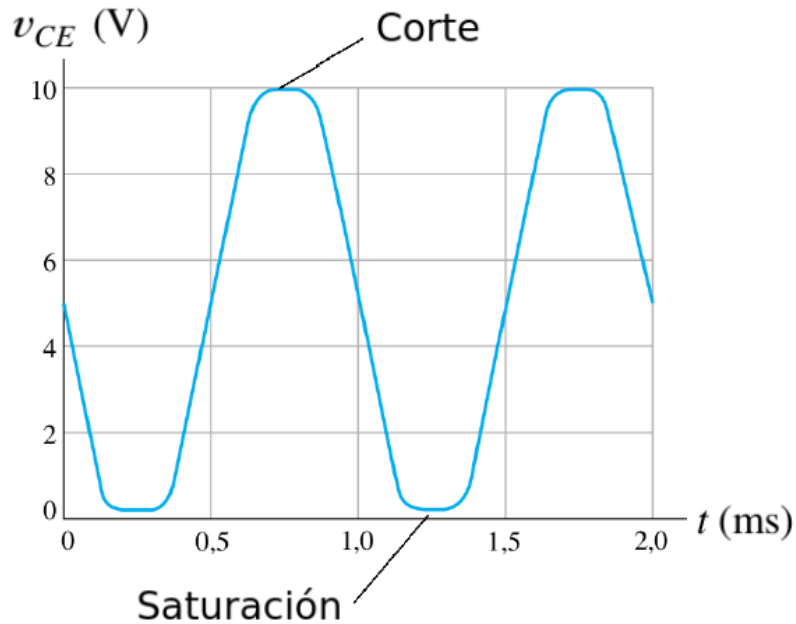
La otra aplicación principal de los transistores es la **amplificación lineal**



Punto de trabajo Q **en el centro de la región activa** permite evitar alcanzar saturación o corte cuando la corriente en la entrada cambia.

BJT como amplificador

- **Distorsión:** Recorte si la oscilación alcanza saturación ($V_{CE} \sim 0,2V$) o corte ($I_C = 0$)



Cómo Leer la Hoja de Características

6-8. CÓMO LEER LA HOJA DE CARACTERÍSTICAS

Los *transistores de pequeña señal* pueden disipar un vatio o menos; los transistores de potencia pueden disipar más de un vatio. Cuando se estudia la hoja de características para cualquiera de estos dos tipos de transistor, se debe comenzar por las limitaciones máximas, ya que son los límites para las corrientes, tensiones y otros valores del transistor.

❑ Limitaciones en la zona de ruptura

En el Apéndice se dan los siguientes límites máximos para un 2N3904:

V_{CB}	60 V
V_{CEO}	40 V
V_{EB}	6 V

❑ Corriente y potencia máximas

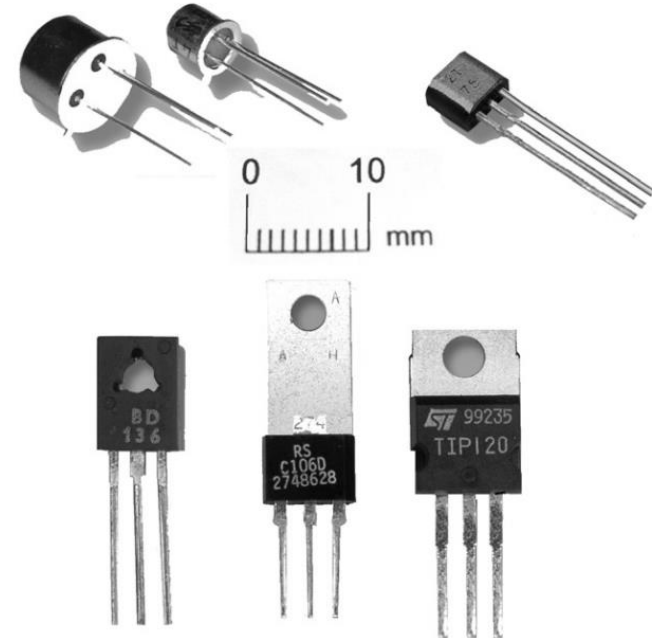
También se muestran como límites máximos estos valores:

I_C	200 mA dc	
P_D	625 mW	(para $T_A = 25\text{ °C}$)
P_D	1,5 W	(para $T_C = 25\text{ °C}$)

En la mayoría de las aplicaciones, un transistor de pequeña señal como el 2N3904 no está refrigerado y no tiene un radiador de calor. En este caso, el 2N3904 tiene una limitación de potencia de 625 mW cuando la temperatura ambiente es 25 °C.

La temperatura T_C es la temperatura de la cápsula que contiene el transistor. En la mayoría de las aplicaciones, la temperatura de la cápsula será mayor que 25 °C porque el calor interno del transistor aumenta la temperatura del encapsulado.

Sin disipadores, corrientes pequeñas



❑ Disipadores de calor

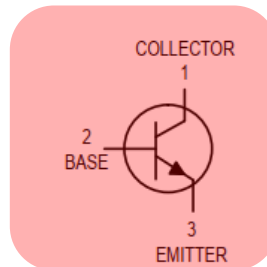
Con disipadores, Corrientes elevadas,
Transistores de potencia

Cómo Leer la Hoja de Características

MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

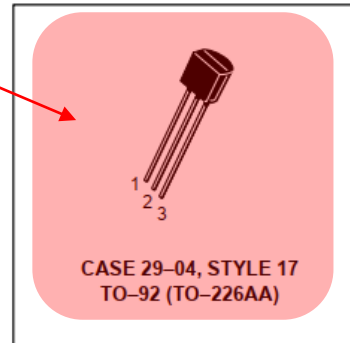
Order this document
by BC546/D

Amplifier Transistors NPN Silicon



BC546, B
BC547, A, B, C
BC548, A, B, C

Identificación de transistor (part number)



Identificación de terminales

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC 546	BC 547	BC 548	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CEO}	65	45	30	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	80	50	30	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	6.0			Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	100			mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625	5.0		mW mW/°C
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5	12		Watt mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150			°C

Límites máximos

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

Cómo Leer la Hoja de Características

Philips Semiconductors

Product specification

NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

FEATURES

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

APPLICATIONS

- Linear amplification and switching.

DESCRIPTION

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.
PNP complement: 2N2907A.

PINNING

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

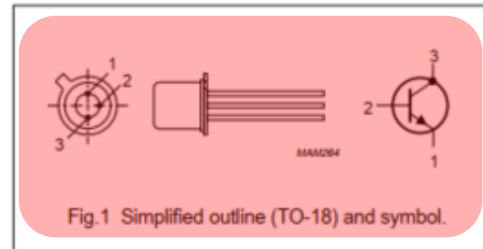


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CB0}	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V_{CE0}	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
I_C	collector current (DC)		–	800	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	–	500	mW
h_{FE}	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
f_T	transition frequency	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$			
	2N2222		250	–	MHz
	2N2222A		300	–	MHz
t_{off}	turn-off time	$I_{C1} = 150\text{ mA}; I_{C2} = 15\text{ mA}; I_{B1} = 15\text{ mA}$	–	250	ns

Modelo de Gran Señal

➤ Para poder analizar los circuitos de forma sencilla y con rapidez, existen varios modelos equivalentes.

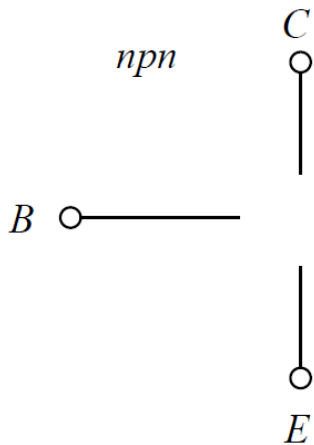
i) R. CORTE

$$v_{BE} < V_{\gamma}; \quad v_{BC} < V_{\gamma};$$

$$i_B = i_C = i_E = 0.$$

+ restrictivo:

$$v_{BE} < 0,5; \quad v_{BC} < 0,5;$$

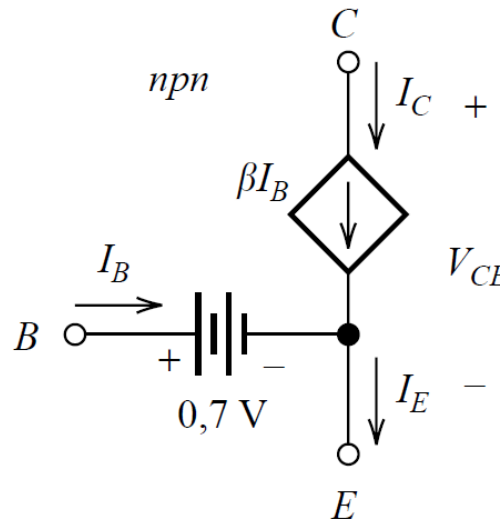


ii) R. ACTIVA

$$v_{BE} > V_{\gamma}; \quad v_{BC} < V_{\gamma};$$

$$i_B > 0; \quad v_{CE} > 0,2;$$

$$i_C = \beta i_B$$

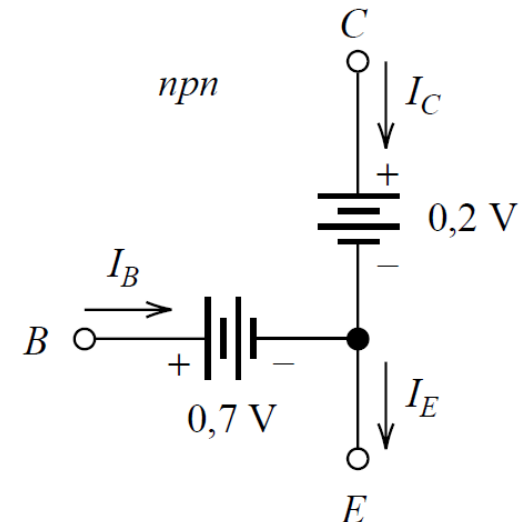


iii) R. SATURACIÓN

$$v_{BE} > V_{\gamma}; \quad v_{BC} > V_{\gamma};$$

$$i_B > 0; \quad v_{CE} = 0,2;$$

$$0 < i_C < \beta i_B$$



Modelo de Gran Señal

□ Resolución de circuitos:

- Paso 1: Suponer una región de funcionamiento para el bipolar.
- Paso 2: Resolver el circuito para hallar i_B , i_C y v_{CE} .
- Paso 3: Comprobar si los valores hallados en el paso 2 son coherentes con el estado de funcionamiento supuesto. Si es así, ya tenemos la solución; si no, volver al paso 1.

Modelo de Gran Señal

□ Ejemplo 1

Un determinado transistor que trabaja con polarización directa en la unión base-emisor y con polarización inversa en la unión base-colector (es decir, en activa), tiene $I_C = 9,5\text{mA}$ e $I_E = 10\text{mA}$. Hallar valores de I_B , α y β .

$$I_C = 9,5\text{mA} \quad I_E = 10\text{mA} \quad | \beta, \alpha, \beta$$

$$I_E = I_B + I_C \rightarrow I_B = 10\text{mA} - 9,5\text{mA} = 0,5\text{mA}$$

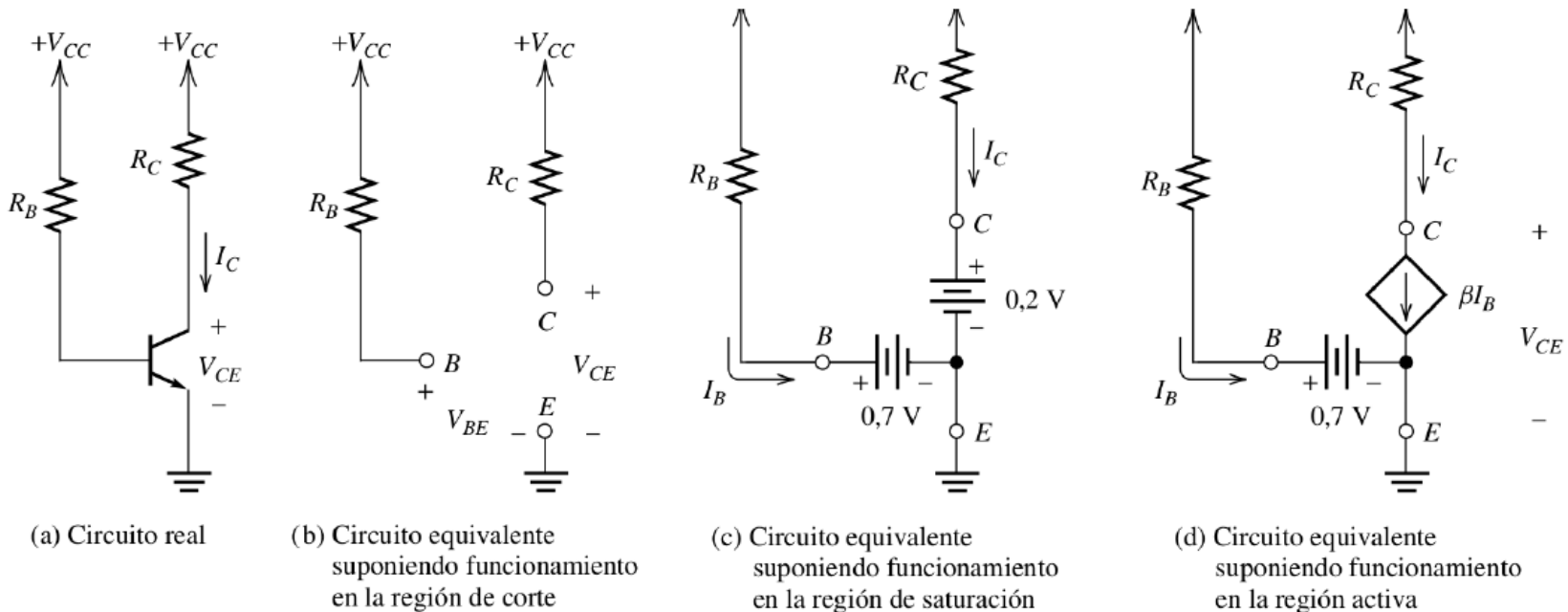
$$I_C = \beta \cdot I_B \rightarrow \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{9,5\text{mA}}{0,5\text{mA}} = 19$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{19}{20} = \underline{\underline{0,95}}$$

Modelo de Gran Señal

□ Ejemplo 2

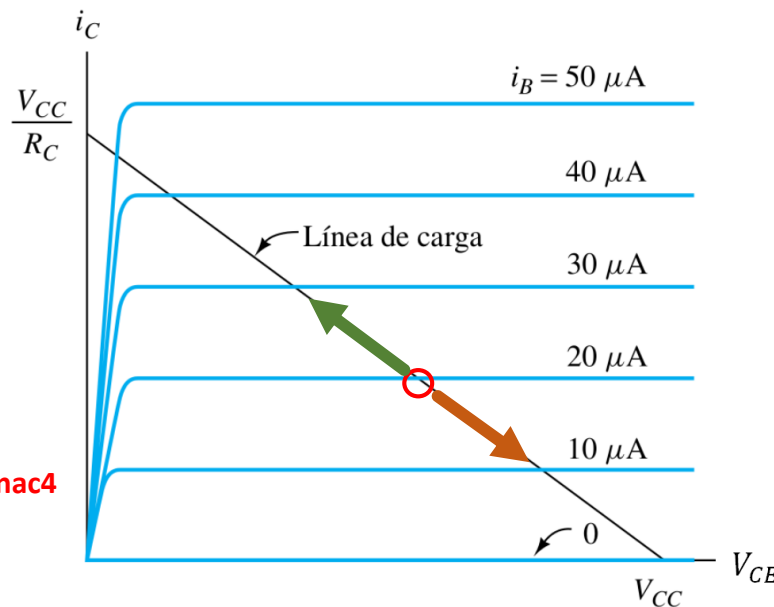
- En el circuito de polarización de continua de la figura se tiene que $R_B = 200k\Omega$, $R_C = 1k\Omega$ y $V_{CC} = 15V$. El transistor tiene una $\beta = 100$. Calcular i_C y v_{CE} .
- *Sol.: R. Activa; $i_C = 7,15mA$; $v_{CE} = 7,85V$.*



Modelo de Gran Señal

□ Ejemplo 2

- En el ejemplo anterior para $\beta = 100$ el punto de trabajo se encuentra, aproximadamente, en el centro de la línea de carga. Sin embargo, para $\beta = 300$, el punto de trabajo se va a la región de saturación.
- Para que se pueda utilizar este circuito como amplificador, necesitamos un punto Q en la región activa, en la que los cambios en la corriente de base causan que el punto de trabajo instantáneo se desplace hacia arriba y hacia abajo sin saturar.

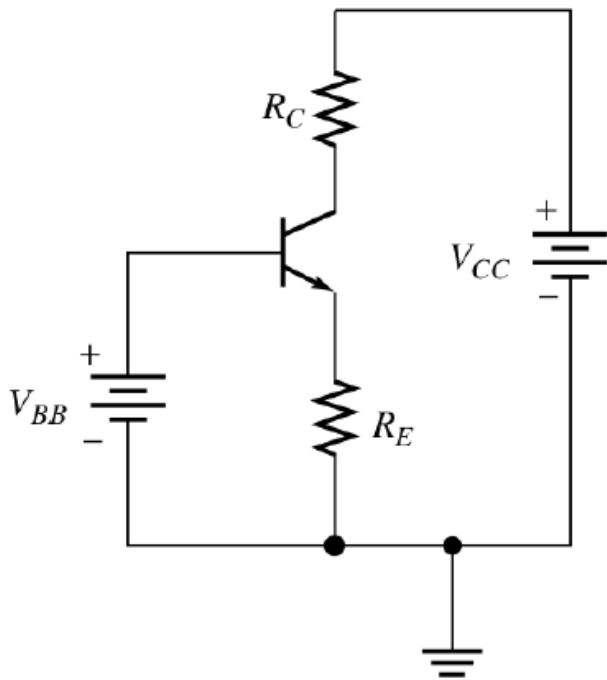


<https://www.youtube.com/watch?v=7ukDKVHnac4>

Modelo de Gran Señal

□ Ejemplo 3

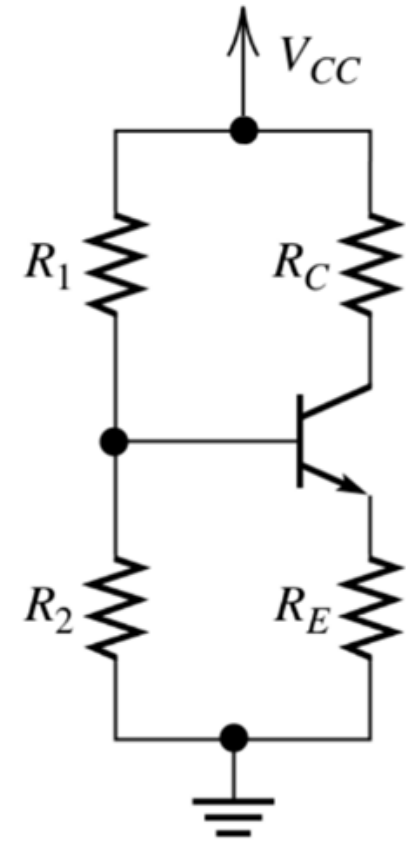
- Hallar i_C y v_{CE} en el circuito de la figura para $V_{CC} = 15V$, $V_{BB} = 5V$, $R_C = 2k\Omega$, $R_E = 2k\Omega$ y $\beta = 100$.
- *Sol.: R. Activa; $i_B = 21,3 \mu A$; $i_C = 2,13mA$; $v_{CE} = 6,44V$.*



- Repetir el ejemplo para $\beta = 300$.
- *Sol.: R. Activa; $i_B = 7,14 \mu A$; $i_C = 2,14mA$; $v_{CE} = 6,42V$.*

Circuito de polarización de 4 resistencias

- R_1 y R_2 forman un divisor de tensión que proporciona una tensión casi constante a la base (independientemente de la β del transistor).
- Esto se consigue eligiendo unos valores de R_1 y R_2 tales que las corrientes que pasen por ellos sean grandes comparadas con i_B .
- Como la Base no está conectada directamente a la alimentación o a masa, es posible acoplar a la base una señal de alterna a través de un condensador de acoplo.
- R_E estabiliza i_B frente a cambios en la ganancia.
- R_C determina v_{CE} y la recta de carga.



* Ahora solo usamos una fuente para polarizar BE y CE

Circuito de polarización de 4 resistencias

□ Ejemplo 4

- Usando el equivalente de Thévenin y el modelo de gran señal de región activa, demostrar que:

$$i_B = \frac{V_{BB} - v_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}; \quad v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C - i_E R_E;$$

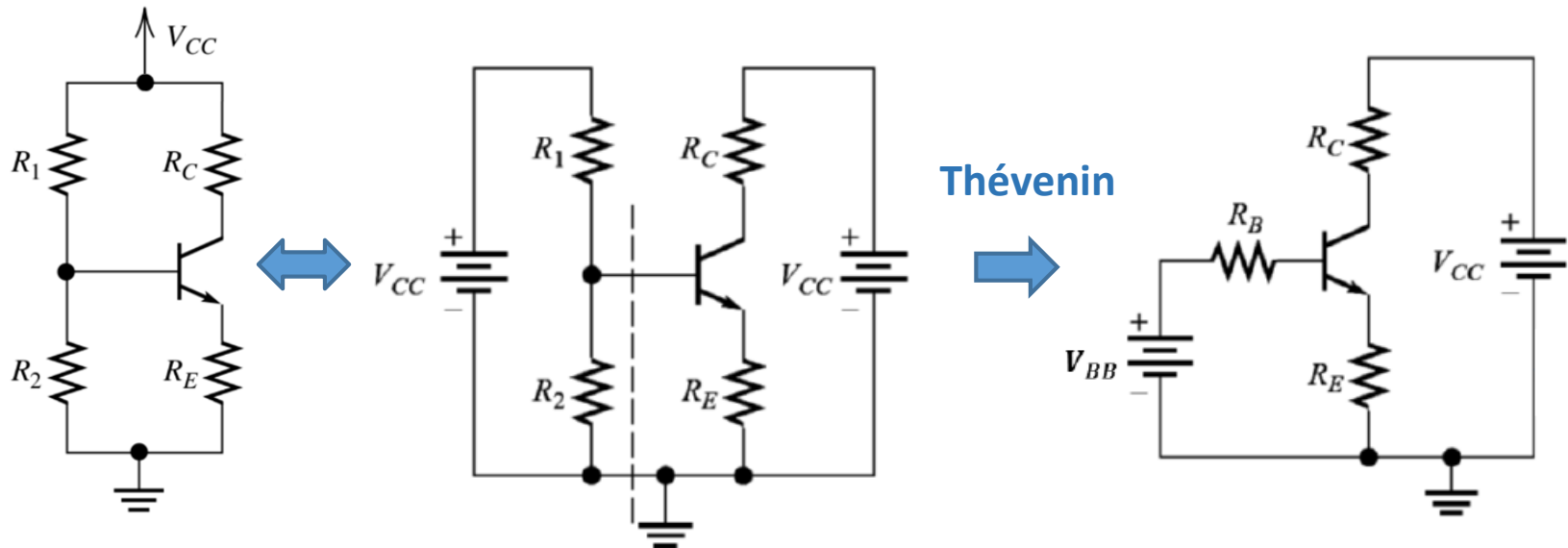
Circuito de polarización de 4 resistencias

□ Ejemplo 4

- Usando el equivalente de Thévenin y el modelo de gran señal de región activa, demostrar que:

$$i_B = \frac{V_{BB} - v_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}; \quad v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C - i_E R_E;$$

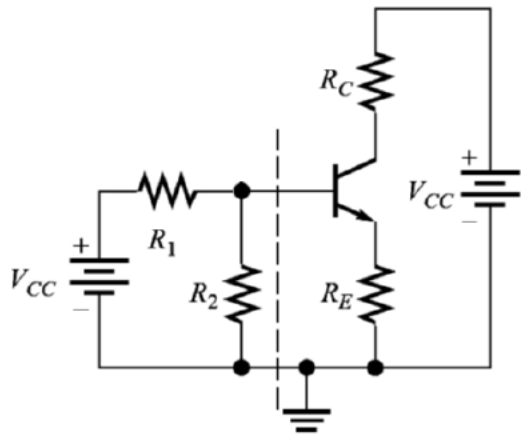
Transformo el circuito haciendo el equivalente de Thévenin:



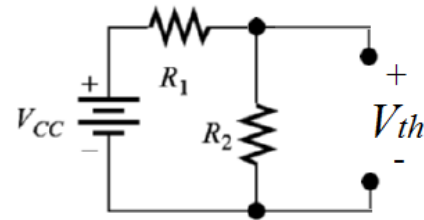
Circuito de polarización de 4 resistencias

□ Ejemplo 4

- Haría falta calcular la tensión y la resistencia de Thévenin para resolver cualquier circuito de este tipo.

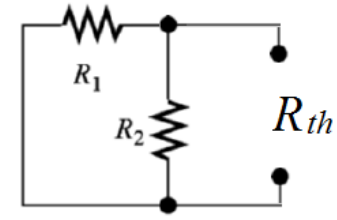


- V_{th} se obtiene con el circuito en Open Circuit (sin carga):

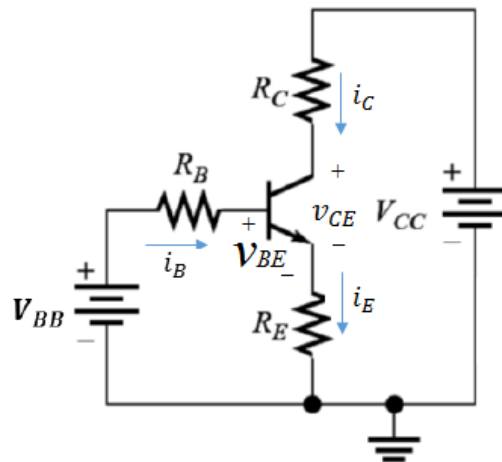


$$V_{th} = V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2};$$

- R_{th} se obtiene sustituyendo la fuente de DC por un corto circuito:



$$R_{th} = R_B = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



- Las ecuaciones que pide el ejercicio son deducibles directamente de las mallas de entrada y salida del circuito:

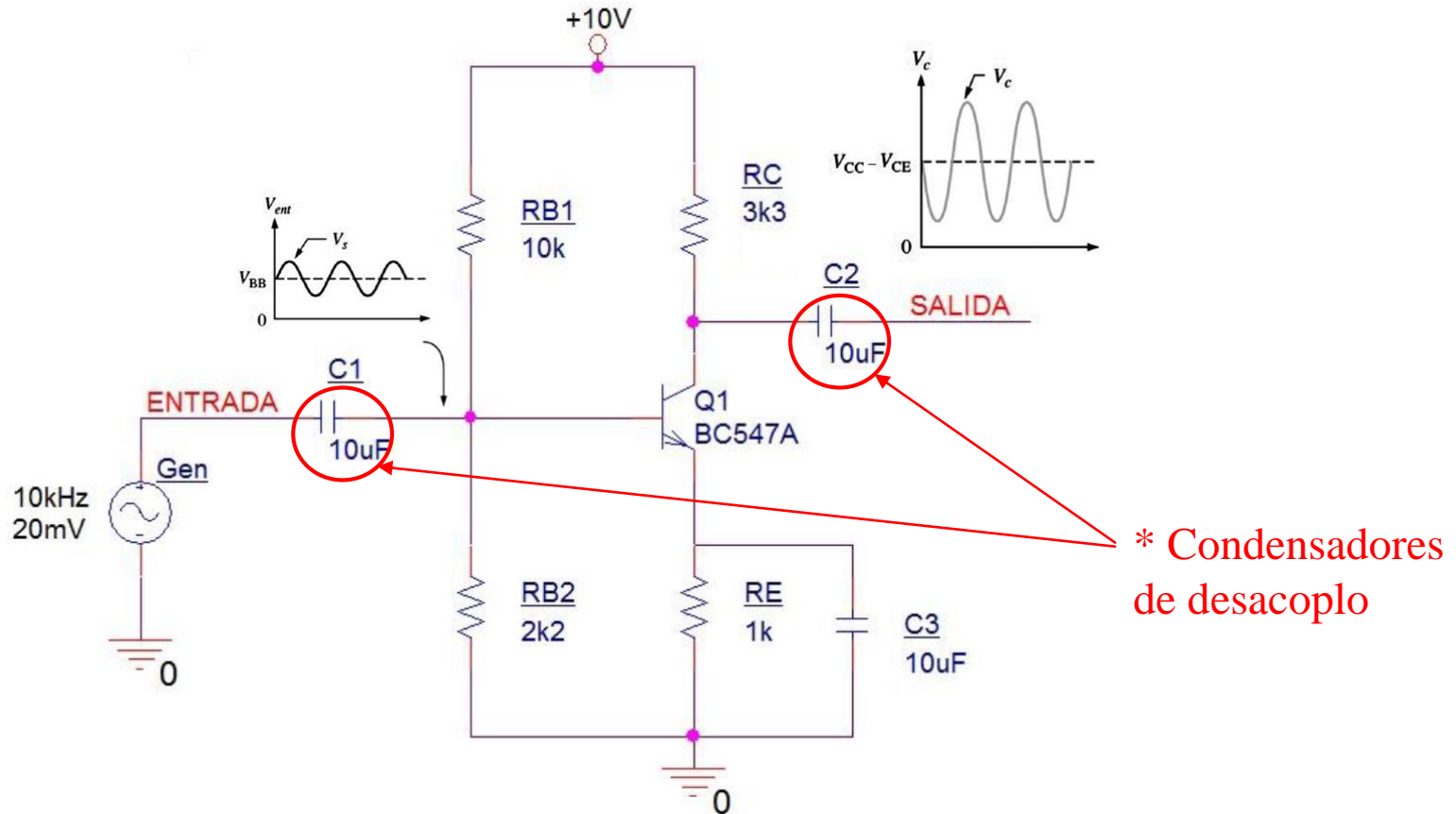
$$[1] V_{BB} = i_B R_B + v_{BE} + i_E R_E;$$

$$[2] V_{CC} = i_C R_C + v_{CE} + i_E R_E;$$

- En Región Activa $\Rightarrow i_E = \beta + 1 \sim i_C$

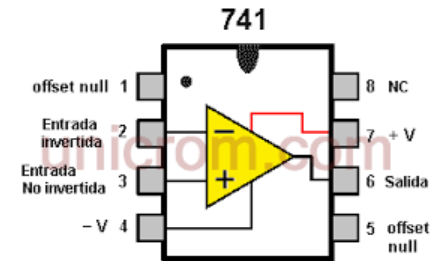
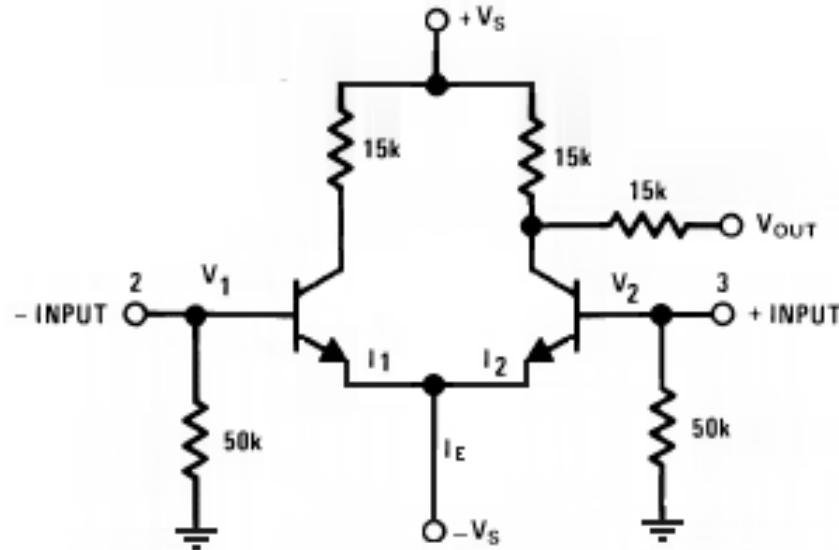
Circuito de polarización de 4 resistencias

- Amplificación de señal de entrada V_{AC} mediante Circuito de polarización con cuatro resistencias:



Aplicaciones transistores / Circuitos integrados

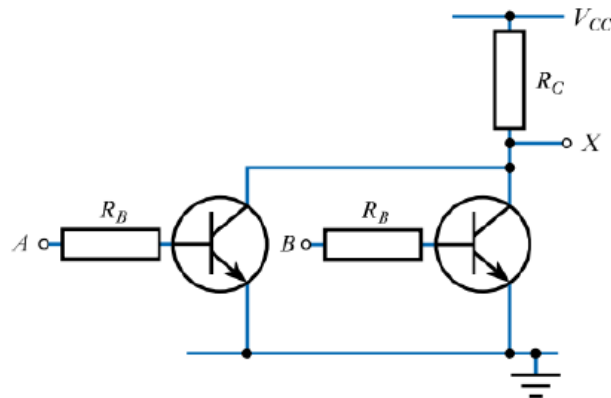
Amplificador Operacional circuito integrado



Aspectos tecnológicos

- resistor–transistor logic (RTL)
- diode logic
- diode–transistor logic (DTL)
- transistor–transistor logic (TTL)
- emitter-coupled logic (ECL)
- metal oxide semiconductor (MOS)
- complementary metal oxide semiconductor (CMOS)
- bipolar complementary metal oxide semiconductor (BiCMOS).

Resistor–transistor logic (RTL)



Puerta NOR

A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Logic levels
$V_L = V_{CE(sat)} \approx 0.1\text{V}$
$V_H = V_{CC}$

- Combinacionales

- Puertas lógicas

- Implementan las funciones lógicas elementales

Inversor

$$X = \bar{A}$$



AND

$$X = A \cdot B$$



OR

$$X = A + B$$



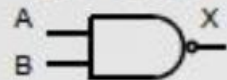
Ex-OR

$$X = A \oplus B$$



NAND

$$X = \overline{A \cdot B}$$



NOR

$$X = \overline{A + B}$$



Ex-NOR

$$X = \overline{A \oplus B}$$

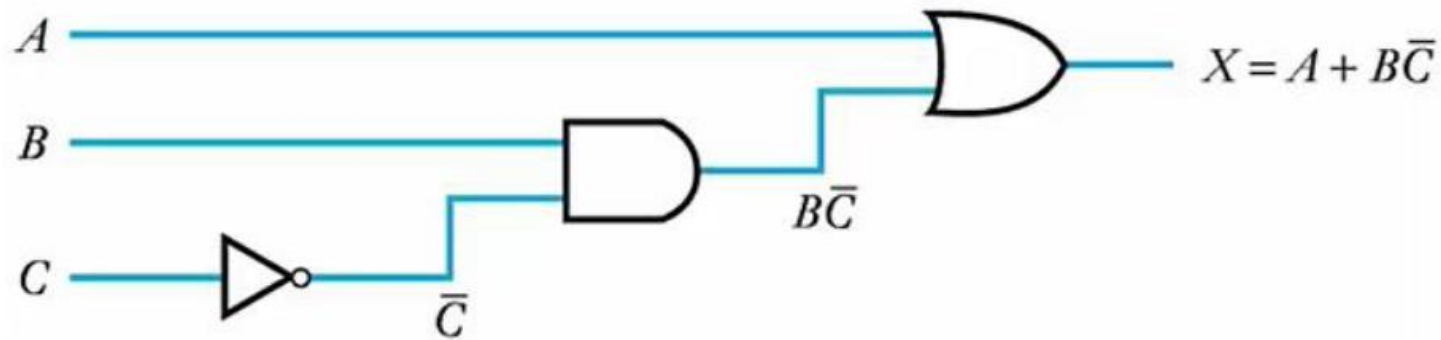


- Toda función lógica puede construirse con puertas

Aplicaciones transistores / Circuitos integrados

Implementing a logic function from a Boolean expression

Implement the function $X = A + B\bar{C}$



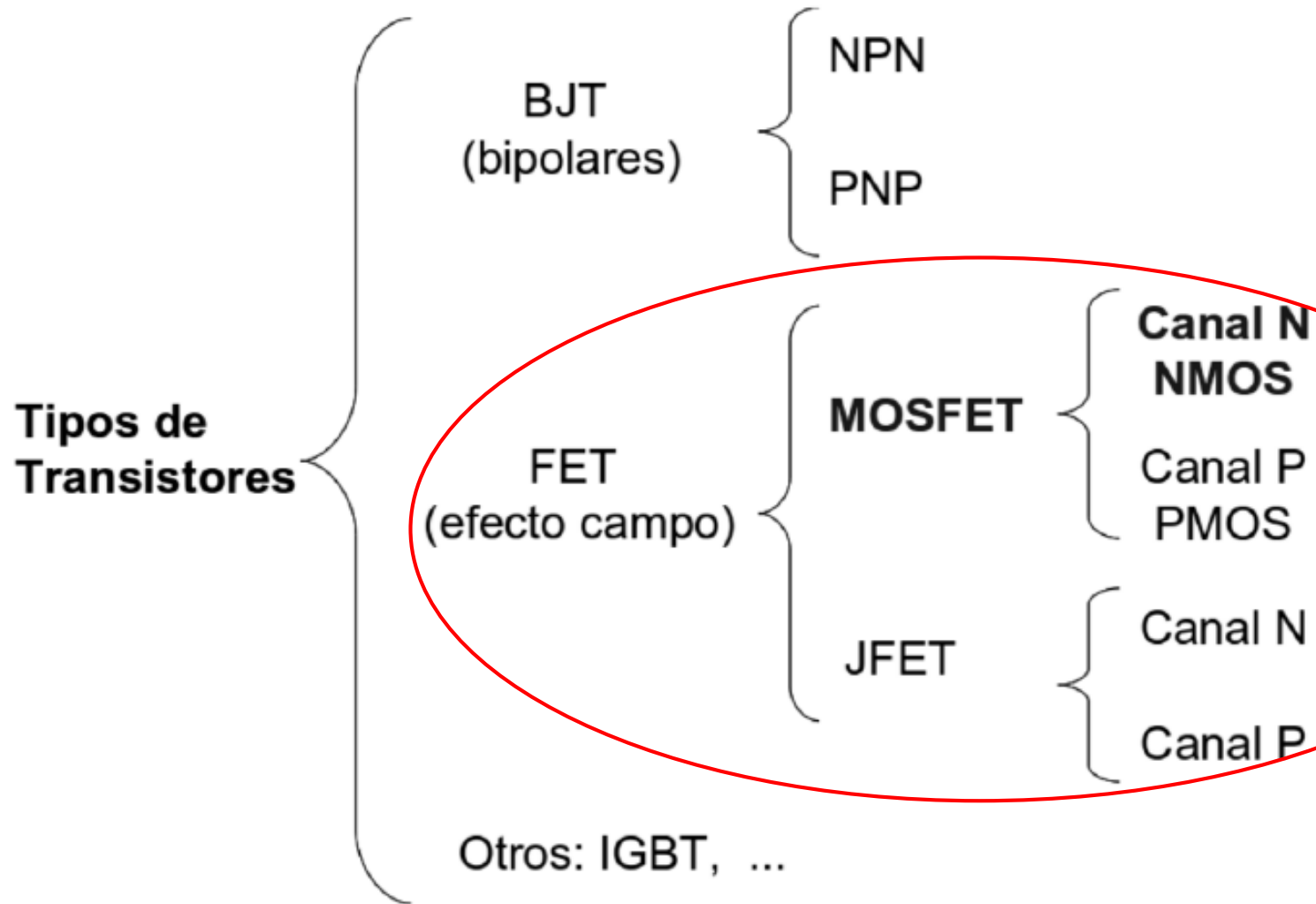
Tema 4. Transistores de Efecto Campo (FET)

Curso 2023-2024

**Electrónica 2º Curso
Grado de Ingeniería Aeroespacial**



Introducción



Introducción

- Transistor bipolar de unión (BJT) → Fuente de corriente controlado por corriente (en la base)
- Transistor de efecto campo (FET) → Fuente de corriente controlado por tensión (en la puerta)

Características principales

- Bajo consumo (baja potencia)
- Poco espacio (permite la alta integración de CI): tecnología CMOS
- 3 terminales: puerta, fuente, drenador

Introducción

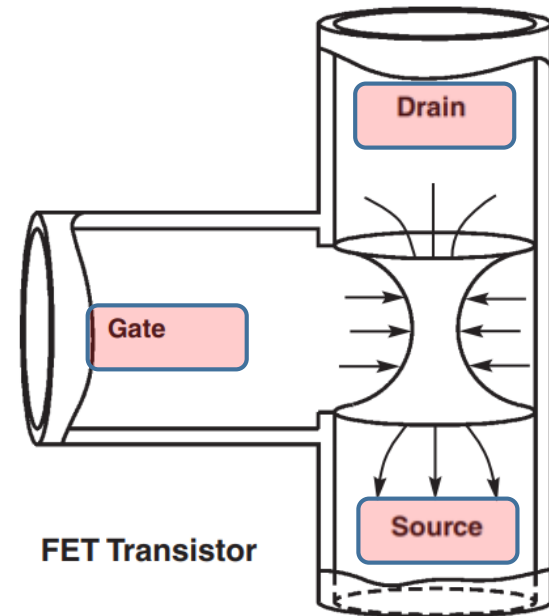
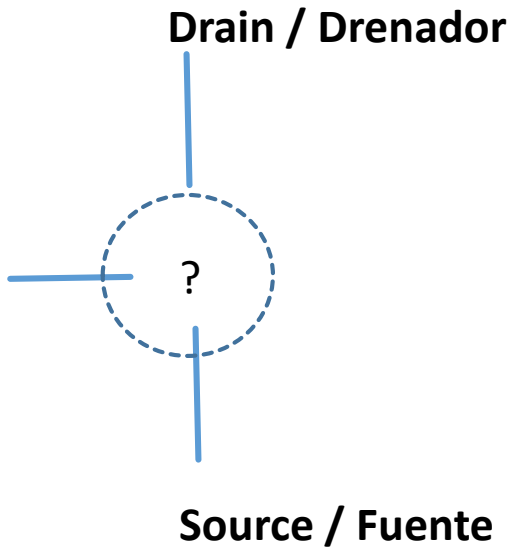
3 Tipos
FET

De-MOSFET (De- depleción o vaciamiento (depleted))

En-MOSFET (En - enriquecimiento o acumulación (enhance)
(el más utilizado en tecnología digital))

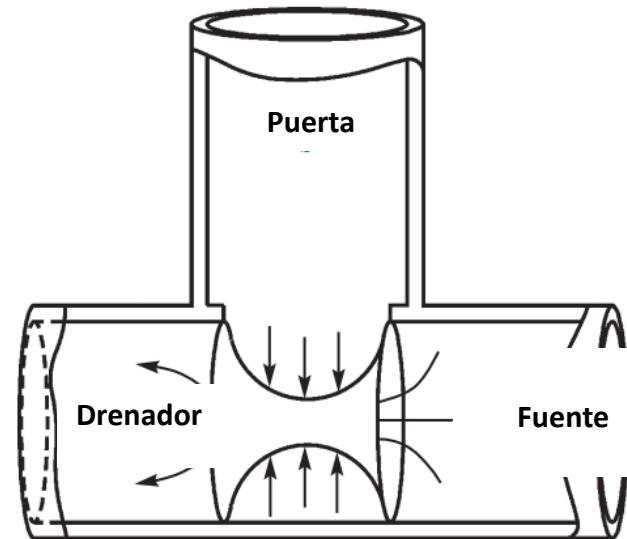
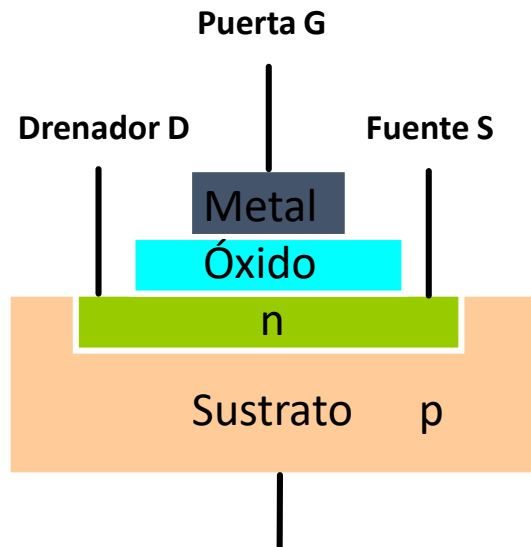
JFET

Gate / Puerta



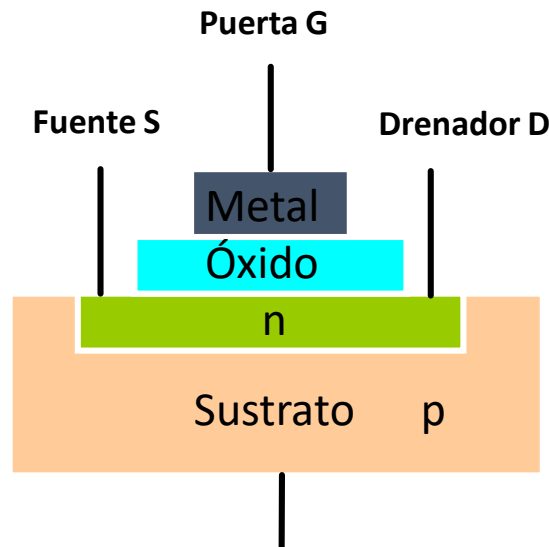
Comportamiento General FET

- Los principios del transistor de efecto campo son completamente diferentes.
- En cualquier tipo de FET, el semiconductor tipo P o N, se hace más o menos conductivo por la presencia de un campo eléctrico que admite más portadores o los expulsa hacia fuera
- Un FET opera como si tuviera un canal semiconductor con 2 contactos ohmicos: la **fuelle** y el **drenador**, donde el número de portadores en el canal se controla por la tensión aplicada en la puerta.



Introducción – FET (Field Effect Transistor)

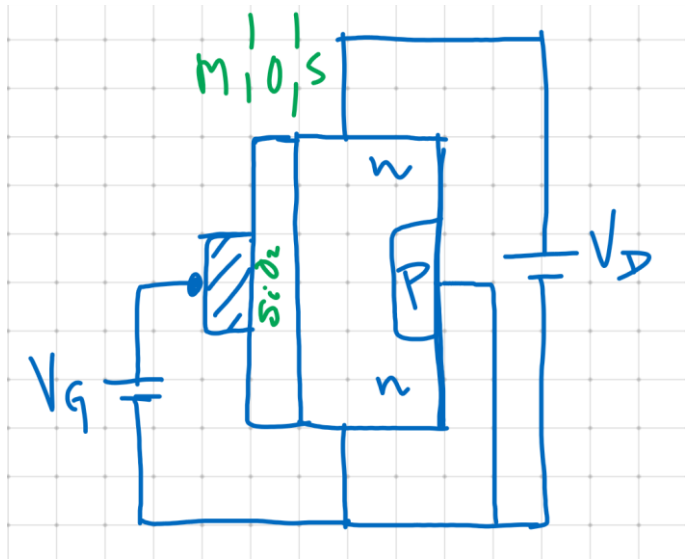
- Dos tipos: Canal-N o Canal-P
- **Si el canal se dopa fuertemente**, habrá un canal de poca resistencia entre la fuente y el drenador cuando no hay tensión aplicada a la puerta. Este tipo de transistor trabaja en **modo depleción o vaciamiento**
- **Si el canal se dopa ligeramente** o no se dopa, no habrá conducción en el canal, y esta conducción aumenta a medida que se aplica tensión en la puerta con la polaridad adecuada. Este tipo de transistor trabaja en **modo enriquecimiento o acumulación**



Transistor MOSFET/
Metal Oxide Semiconductor FET

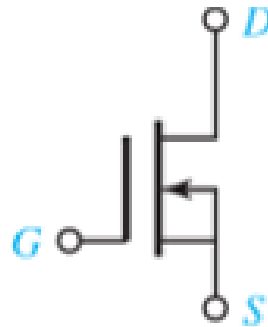
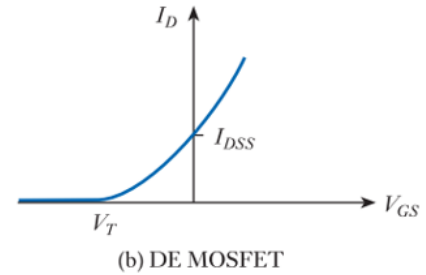
De-MOSFET

a) MOSFET de vaciamiento/deplexión depleted (DE)

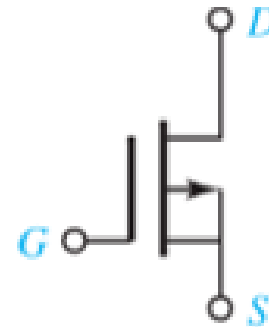


$V_G > 0$. Una tensión positiva en la puerta atrae a los electrones y el tamaño del canal se incrementa. $\rightarrow I_D$ aumenta.

$V_G < 0$. Una tensión negativa en la puerta atrae a los huecos y el tamaño del canal se reduce $\rightarrow I_D$ disminuye.



N-channel



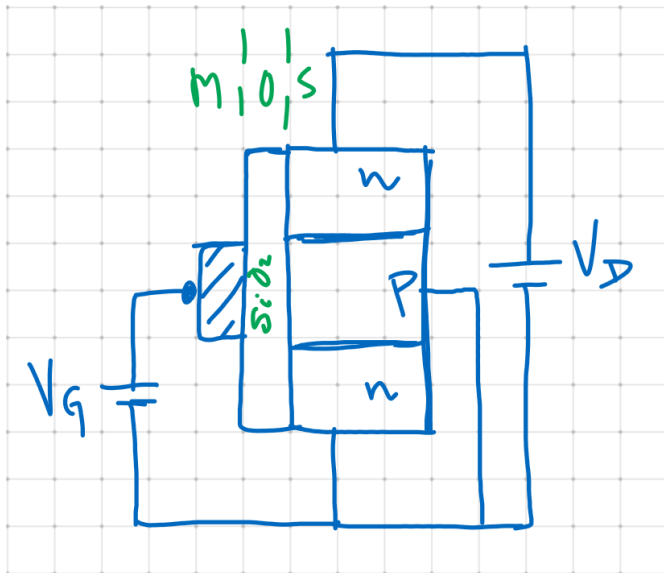
P-channel

Nota:
La flecha significa la unión pn entre el canal y el sustrato.

La línea vertical significa la formación del canal de conducción.

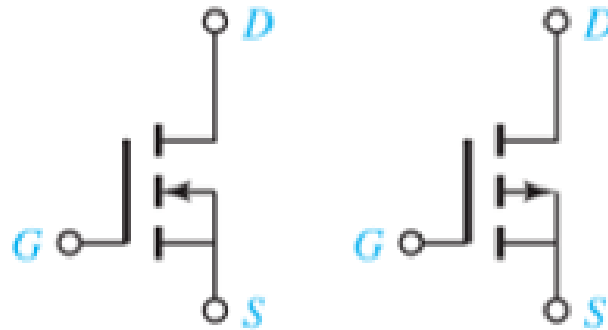
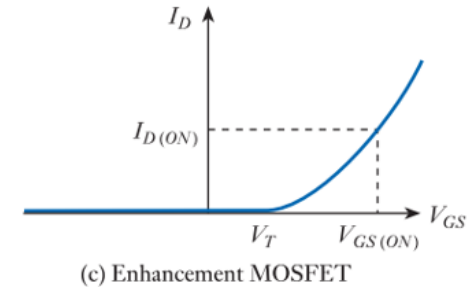
En-MOSFET

b) MOSFET de enriquecimiento/acumulación / Enhanced (EN)



$V_G > 0$. No hay canal, pero si una capa de inversion cuando $V_{GS} > V_T$

$V_G < 0$. $I_D = 0$. No hay corriente entre el drenador y la Fuente.



N-channel

P-channel

Nota:
La flecha significa la unión pn entre el canal y el sustrato.

La línea vertical discontinua significa la inducción del canal.

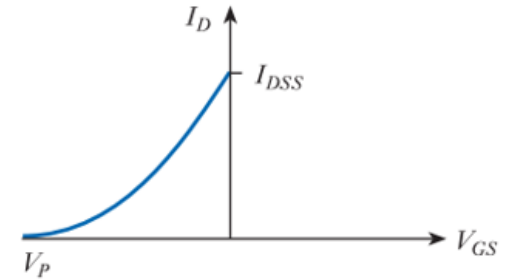
La electrónica digital se fabrica con MOSFET de enriquecimiento

JFET

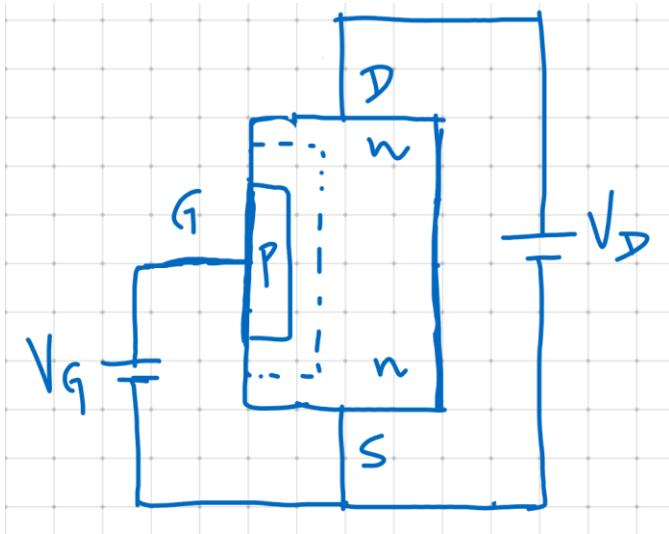
No hay estructura MOS en la puerta

c) JFET (FET de unión)

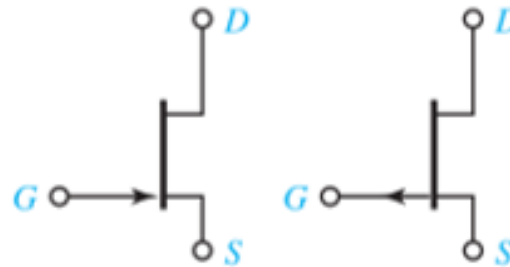
La corriente se controla mediante la polarización inversa de la unión en la puerta.



(a) JFET



- $V_G = 0$ I_D máxima
- $V_G < 0$ I_D disminuye
- $V_G \ll 0$ $I_D = 0$



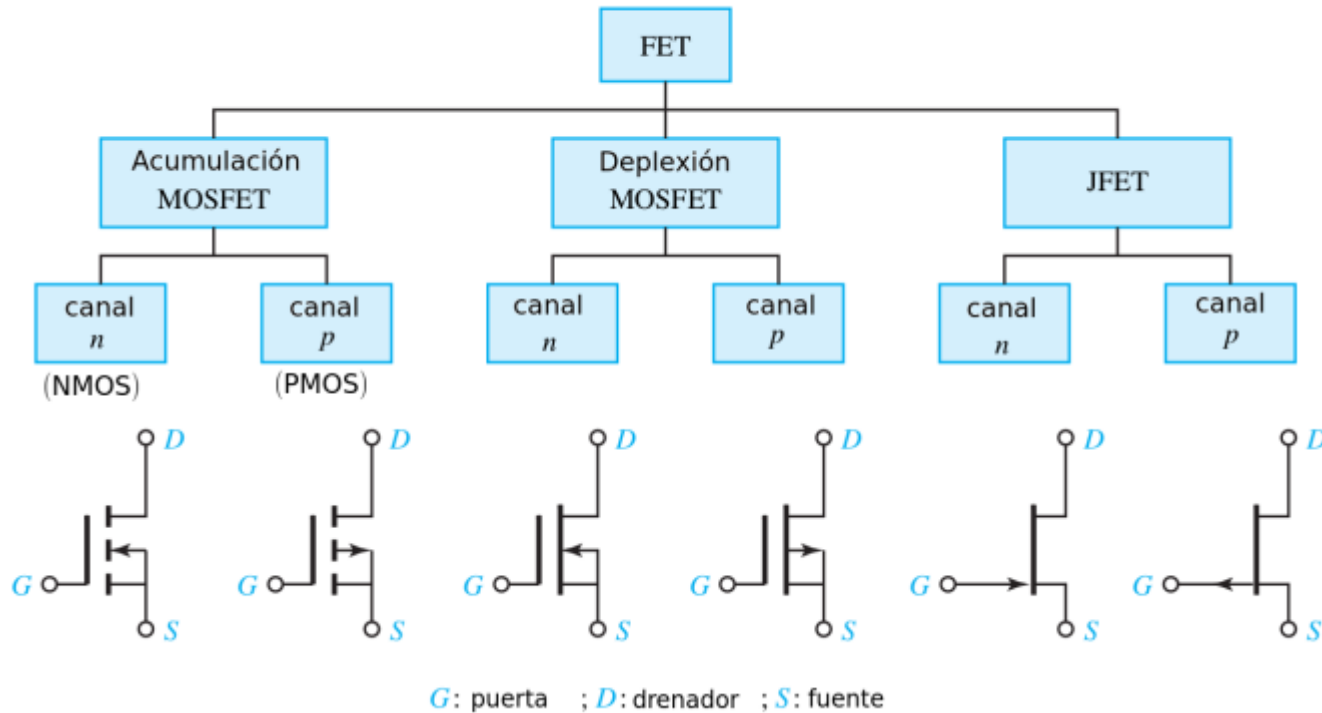
N-channel

P-channel

Nota:
La flecha significa la unión pn entre el canal y el sustrato.

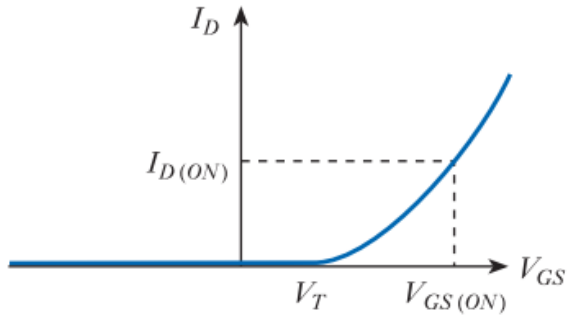
La línea vertical única significa que no hay canal.

CLASIFICACIÓN TRANSISTORES FET

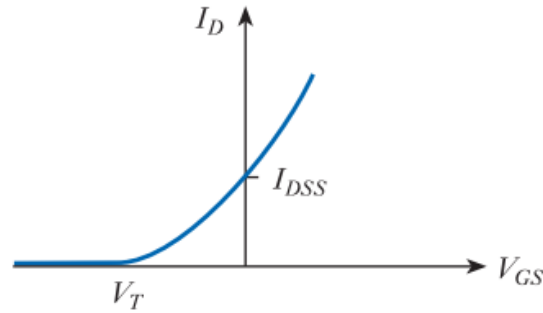


- ❑ MOS: Línea vertical G separada de línea vertical DS .
 - ❑ Línea DS discontinua: Enhanced (acumulación/enriquecimiento).
 - ❑ Línea DS continua: Depleted (vaciamiento, deplexión).
- ❑ Flecha MOSFET unión substrato-canal
- ❑ J: Línea vertical G sin separación con DS
- ❑ Flecha J-FET unión substrato-canal

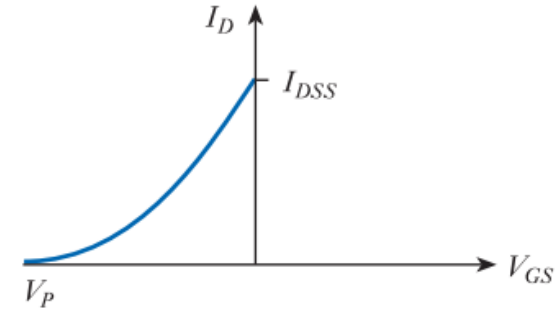
RESUMEN TRANSISTORES FET



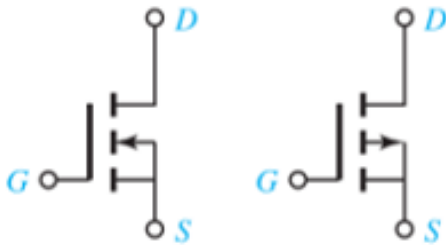
(c) Enhancement MOSFET



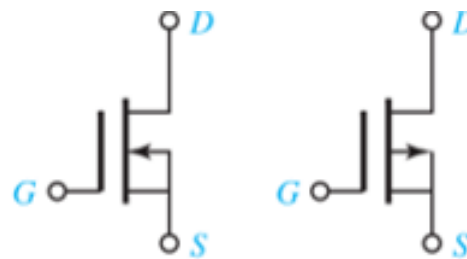
(b) DE MOSFET



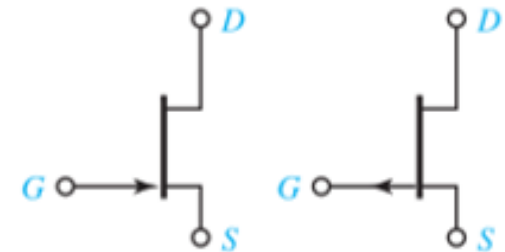
(a) JFET



- Con $V_{GS} = 0$ $I_{DS} = 0$
- $V_T > 0$



- Con $V_{GS} = 0$ $I_{DS} \neq 0$
- $V_T < 0$



- Con $V_{GS} = 0$ I_{DS} saturada
- $V_T < 0$

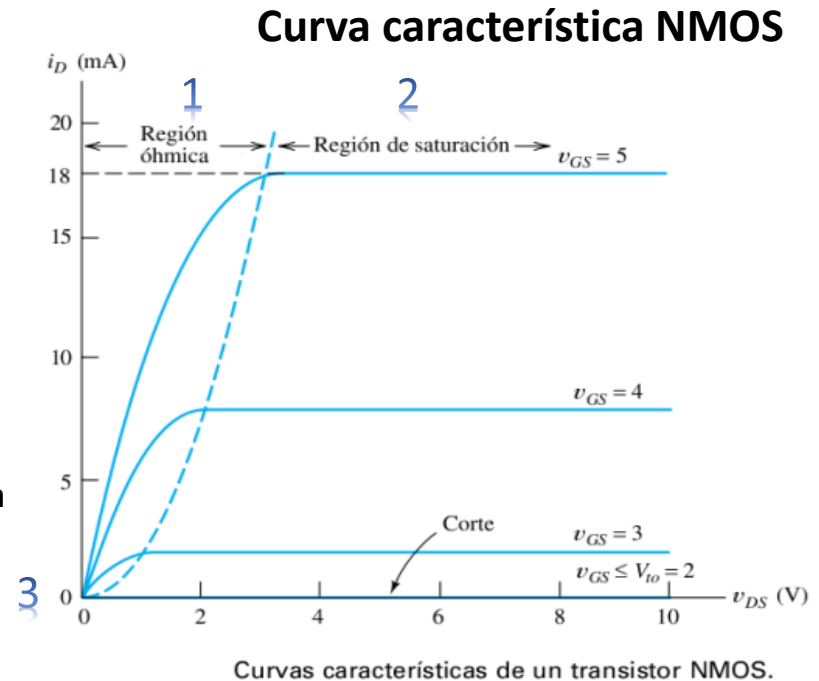
CARACTERÍSTICA DE SALIDA

1. Región Ohmica:

- Para valores bajos de V_{DS} y a medida que V_{GS} es más positiva, el canal aumenta y la resistencia disminuye.
- **Transistor = Resistencia = $R_{DS(on)}$**
- I_D es proporcional a V_{DS} ,
- El valor de la resistencia es controlado por el valor V_{GS} .
- Si V_{GS} aumenta, R_{DS} disminuye
- Para todos los transistores, el valor V_{GS} para el cual comienza a conducir es V_{to} (**umbral**).
- **Si $V_{GS} > V_{to}$ (umbral) el transistor conduce y se comporta como una resistencia entre drenador y fuente $R_{DS(on)}$**

2. Región de Saturación:

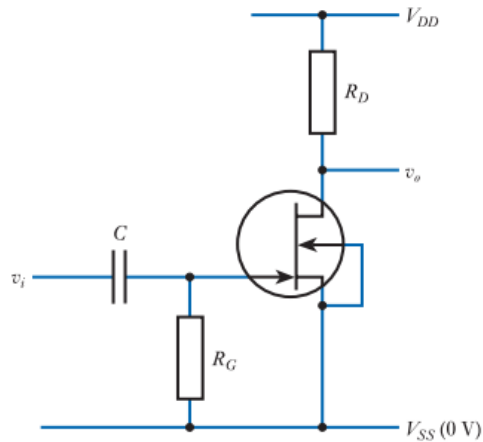
- V_{DS} va aumentando hasta que la corriente I_D llega a un punto de saturación y no pasa más corriente, I_D se hace constante e independiente de V_{DS} .
- Esta corriente se controla con $V_{GS} \rightarrow$ Amplificación



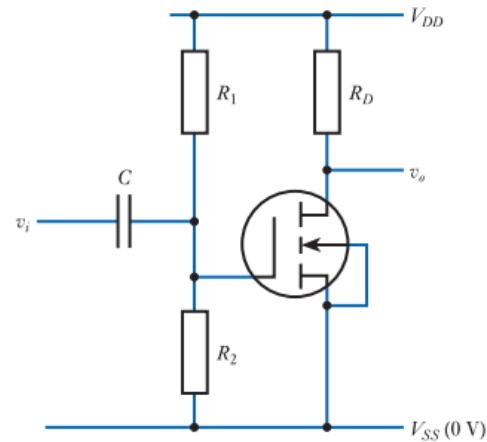
3. Región de corte:

- Para todos los transistores, el valor V_{GS} para el cual comienza a conducir es V_{to} (**umbral**).
- **Si $V_{GS} < V_{to}$ (umbral) el transistor está en corte.**
- Este valor depende del transistor y varía de unos a otros.
 - De-MOSFET, JFET $V_{GS} < 0$
 - En- MOSFET $V_{GS} > 0$

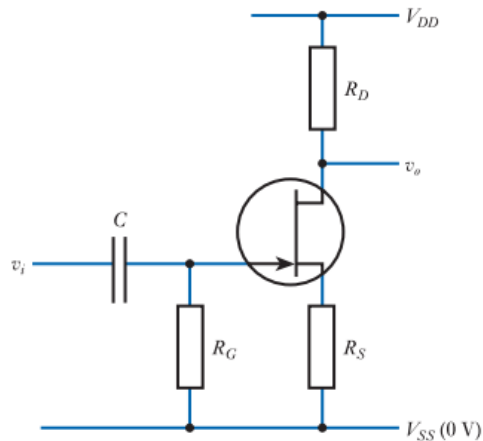
AMPLIFICADORES FET



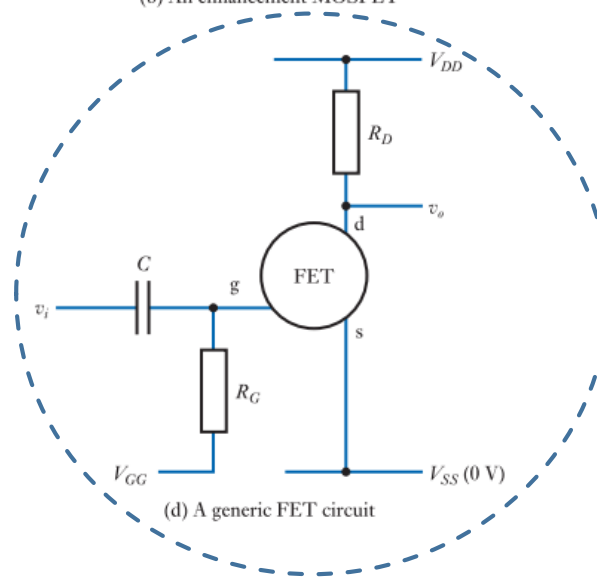
(a) A DE MOSFET



(b) An enhancement MOSFET



(c) A JFET



(d) A generic FET circuit

Transistores de efecto campo (FET)

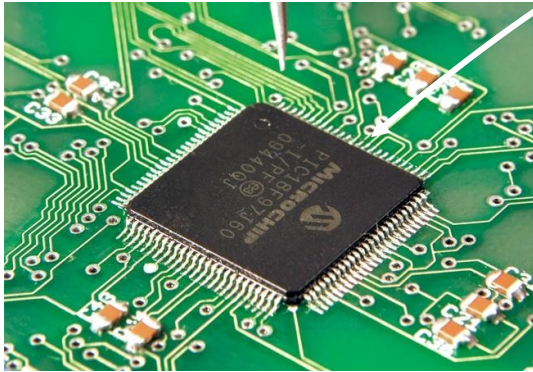
Funciones del FET

- ▶ *Amplificación*: Menos frecuente, comportamiento no lineal.
 - ▶ **Conmutación**: Usados en aplicaciones de bajo voltaje. Son mucho más rápidos que los BJT.
- En un FET no existen los portadores minoritarios \Rightarrow puede conmutar más rápido, ya que no hay carga almacenada que tenga que ser eliminada del área de la unión.
 - Se emplea tanto en circuitos discretos (interruptor de potencia) y circuitos integrados (conmutación digital)
 - Dispositivo dominante en los circuitos integrados (CI) modernos: son la base de circuitos digitales, memorias y microprocesadores.
 - Se pueden fabricar con pequeñas dimensiones, esto ha fomentado la integración a escala muy grande en circuitos.

Introducción

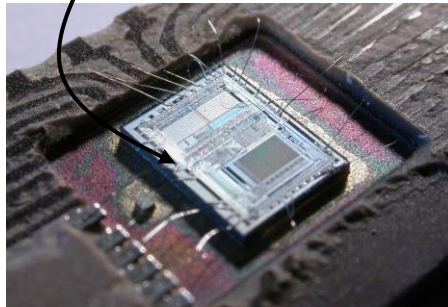
■ Física y tecnología del silicio

“Chips” o Circuitos integrados → del transistor al microprocesador (Very Large Scale Integration)



Circuito Integrado

1x1 cm
Ocupan
muy poco
espacio!



An integrated circuit (IC), sometimes called a chip, microchip or microelectronic circuit, is a semiconductor wafer on which thousands or millions of tiny resistors, capacitors, diodes and transistors are fabricated.

- Hasta 1958 los circuitos formados por transistores se conectaban manualmente
- Ese año, *Jack Kilby* tuvo la idea de crear directamente los elementos de un circuito sobre un sustrato de material semiconductor
- El conjunto se denomina circuito integrado o chip.
- IC (integrated circuit) en inglés
- Un IC puede contener cientos (millones) de transistores, diodos, resistencias y cualquier componente de un circuito electrónico

[Ver video](#)
[Microprocesador \(transistor\)](#)

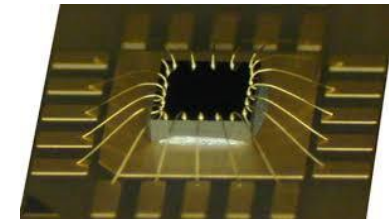
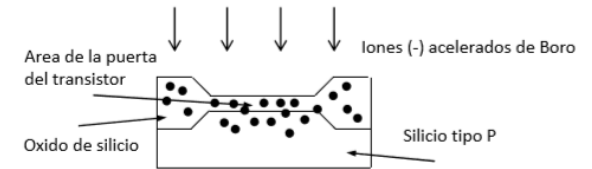
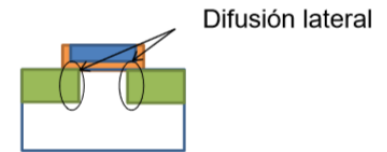
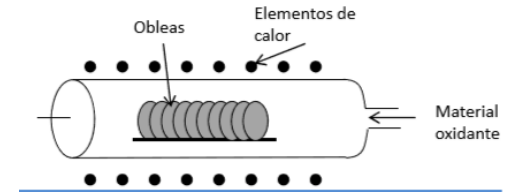
Introducción

■ Tecnologías de fabricación de circuitos integrados

Sand to Silicon - the Making of a Chip | Intel

<https://youtu.be/aCOyq4YzBtY>

- Fabricación de oblea
- Oxidación térmica
- Proceso de dopado: implantación iónica o difusión
- Fotolitografía
- Eliminación película delgada: comido o etching
- Deposición película delgada: dióxido de silicio y metal.
- Corte dado, die o chip.
- Wire bonding
- Empaquetado o encapsulado



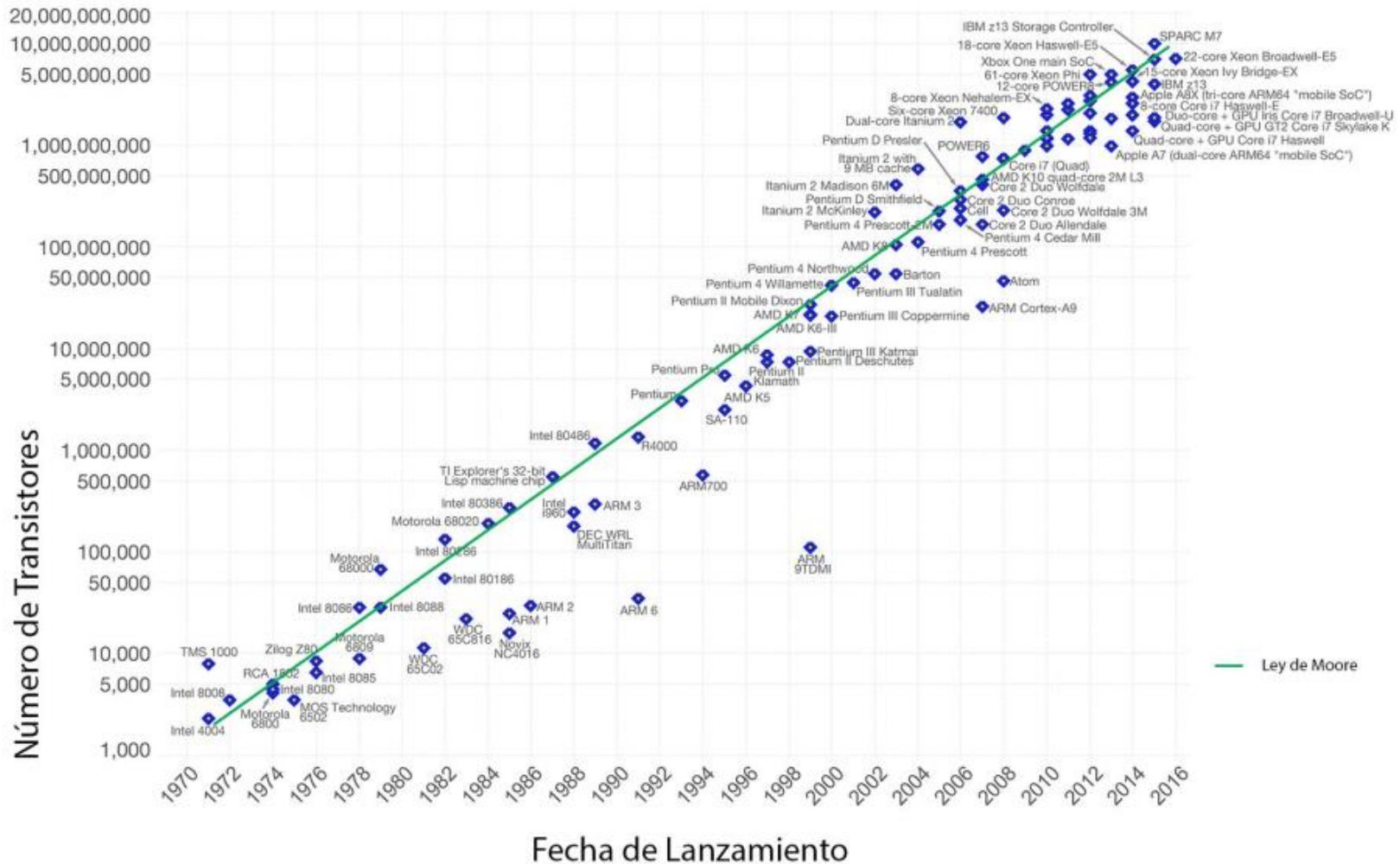
NIVELES DE INTEGRACIÓN EN CIRCUITOS INTEGRADOS

Nivel de integración	Número de transistores
Zero-scale integration (ZSI).	1
Small-scale integration (SSI).	20-30
Medium-scale integration (MSI).	$30-10^3$
Large-scale integration (LSI).	10^3-10^5
Very large-scale integration (VLSI).	10^5-10^7
Ultra large-scale integration (ULSI).	10^7-10^9
Giga-scale integration (GSI).	10^9-10^{11}
Tera-scale integration (TSI).	$10^{11}-10^{13}$

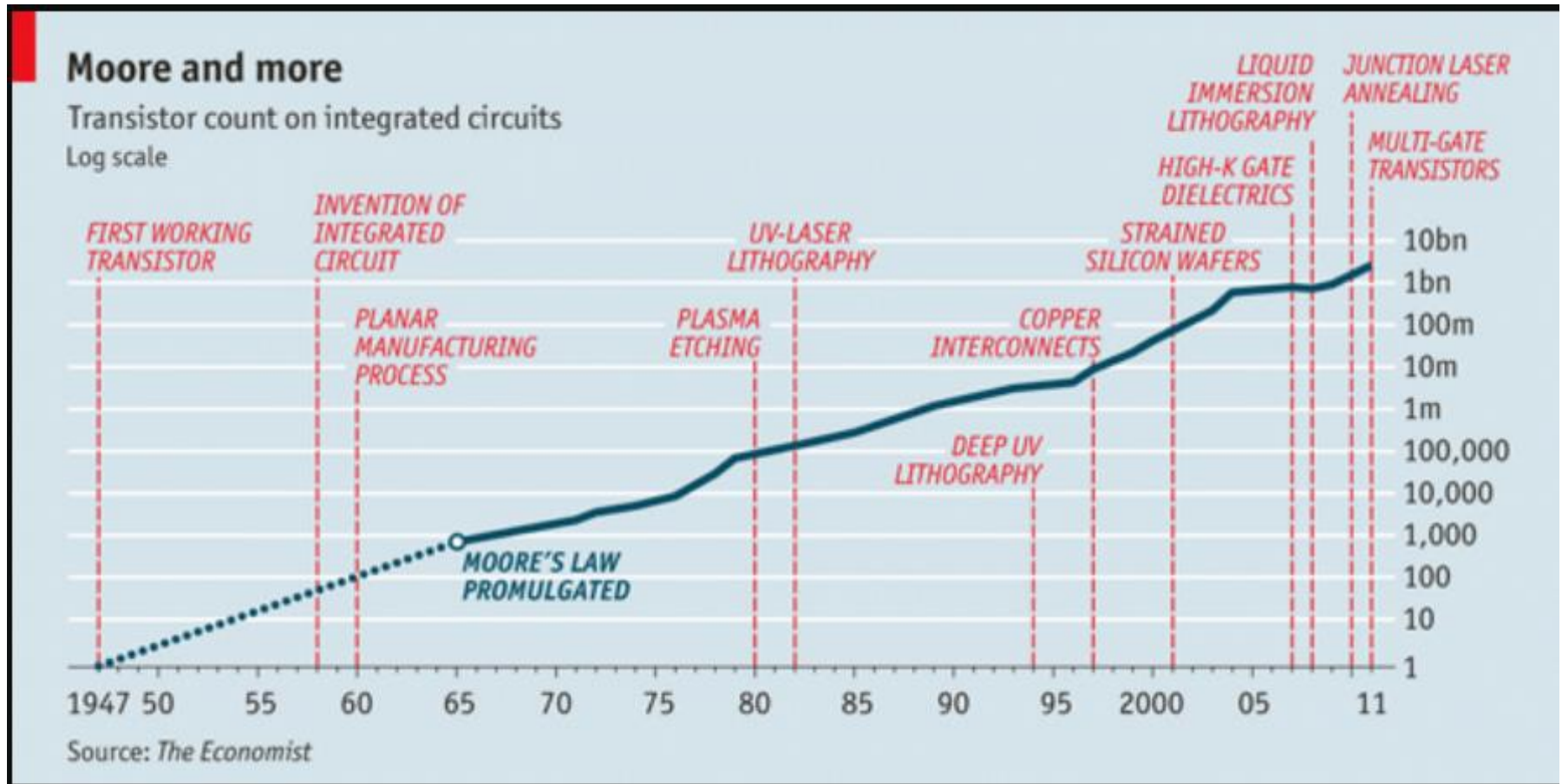
Niveles de integración en electrónica.

NIVELES DE INTEGRACIÓN EN CIRCUITOS INTEGRADOS

Procesadores vs. Ley de Moore



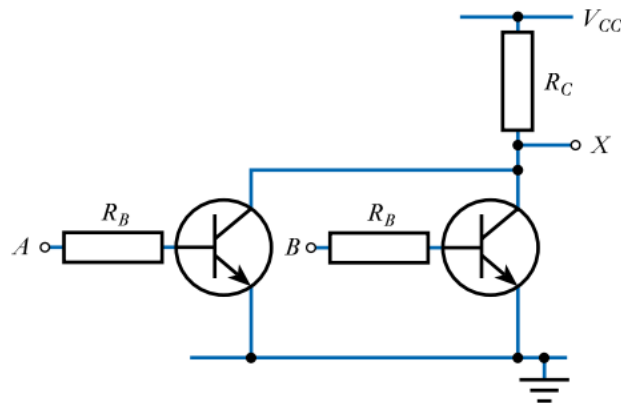
TECNOLOGÍA en Electrónica Digital



Aspectos tecnológicos

- resistor–transistor logic (RTL)
- diode logic
- diode–transistor logic (DTL)
- transistor–transistor logic (TTL)
- emitter-coupled logic (ECL)
- metal oxide semiconductor (MOS)
- complementary metal oxide semiconductor (CMOS)
- bipolar complementary metal oxide semiconductor (BiCMOS).

Resistor–transistor logic (RTL)



Puerta NOR

A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Logic levels
$V_L = V_{CE(sat)} \approx 0.1\text{V}$
$V_H = V_{CC}$

Aspectos tecnológicos

- Familias lógicas
 - Circuitos digitales que comparten tecnología de fabricación (y características eléctricas)
 - Familias más significativas:
 - TTL (*Transistor-Transistor Logic*): BJTs
 - CMOS (*Complementary MOS*): MOSFETs

TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

- La sustitución de transistores bipolares por MOSFET supone una reducción del consumo de potencia.
- El éxito principal de la tecnología CMOS radica en el uso de pares complementarios, esto es un transistor PMOS y un NMOS, de manera que cuando el transistor NMOS conduce, el PMOS está en corte y viceversa.
- Esta estrategia, no sólo mejora el consumo energético si no que permite una mayor densidad de componentes en una misma área.

- Los tiempos de retardo varían inversamente con la tensión de alimentación: 30-60 ns.

ver VIDEO mosfet

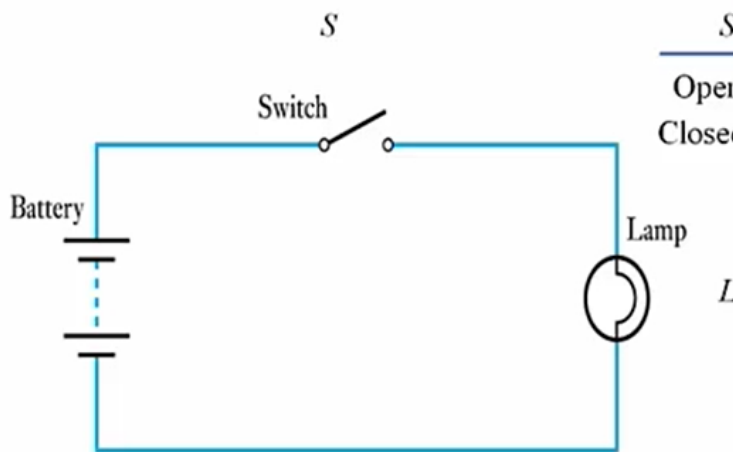
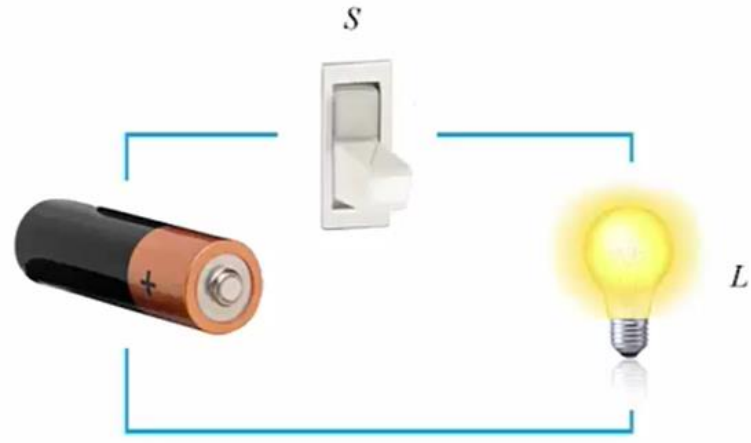
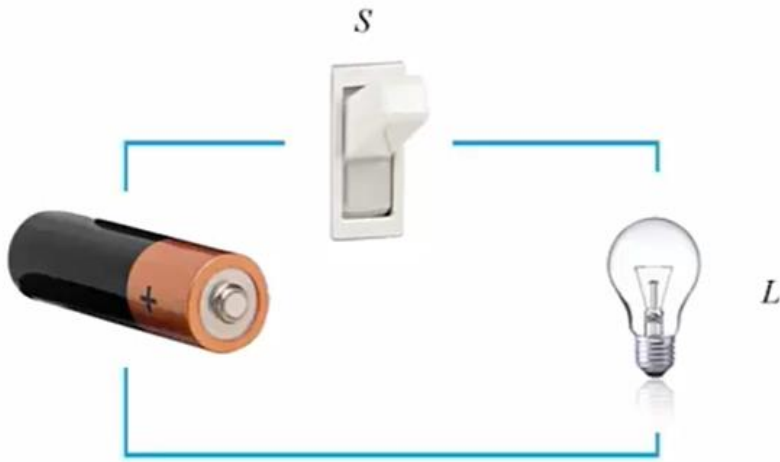
<https://www.youtube.com/watch?v=-ZTekGoR8uQ>

TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

Una variable binaria es una variable que puede contener dos estados.



TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital



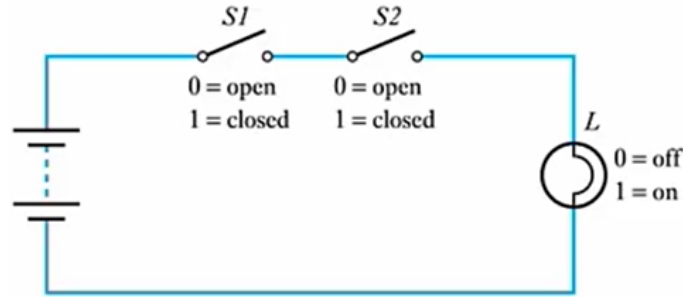
S	L
Open	Off
Closed	On

Tabla de Verdad

S	L
0	0
1	1

TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

AND



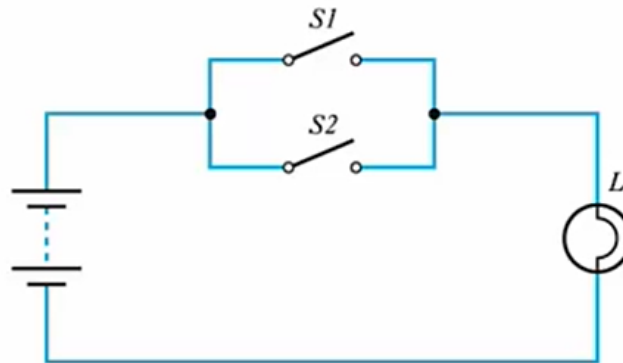
Circuit

$S1$	$S2$	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Truth table

$$L = S1 \text{ AND } S2$$

OR



Circuit

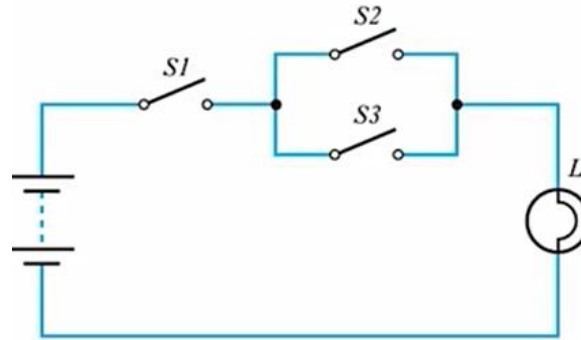
$S1$	$S2$	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Truth table

$$L = S1 \text{ OR } S2$$

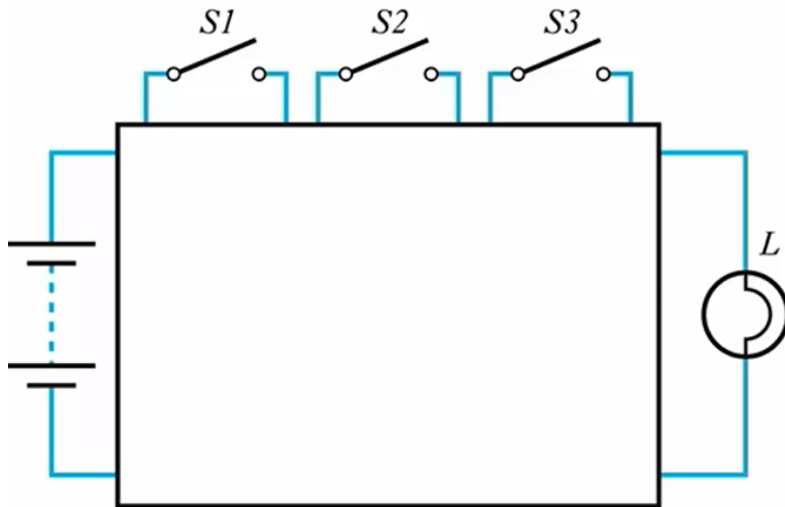
TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

S1 AND (S2 OR S3)



S1	S2	S3	L
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

$$L = S1 \text{ AND } (S2 \text{ OR } S3)$$



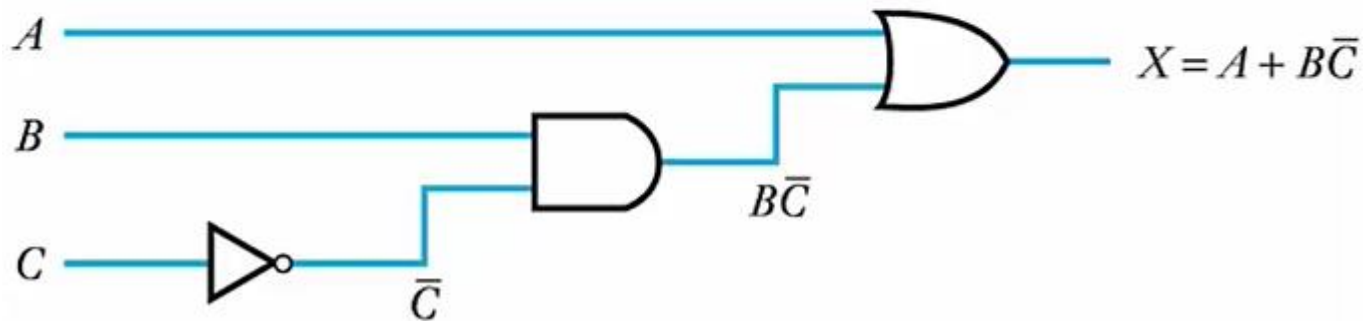
Sistema Digital



TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

Implementing a logic function from a Boolean expression

Implement the function $X = A + B\bar{C}$

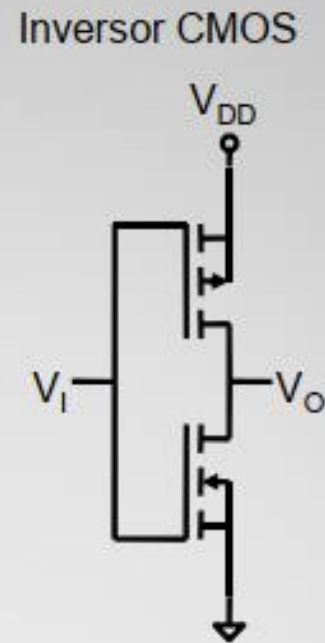
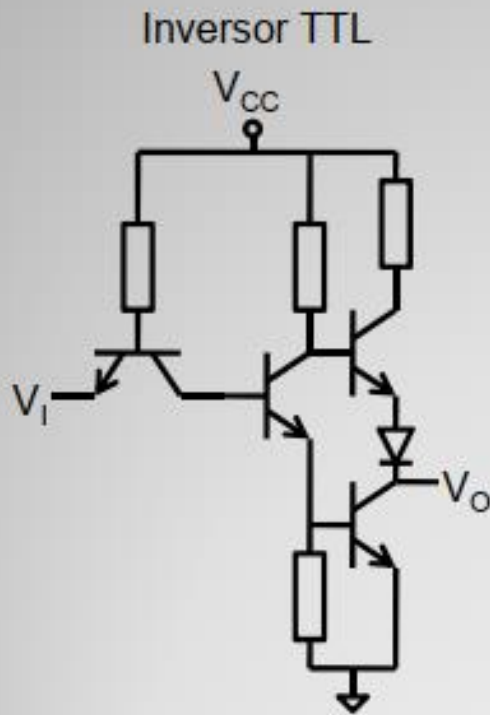


TECNOLOGÍA CMOS en Electrónica Digital

- Claves del éxito de la electrónica digital:
 1. Menor sensibilidad al ruido y a la distorsión
 2. Posibilidad de realizar con los mismos elementos básicos:
 - A. Funciones lógicas (toma de decisiones)
 - B. Funciones aritméticas (realización de cálculos)
 - C. Almacenamiento de información (memorización)
 3. Miniaturización extrema de los transistores

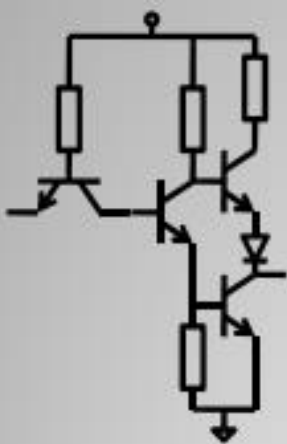
Aspectos tecnológicos

- Familias lógicas



Aspectos tecnológicos

- Familias lógicas: TTL



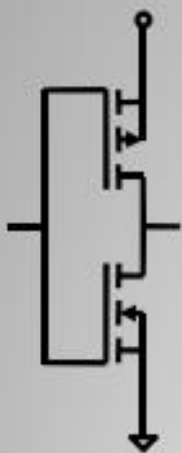
- Hay corriente estática en las entradas
- Hay corriente $V_{CC} \rightarrow GND$ (V_O en bajo)



1. Hay consumo estático
 2. Los niveles lógicos se alejan de V_{CC} y GND
- Hay que integrar resistencias

Aspectos tecnológicos

- Familias lógicas: CMOS



- No hay corriente estática en las entradas

- No hay corriente estática $V_{CC} \rightarrow GND$



1. No hay consumo estático

2. Los niveles lógicos están próximos a V_{CC} y GND



3. Puede reducirse V_{CC} y, por tanto, el consumo

- Hay que integrar los dos tipos de MOSFETs

Aspectos tecnológicos

- Familias lógicas: Situación actual
 - La inmensa mayoría de los circuitos son CMOS
 - Gran variedad de tensiones de alimentación:
CMOS (5V) LVCMOS33 (3,3V)
LVCMOS25 (2,5V) LVCMOS18 (1,8V) ...
 - CMOS suelen ser compatibles TTL (5V)
 - LVCMOS33 son compatibles LVTTTL (3,3V)
 - LVCMOS33 suele ser tolerante a 5V

Módulos funcionales digitales

- Combinacionales

- Puertas lógicas

- Implementan las funciones lógicas elementales

Inversor

$$X = \overline{A}$$



AND

$$X = A \cdot B$$



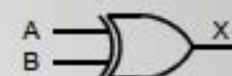
OR

$$X = A + B$$



Ex-OR

$$X = A \oplus B$$



NAND

$$X = \overline{A \cdot B}$$



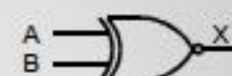
NOR

$$X = \overline{A + B}$$



Ex-NOR

$$X = \overline{A \oplus B}$$



- Toda función lógica puede construirse con puertas

Tema 5. Amplificadores Operacionales

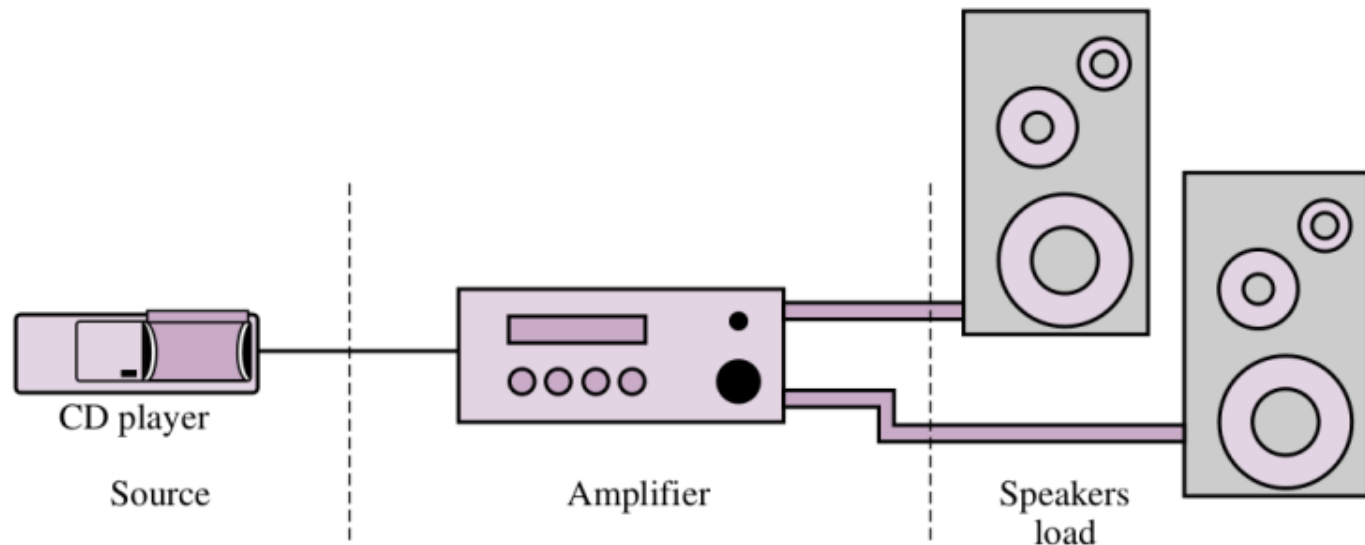
Curso 2023-2024

**Electrónica 2º Curso
Grado de Ingeniería Aeroespacial**



Introducción

- Uno de los bloques funcionales más importantes de los sistemas electrónicos es el amplificador
- La necesidad de amplificar señales de baja amplitud aparece frecuentemente en numerosas aplicaciones.
Ej. CD, bioelectrodos, móviles, ...



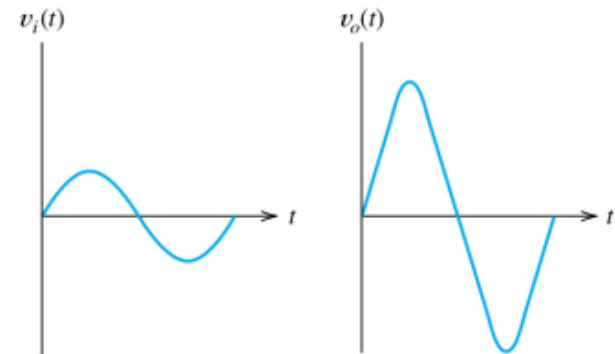
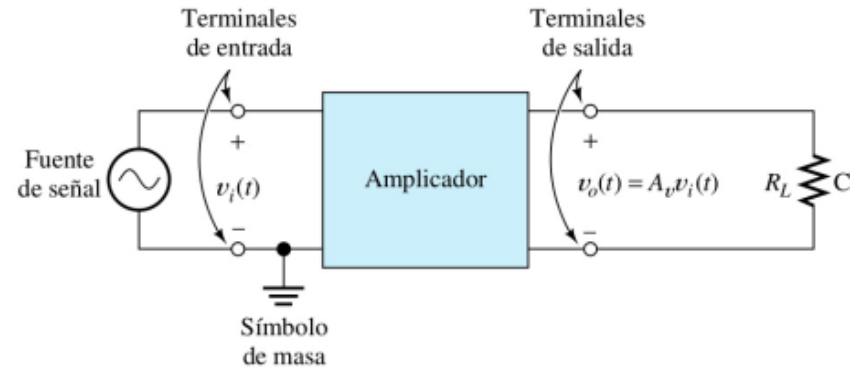
Introducción

Amplificación

Producir una señal de salida con la misma forma que la de entrada pero con mayor amplitud.

$$v_O(t) = A_v v_i(t)$$

- La amplificación viene descrita por la **ganancia**, A_v , magnitud que relaciona la entrada con la salida.
- En electrónica, los amplificadores más importantes son **activos**: necesitan energía de una fuente exterior.



Si la amplitud de salida es menor, cabe hablar de **atenuación**.

Introducción

Existen varios tipos de amplificadores

- ▶ **Amplificador de voltaje:** $v_i \rightarrow v_O$
- ▶ **Amplificador de corriente:** $i_i \rightarrow i_O$
- ▶ **Amplificador de transconductancia:** $v_i \rightarrow i_O$
- ▶ **Amplificador de transresistencia:** $i_i \rightarrow v_O$

● Aunque todos los amplificadores anteriores pueden aumentar la potencia de la señal de salida, el nombre de **amplificador de potencia** está reservado para circuitos cuya función principal es la de dotar de grandes cantidad de energía a la carga.

Introducción

- La ganancia relaciona la entrada con la salida en un amplificador. Dependiendo del tipo existe una ganancia característica aunque no exclusiva.

- ▶ **Ganancia de voltaje:** $A_v = \frac{v_o}{v_i}$
- ▶ **Ganancia de corriente:** $A_i = \frac{i_o}{i_i}$
- ▶ **Transconductancia:** $G_m = \frac{i_o}{v_i}$
- ▶ **Transresistencia:** $R_m = \frac{v_o}{i_i}$

- Las ganancias A_v , A_i , G_m y R_m las podemos designar de forma genérica como G .

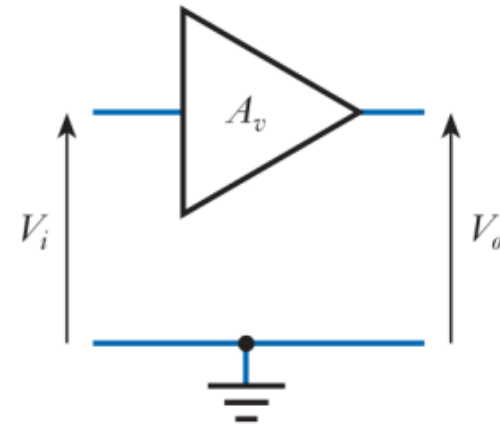
- En general, si $|G| < 1 \Rightarrow$ **atenuación**

Introducción

En lo que sigue, prestaremos especial interés en el **amplificador de tensión**

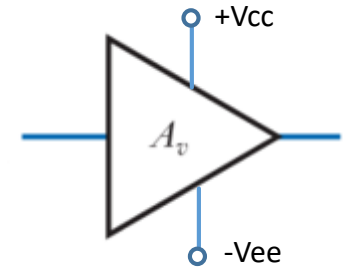
Símbolo del amplificador de tensión

Aunque la amplificación en electrónica es activa, la conexión a la fuente de energía se omite por claridad.



Amplificador **Activo**, necesita alimentación externa: V_{CC} y $-V_{EE}$

En los esquemas del circuito la alimentación externa se omite por simplicidad (se sobreentiende)

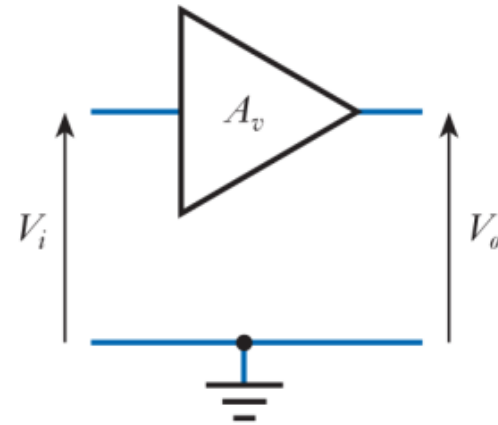


Introducción

En lo que sigue, prestaremos especial interés en el **amplificador de tensión**

Símbolo del amplificador de tensión

Aunque la amplificación en electrónica es activa, la conexión a la fuente de energía se omite por claridad.

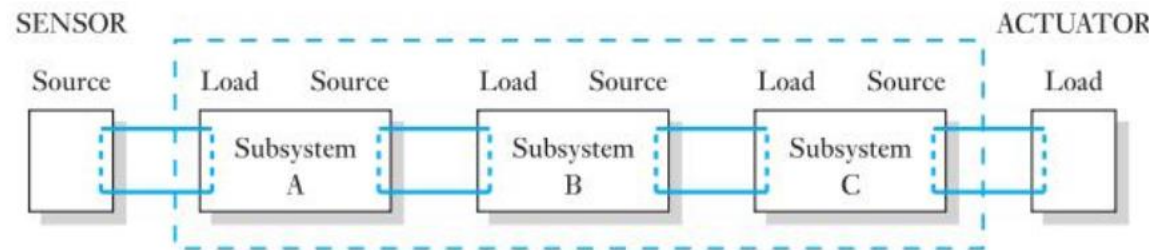
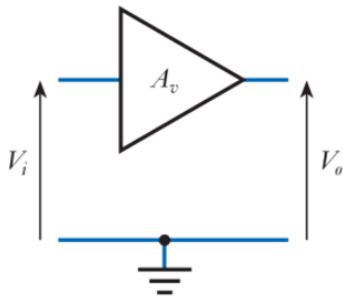


- La señal V_i puede venir, por ejemplo, de un sensor (el amplificador actuaría como carga)
- La señal amplificada V_o irá a otro módulo electrónico (el amplificador actuaría como fuente)

Introducción

- La señal V_i puede venir, por ejemplo, de un sensor (el amplificador actuaría como carga)
- La señal amplificada V_o irá a otro módulo electrónico (el amplificador actuaría como fuente)

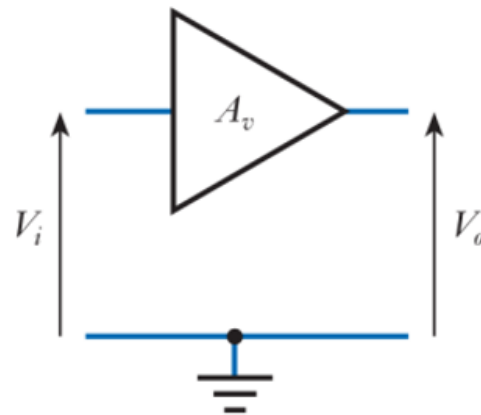
Ya vimos que un sistema complejo se puede fraccionar en distintos módulos o subsistemas.



Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Cada modulo (por ejemplo, el amplificador) puede ser descrito sólo usando sus **entradas, salidas y la relación entre ambas.**

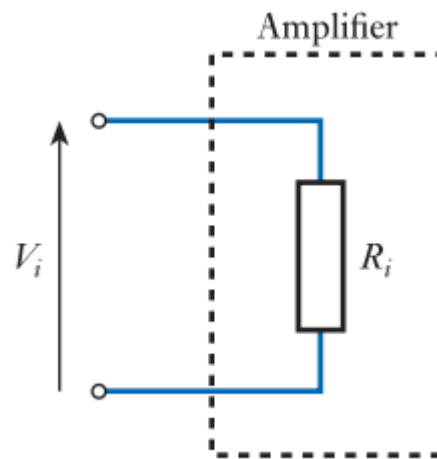
- Podemos describir la operación de un modulo dado con un circuito equivalente.
- Circuito equivalente** = representación simplificada, no describe su construcción interna, sólo modela las características



Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Entrada del amplificador : modelo equivalente

Para modelar la entrada, necesitamos describir su comportamiento como si fuera la carga de otro circuito.

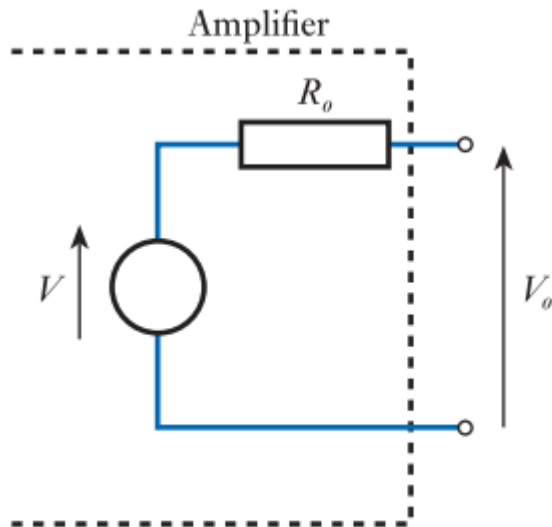


Afortunadamente, en muchos casos, el circuito de entrada de un amplificador se puede modelar mediante una resistencia equivalente, denominada **Resistencia de Entrada, R_i** .

Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Salida del amplificador : modelo equivalente

Para modelar la salida, necesitamos describir su comportamiento como si fuera la entrada de otro circuito.

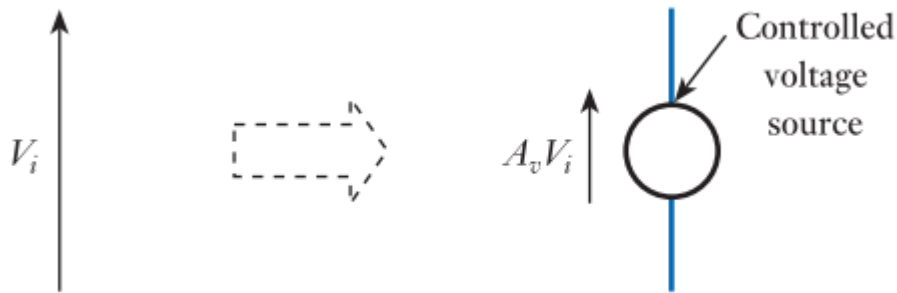


Cualquier tensión de entrada de un circuito complejo se puede modelar mediante el teorema de thevenin. Su equivalencia es la tensión thevenin, con una resistencia en serie, la resistencia thevenin, que la llamamos **Resistencia de salida, R_o**

Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

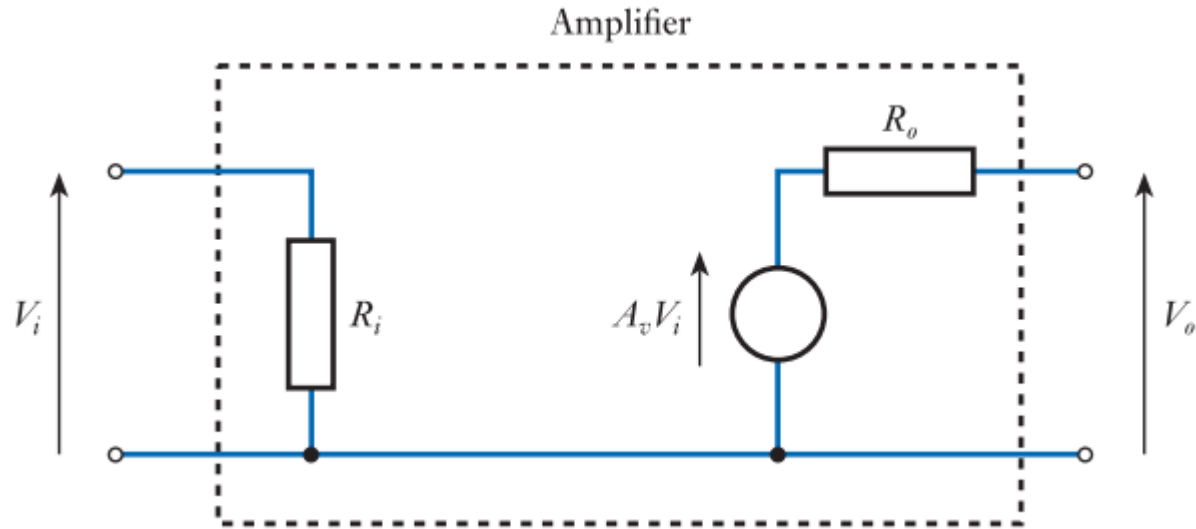
Ganancia del amplificador : modelo equivalente

La ganancia del sistema , se puede modelar mediante una fuente de tensión controlada por la tensión de entrada, donde A_v es la ganancia en tensión



Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

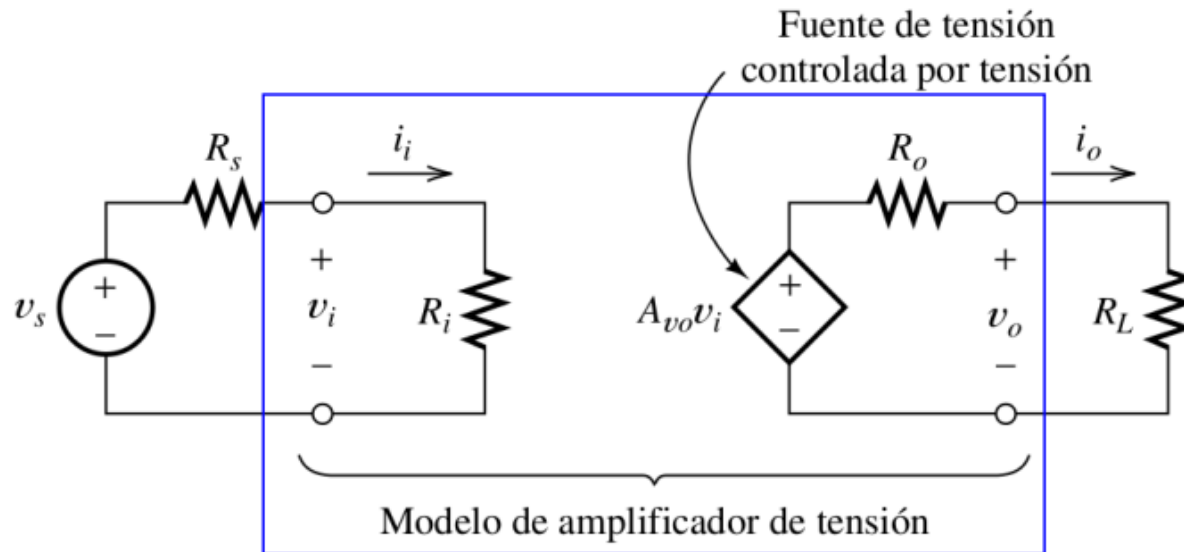
Modelo equivalente del Amplificador



La ventaja de un circuito equivalente es que permite calcular fácilmente los efectos de los circuitos externos conectados al amplificador (que también tienen una resistencia de entrada y de salida)

Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

- Así si amplificador es conectado a un sensor (modelado por su equivalente Thévenin) y a otro modulo electrónico (modelado por una resistencia de carga), tenemos:

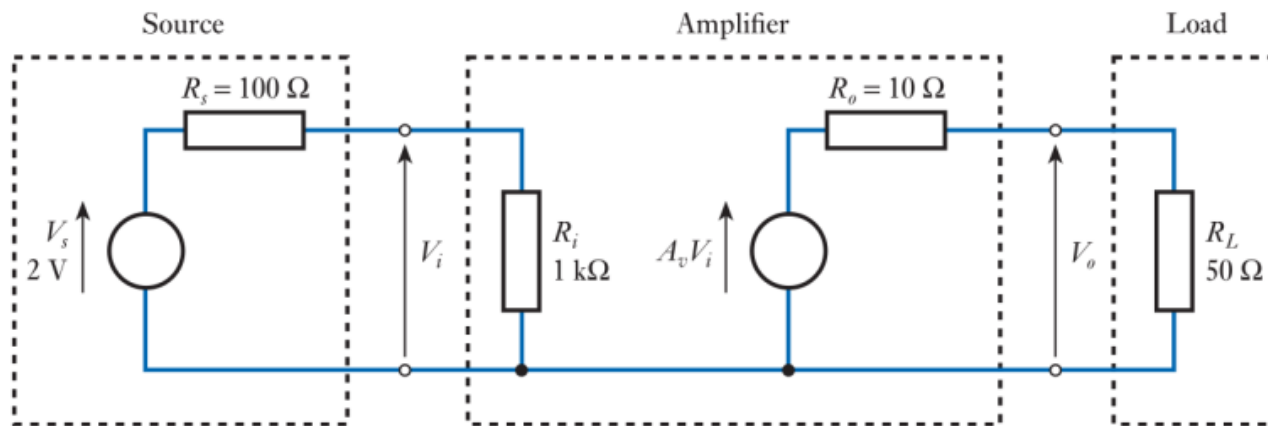


Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Circuito Equivalente de un Amplificador de tensión

Ejemplo 1: Un amplificador tiene una ganancia nominal de voltaje de $A_{vo} = 10$, una resistencia de entrada de $1 \text{ k}\Omega$ y una resistencia de salida de 10Ω . El amplificador se conecta a un sensor que produce un voltaje de 2 V y tiene una resistencia de salida de 100Ω , y a una resistencia de carga de 50Ω , ¿cuál será el voltaje de salida del amplificador? (esto es, el voltaje que experimental la carga). Calcule la ganancia del circuito, A_v .

$$V_o = 15.2 \text{ V}; A_v = 8.35$$



Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Comentarios sobre el ejemplo 1

- Cuando un amplificador real se conecta a un fuente (ej. sensor) y a una carga, el V_o puede ser considerablemente menor que el que uno hubiera esperado dados el voltaje de la fuente (V_S) y la ganancia del amplificador en circuito abierto (A_{v0}).
- Un amplificador real no puede proporcionar una tensión de salida fija independientemente de la resistencia de carga.
- **Conclusión:** La ganancia del circuito A_v se ve afectada por los circuitos a los que lo conectamos.
- Vemos como $V_i < V_S$ debido a los efectos de $R_S \rightarrow V_i = V_S \frac{R_i}{R_S + R_i}$
- Vemos como $V_o < A_{v0} V_i$ debido a los efectos de $R_o \rightarrow V_o = V_i A_{v0} \frac{R_L}{R_o + R_L}$
- Esto se conoce como **efecto de carga**.

Modelo equivalente del Amplificador de Tensión

Comentarios sobre el ejemplo 1

- La tensión de salida, V_o disminuye al disminuir la resistencia de carga R_L , y la resistencia de salida influye en esta reducción. Cuando la carga consume corriente, se produce una caída de tensión en la resistencia de salida, y se reduce la tensión de salida.

¿ Cuales serían los valores de la resistencia de entrada y salida de un amplificador de voltaje ideal?

- Si repetimos el ejemplo 1 con un amplificador con $R_i \rightarrow +\infty$ y $R_o = 0$ vemos como desaparecen los efectos de carga ($V_i = V_S$; $V_o = V_i A_{v0}$ y $A_v = A_{v0}$). **Este sería un amplificador de voltaje ideal.**

Análisis en Potencia del Amplificador de Tensión

Potencia

- Estudiemos la actuación del amplificador en términos de energía.
- Si $V_o = V_o(R_L)$, es de esperar que la energía entregada por el amplificador dependa de R_L .

Potencia de salida, P_o

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} = A_{v0}^2 V_i^2 \frac{R_L}{(R_L + R_o)^2}$$

Ejemplo 2: ¿ qué valor de R_L hace que un amplificador dé la máxima la potencia? ¿Cuál será su valor?

Sol. $R_L = R_o$ (adaptación de impedancia), $P_{o,max} = \frac{A_{v0}^2 V_i^2}{4R_L}$

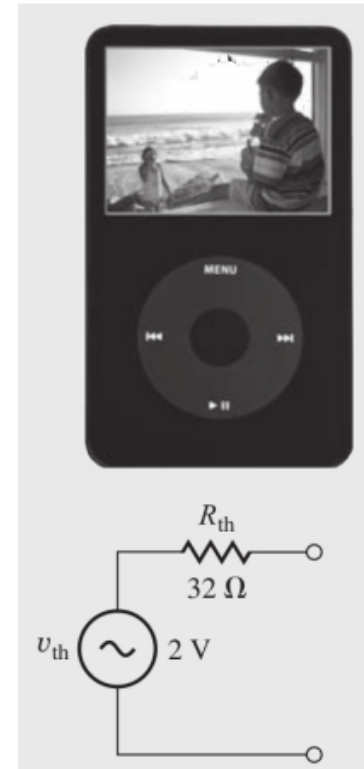
Análisis en Potencia del Amplificador de Tensión

Potencia

Un ejemplo de adaptación de impedancias

- Los auriculares en un reproductor MP3 son un ejemplo de esto
 - Un iPod puede ser representado por una fuente alterna de amplitud 2V y una resistencia de $32\ \Omega$.
- La salida está diseñada para tener una salida de 15 mW hacia los auriculares que tienen una impedancia de $32\ \Omega$.

Un análisis similar se puede hacer para impedancias complejas en lugar de simples resistencias. Máxima potencia es transferida cuando la impedancia de la carga es igual a la complejo conjugada de la impedancia de salida.



Análisis en Potencia del Amplificador de Tensión

Potencia y decibelios

Ganancia en potencia de un amplificador de tensión, A_P

$$A_P = \frac{P_o}{P_i}$$

P_i : potencia que entrega la fuente de señal;

P_o : potencia que transmite el amplificador a la carga

$$A_P = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} = A_V A_I = A_V^2 \frac{R_i}{R_L}$$

A_P no es característica del amplificador, depende de la carga.

Los valores típicos de A_P en Electrónica pueden ser muy altos ($\sim 10^6 - 10^7$ son valores comunes) \Rightarrow Hay que buscar una forma más cómoda de trabajar con ellos (**notación en decibelios**)

Análisis en Potencia del Amplificador de Tensión

Potencia y decibelios

La ganancia en potencia en decibelios (dB)

$$A_{P(dB)} = 10 \log(A_P) = 10 \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right)$$

Por ejemplo:

$$\text{Si } A_P = 100 \Rightarrow A_{P(dB)} = 20,$$

$$\text{Si } A_P = 1 \Rightarrow A_{P(dB)} = 0$$

Recordatorio Logaritmos: $\log_{10} x = y$ 10 elevado a Y da X

$$A_P = 10 \rightarrow A_P \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10} (A_P) = 10 \cdot 1 = 10 \text{ dB}$$

$$A_P = 100 \rightarrow A_P \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10} (A_P) = 10 \cdot 2 = 20 \text{ dB}$$

$$A_P = 1000 \rightarrow A_P \text{ (dB)} = 10 \cdot \log_{10} (A_P) = 10 \cdot 3 = 30 \text{ dB}$$

$$\log_{10} 10 = 1 ;$$

$$\log_{10} 100 = 2 ;$$

$$\log_{10} 1000 = 3$$

$$\log_{10} 0.1 = -1 ;$$

$$\log_{10} 0.01 = -2 ;$$

$$\log_{10} 0.001 = -3$$

Análisis en Potencia del Amplificador de Tensión

Ganancia en Potencia $\rightarrow A_p$ (dB) = $10 \log_{10} (P_o/P_i)$

$$A_p(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{\frac{V_o^2}{R_L}}{\frac{V_i^2}{R_i}} \quad \text{Si y solo si } R_i=R_L \rightarrow A_p(dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{V_o^2}{V_i^2} = 20 \cdot \log_{10} \frac{V_o}{V_i}$$

Ganancia de tensión expresada en decibelios $\rightarrow A_v$ (dB) = $20 \log_{10} (A_v) = A_p$ (dB)

En este caso la ganancia en potencia A_p es igual que la ganancia en tensión A_v

Y normalmente, aunque R_i sea distinto de R_L se representa la ganancia de tensión como

$$A_v(dB) = 20 \cdot \log_{10} (A_v)$$

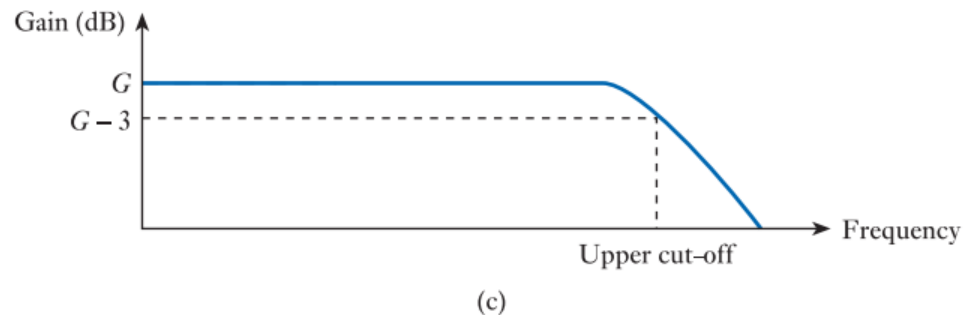
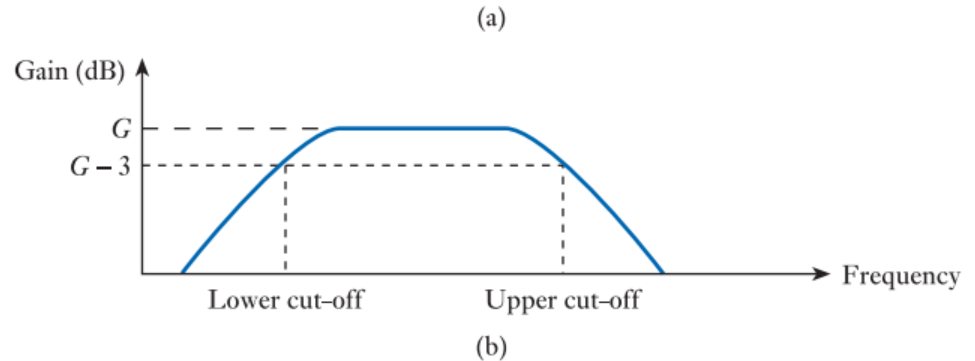
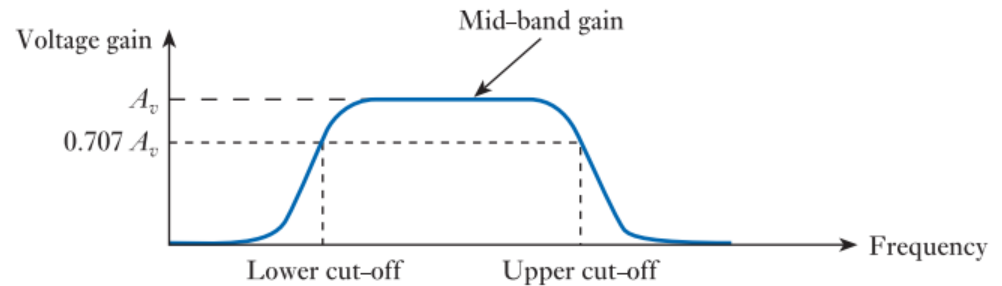
Respuesta en Frecuencia

Ancho de Banda = frecuencias para el cual el amplificador opera sin atenuación

La ganancia decae para frecuencias altas y (no siempre) bajas

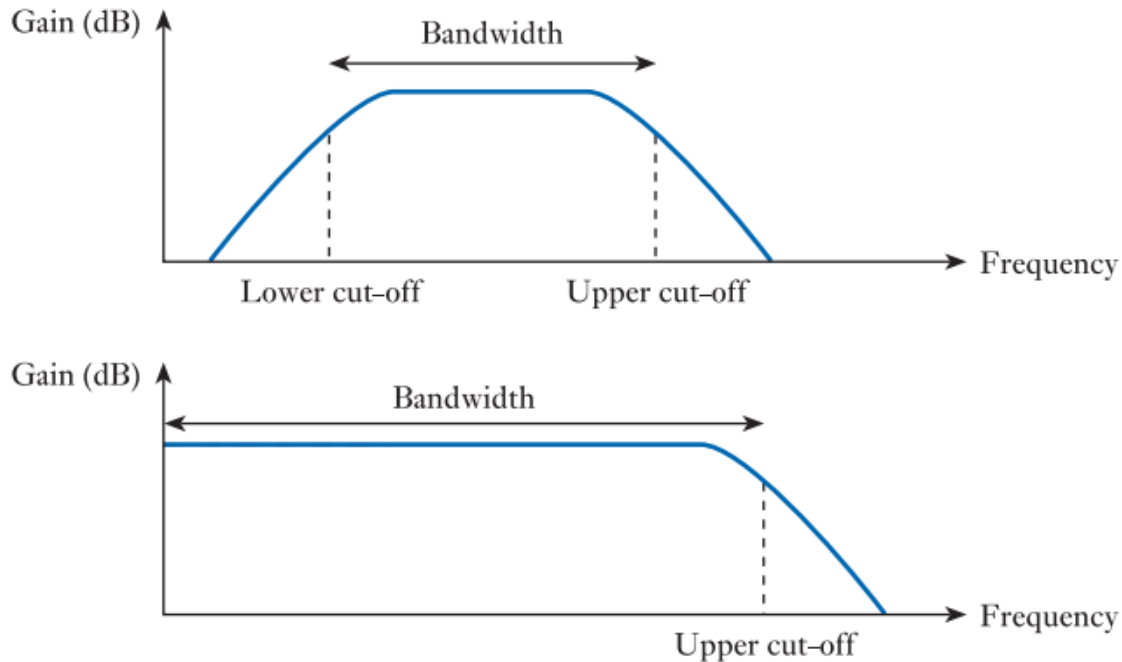
Frecuencias de corte: La potencia decae a $\frac{1}{2}$ de su valor.

La caída de potencia a la mitad de su valor, representa una **caída de tensión de 0.707** o una **caída en ganancia de aproximadamente 3dB**.



Respuesta en Frecuencia

El ancho de frecuencias de un circuito donde la ganancia no sufre atenuación se denomina **Ancho de Banda** = Bandwidth

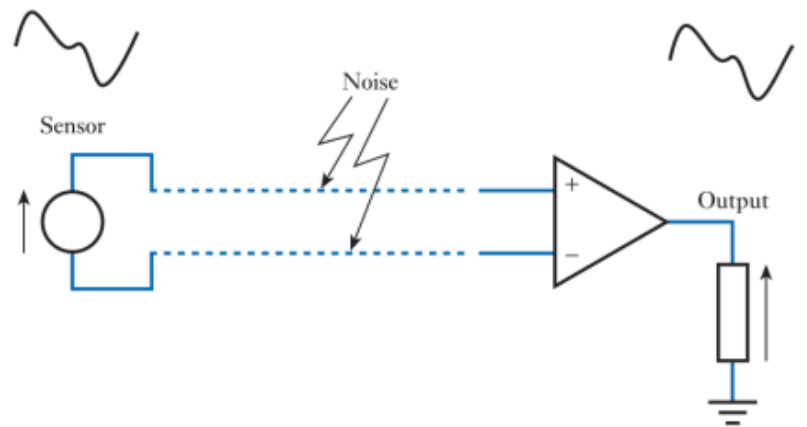
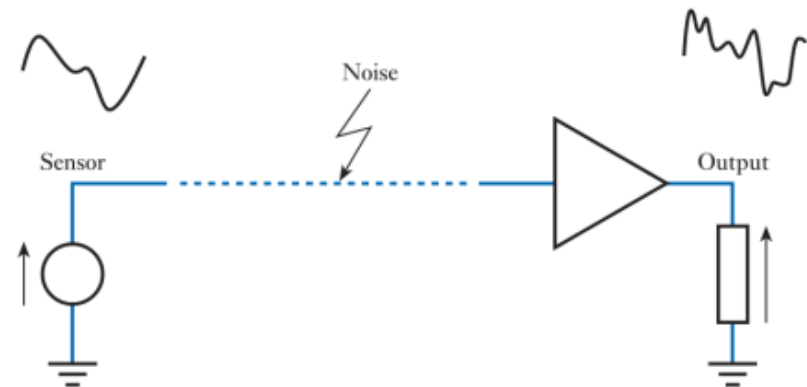


Es importante que el ancho de banda de un amplificador sea el adecuado para la frecuencia de las señales que van a ser utilizadas.

Amplificador Diferencial

Ejemplo de aplicación de un Amplificador Diferencial

- Un cable puede sufrir interferencias que añaden ruido a la señal del sensor.
- Este ruido es amplificado junto a la señal del sensor y aparecerá amplificado a la salida.
- Si la señal es llevada en forma diferencial usando un segundo cable gemelo, el ruido en el amplificador aparece en modo común y es ignorado, mientras que la señal del sensor va en modo diferencial y es amplificada



Amplificador Diferencial

- Hasta ahora los amplificadores tenían un único voltaje de entrada respecto a tierra.

- Los **amplificadores diferenciales** tienen 2 entradas (V_{i1} y V_{i2}) y una salida V_o tal que

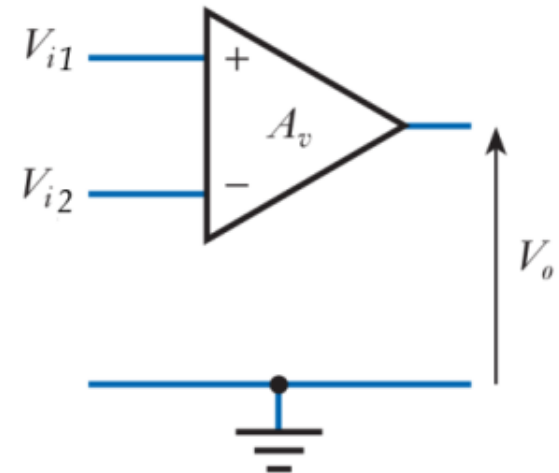
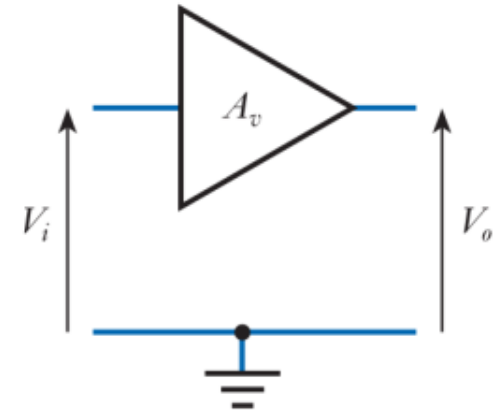
$$V_o(t) = A_v(V_{i1} - V_{i2}) = A_v V_{id}$$

+ : Terminal no inversora

- : Terminal inversora

$V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$: tensión de entrada diferencial

Las señales que son comunes en ambas terminales se conocen como **señales en modo común**. Un amplificador diferencial ideal cancela todas las señales en modo común y amplifica las de modo diferencial.

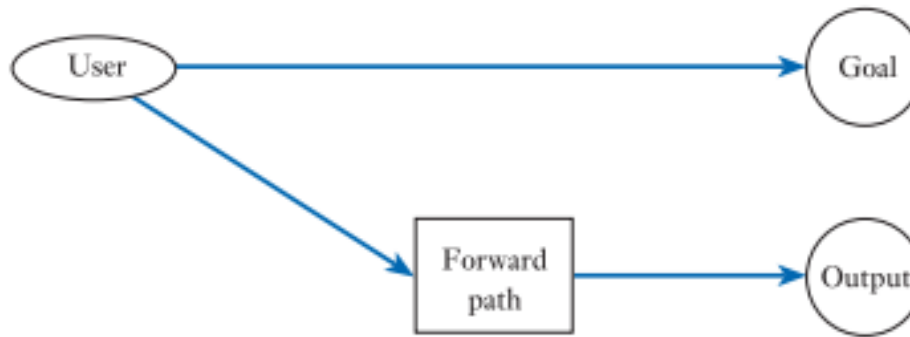


Amplificador Operacional

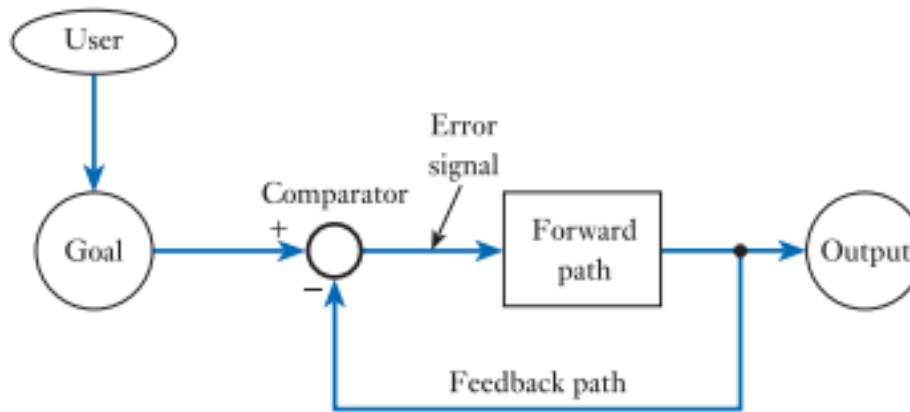
- Una forma común de amplificador diferencial es el **amplificador operacional**. Se construye fabricando todos los componentes necesarios en un chip de silicio, o **circuito integrado monolítico (CI)**
- Anteriormente hemos visto que un amplificador ideal tiene una resistencia de entrada muy alta (mega o gigaohms) y una resistencia de salida muy baja (ohms o decenas de ohms).
- Además tienen una ganancia muy alta, quizás 10^5 o 10^6 . Por estas razones, los amplificadores operacionales son excelentes “bloques de construcción”, no solo para amplificar, sino para una multitud de circuitos. Los vamos a ver más adelante.
- Desafortunadamente, aunque tienen una características muy atractivas, **sufren de variabilidad**. Esto quiere decir que sus atributos (tales como la ganancia o la resistencia de entrada) tienden a variar de un dispositivo a otro, o a variar incluso en el propio componente, por ejemplo, con cambios en la temperatura.
- Por tanto, **necesitamos técnicas para superar esta variabilidad** y ajustar las características del dispositivo a los requerimientos de la aplicación que estemos desarrollando. Estas técnicas las vamos a ver a continuación.

Control y Realimentación

Sistemas de control en lazo abierto y lazo cerrado (con realimentación)



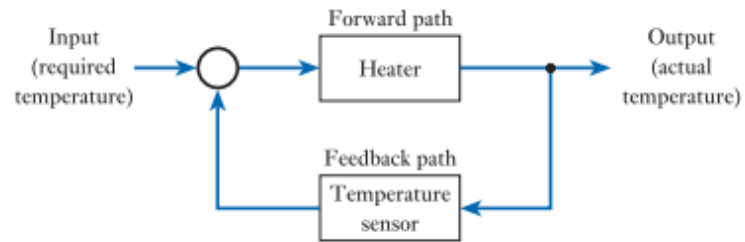
(a) An open-loop system



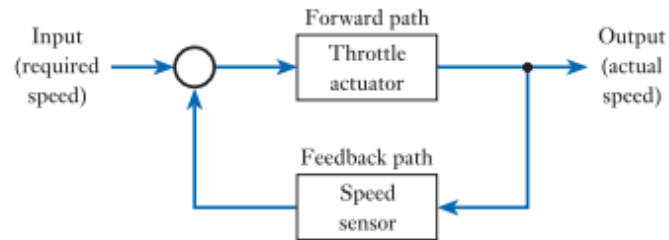
(b) A closed-loop system

Control y Realimentación

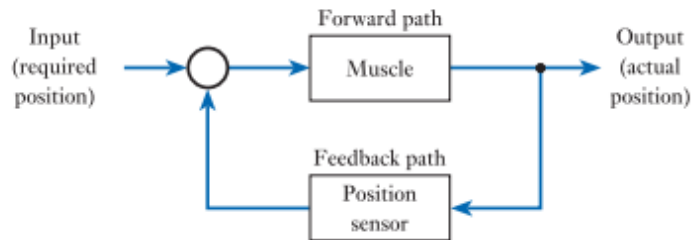
Sistemas de control en lazo abierto y lazo cerrado (con realimentación)



(a) Temperature control in a room heater



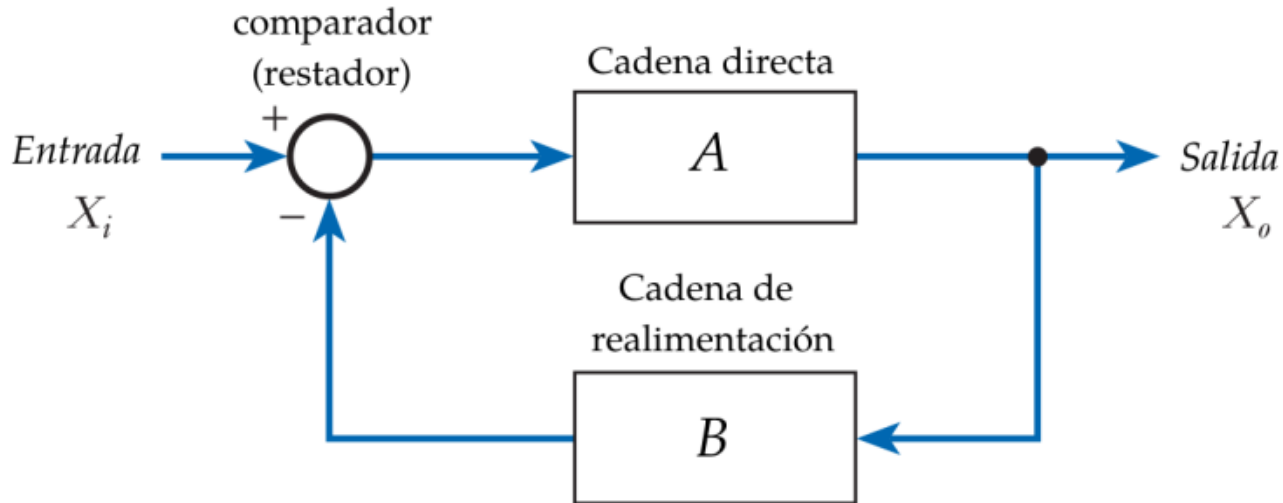
(b) Cruise control in a car



(c) Position control in human limbs

Realimentación

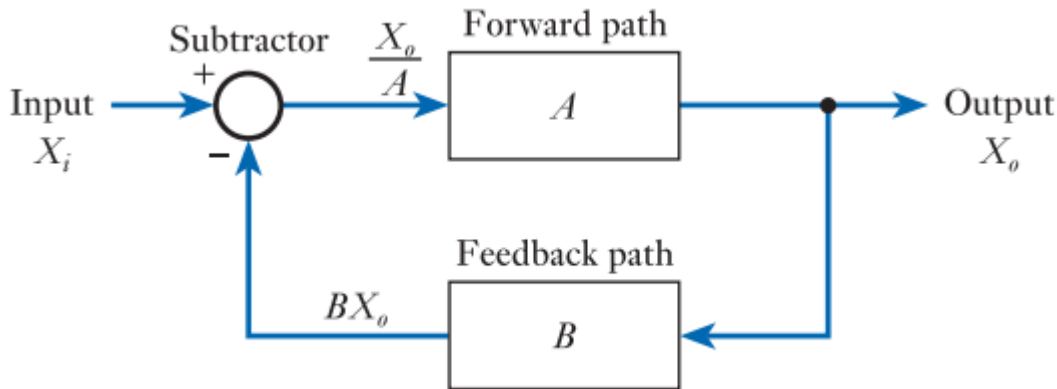
Mecanismo de control en el que la señal de salida se redirige a la entrada para regular el comportamiento del sistema.



Objetivos

- ▶ Reducir la dependencia de la variabilidad de los componentes
- ▶ Superar los límites tecnológicos de los mismos

Realimentación



- X_i y X_o son, en general, magnitudes físicas (ej. voltajes)

- A y B en electrónica son ganancias
 A = Ganancia en bucle abierto
 B = factor de realimentación
 G = Ganancia en bucle cerrado

$$\frac{X_o}{A} = X_i - BX_o$$

$$G = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

or by rearranging

$$\frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

- Las propiedades del sistema realimentado dependen de A y B

G también se denomina función de transferencia: relación entre la entrada y la salida de un sistema

Realimentación

$$G = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AB}$$

- Las propiedades del sistema realimentado dependen de A y B

A : ganancia en lazo abierto

B : ganancia de la realimentación

- Si AB es negativa $\rightarrow 1+AB < 1 \rightarrow G > A \rightarrow$ **Realimentación Positiva**
(y además, si $AB = -1 \rightarrow G$ es infinita!) Esto tiene un rango limitado de aplicaciones pero es útil para producir osciladores.
- Si AB es positiva $\rightarrow 1+AB > 1 \rightarrow G < A \rightarrow$ **Realimentación Negativa**

(y además, si $AB \gg 1 \rightarrow G = \frac{A}{1+AB} \rightarrow G \approx \frac{A}{AB} = \frac{1}{B}$)

Este caso es MUY IMPORTANTE porque la ganancia del sistema realimentado es independiente de la ganancia en lazo abierto A ! y sólo queda determinada por la ganancia de la realimentación B !

Realimentación

Realimentación negativa en electrónica

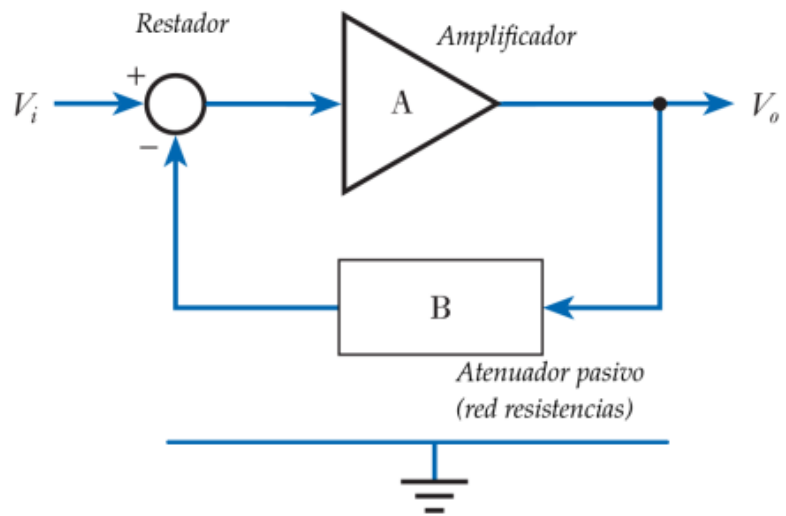
$AB > 0$ y $AB \gg 1 \Rightarrow$

$$G = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AB} \approx \frac{A}{AB} = \frac{1}{B}$$

• Usaremos amplificadores de tensión $\Rightarrow X_i = V_i$ y $X_o = V_o$

• Si usamos un **amplificador activo (inestable)** en la cadena directa y circuitos pasivos (estables) en la cadena de realimentación, podemos conseguir un **amplificador estable**.

• Si queremos que $G > 1 \rightarrow |B| < 1 \Rightarrow$ (**atenuador pasivo**)

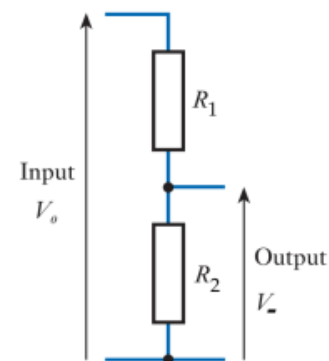
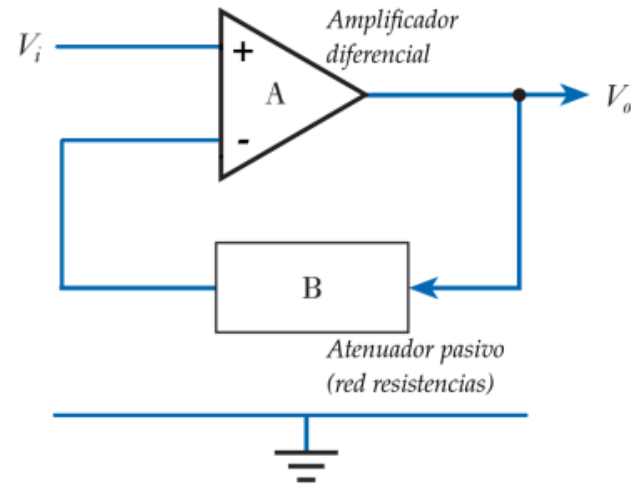


Realimentación

Realimentación negativa en electrónica

- La función del restador y el amplificador se puede ser implementada usando un amplificador diferencial con $A \gg B$
- Por ejemplo, una de las opciones para construir un atenuador pasivo es usar un divisor de tensión

$$V_- = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

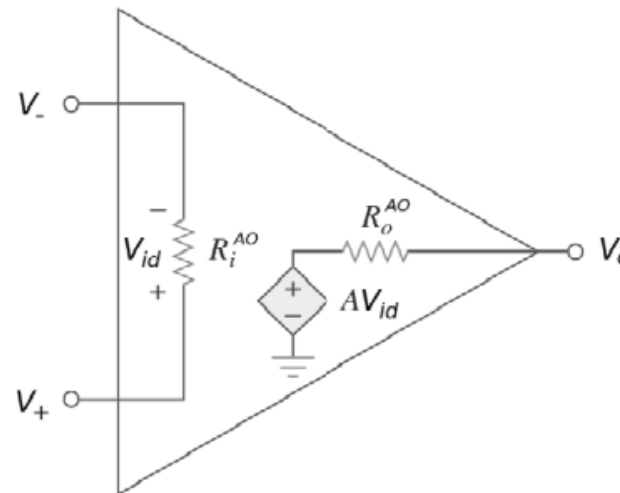


Amplificador Operacional

AO: Concepto y componente

	AO ideal	AO real
Ganancia, A	$+\infty$	$10^5 - 10^7$
Resistencia de entrada, $R_i^{AO} (\Omega)$	$+\infty$	$10^6 - 10^{12}$
Resistencia de salida, $R_o^{AO} (\Omega)$	0	$10^2 - 10^3$
Ancho de banda, $f_{CH}^{AO} (\text{Hz})$	$+\infty$	$\sim 10^2$

*Circuito
equivalente*



Amplificador Operacional

- El hecho de asumir que la tensión diferencial de entrada y la corriente de entrada sean cero se denomina *restricción del punto-suma o cortocircuito virtual*.
- Esta suposición que se deriva del modelo ideal de AO la vamos a emplear para amplificadores operacionales realimentados negativamente.

Restricción del punto-suma o cortocircuito virtual

1) Ganancia Infinita $\rightarrow V_o/V_i = \infty \rightarrow V_i = V_+ - V_- = 0 \rightarrow V_+ = V_-$

2) Impedancia de entrada Infinita $\rightarrow R_i = \infty \rightarrow I_+ = I_- = 0$

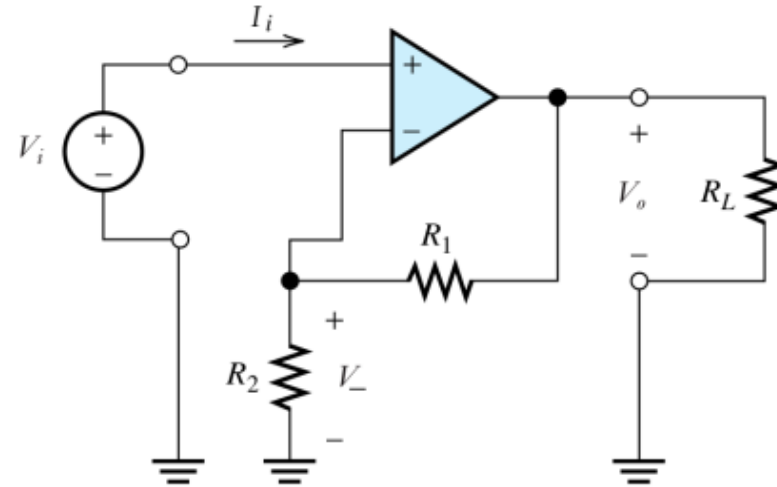
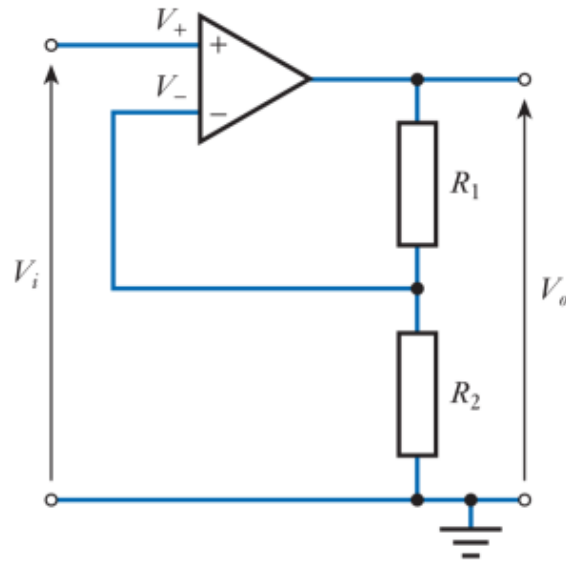
Amplificador Operacional

Para analizar circuitos con AO ideales

1. Verificar la presencia de realimentación negativa, que suele tomar la forma de una red de resistencias conectada al terminal de salida y al terminal de entrada inversor.
2. Considerar que se fuerzan a cero la tensión diferencial de entrada y la corriente de entrada del amplificador operacional (Restricción del punto-suma).
3. Aplicar los principios del análisis de circuitos, como las leyes de Kirchhoff y la ley de Ohm, para calcular los valores de interés.

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

1. Amplificador No Inversor



1) $V_+ = V_-$

$$V_- = V_+ = V_i$$

2) $I_+ = I_- = 0$

$$V_- = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

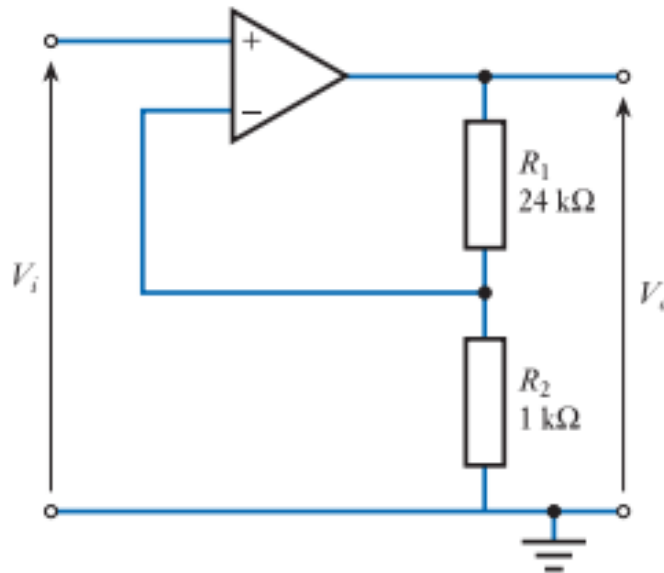
$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

1. Amplificador No Inversor

Design a non-inverting amplifier with a gain of 25 based on an operational amplifier.

We start with our standard circuit.



$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Therefore, if $G = 25$

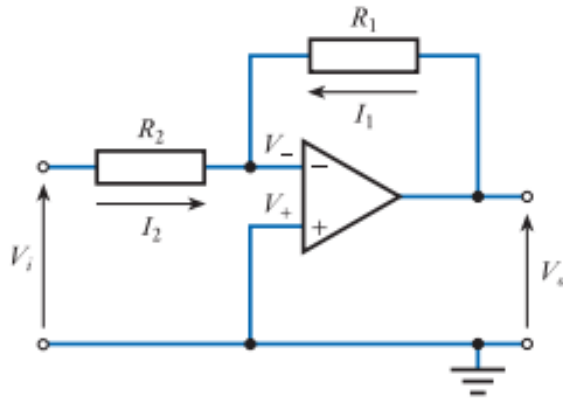
$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = 25$$

$$R_1 + R_2 = 25R_2$$

$$R_1 = 24R_2$$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

2. Amplificador Inversor



$$1) V_+ = V_-$$

$$V_- = V_+ = 0$$

$$2) I_+ = I_- = 0$$

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$I_1 = -I_2$$

$$\frac{V_o}{R_1} = -\frac{V_i}{R_2}$$

$$I_1 = \frac{V_o - V_-}{R_1} = \frac{V_o - 0}{R_1} = \frac{V_o}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_i - V_-}{R_2} = \frac{V_i - 0}{R_2} = \frac{V_i}{R_2}$$

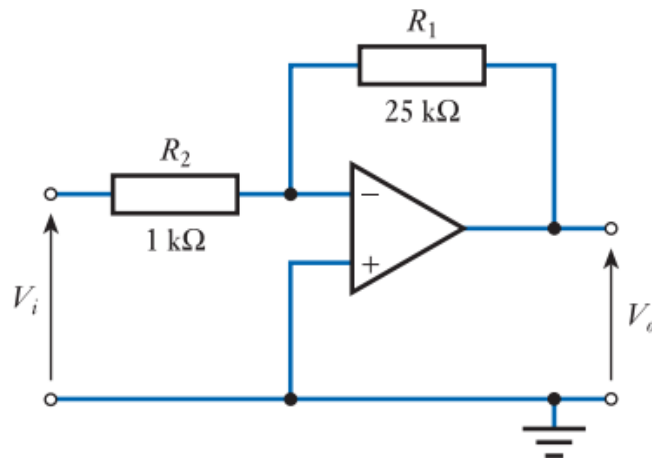
$$G = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

2. Amplificador Inversor

Design an inverting amplifier with a gain of -25 based on an operational amplifier.

We start with our standard circuit.



$$G = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$$

$$-\frac{R_1}{R_2} = -25$$

$$R_1 = 25R_2$$

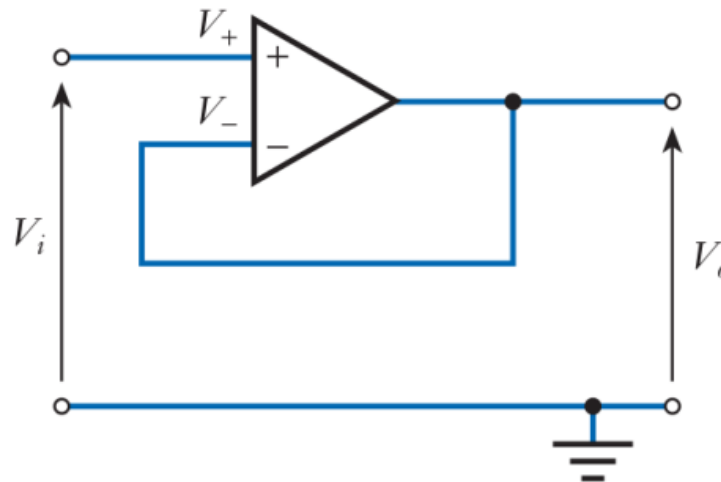
$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega,$$

$$R_1 = 25 \text{ k}\Omega.$$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

3. Seguidor de tensión o buffer

- Caso especial de un amplificador no inversor con $R_1 = 0$ y $R_2 \approx +\infty$
- La realimentación produce una R_i muy alta y una R_o muy baja, de manera que los efectos de carga pueden ser despreciados.



Seguidor de tensión o Buffer

- Voltaje de salida $G = \frac{V_o}{V_i} = 1$
- Resistencia de entrada del circuito: $R_i \approx +\infty$
- Resistencia de salida del circuito: $R_o = 0$

Ejemplo: Podemos incluirlo a la salida de un sensor para poder obtener la señal e incorporarla a otro modulo electrónico sin que haya apenas pérdidas de señal.

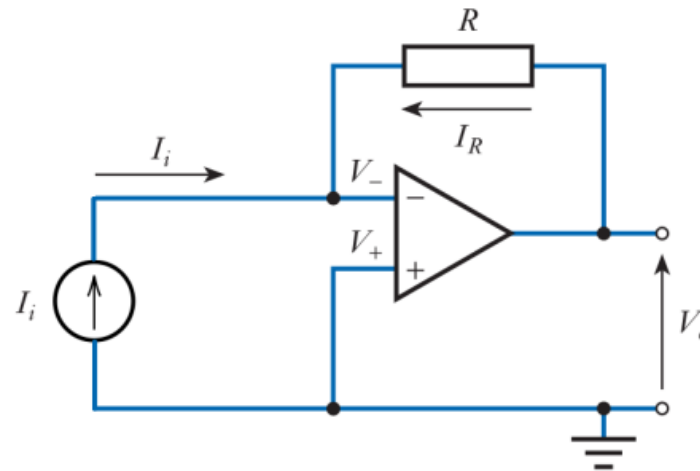
Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

4. Convertidor de Corriente a Tensión

Produce una tensión de salida proporcional a la corriente de entrada.

$$V_+ = V_- = 0$$

$$I_i = -I_R = -\frac{V_o}{R}$$



Convertidor de corriente a tensión

- Voltaje de salida $V_o = -RI_i$
- Resistencia de entrada del circuito: $R_i = 0$
- Resistencia de salida del circuito: $R_o = 0$

Por ejemplo, lo podemos usar en algunos sensores que su señal de salida es una corriente

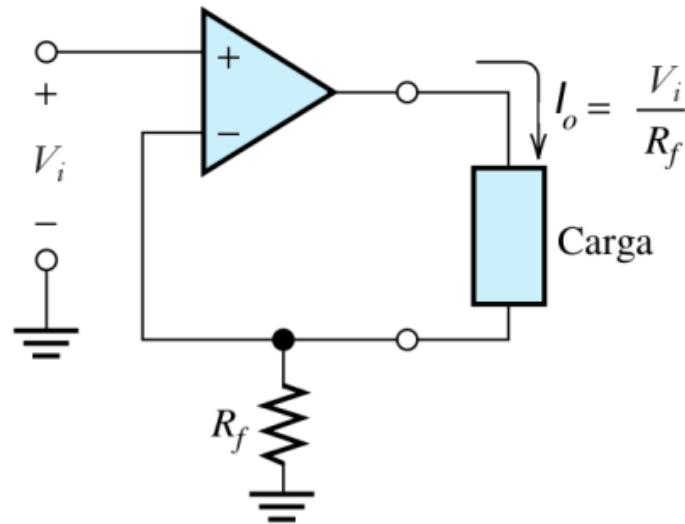
Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

5. Convertidor de Tensión a Corriente

- Carga en flotación, no está conectada a tierra.

$$V_+ = V_- = V_i$$

$$I_o = \frac{V_i}{R_f}$$



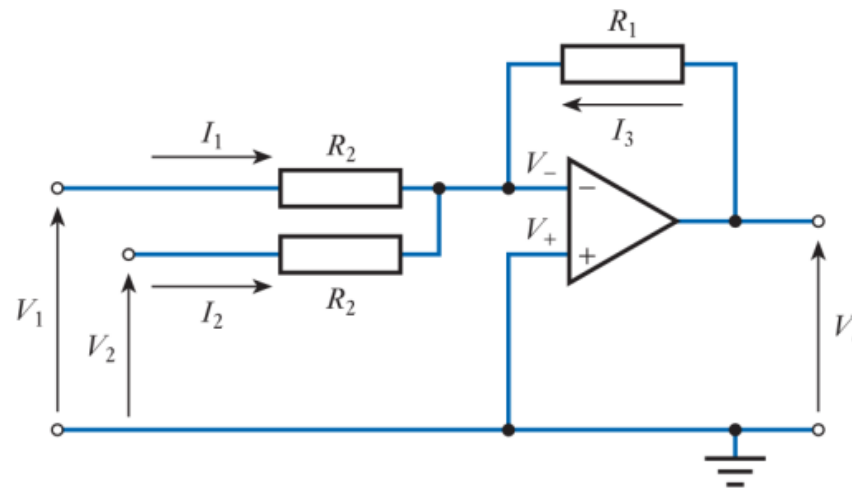
Convertidor de tensión a corriente

- Corriente de salida $I_o = \frac{V_i}{R_f}$
- Resistencia de entrada del circuito: $R_i \approx +\infty$
- Resistencia de salida del circuito: $R_o \approx +\infty$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

6. Sumador Inversor

Permite sumar algebraicamente voltajes.



$$I_1 = \frac{V_1}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$

$$I_3 = \frac{V_o}{R_1}$$

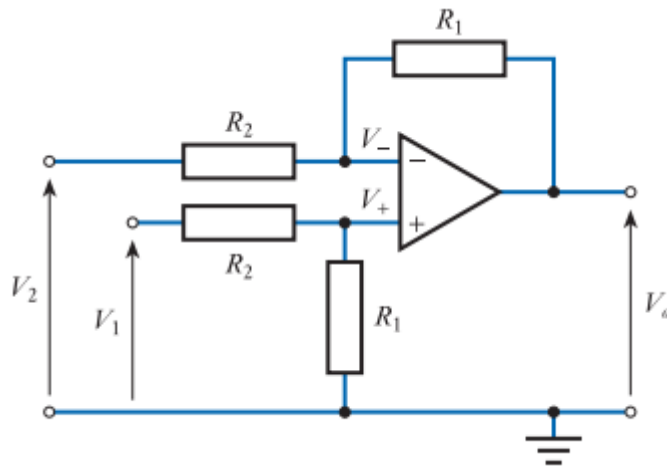
$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

$$\frac{V_o}{R_1} = -\left(\frac{V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

$$V_o = -(V_1 + V_2) \frac{R_1}{R_2}$$

Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

7. Amplificador Diferencial



$$V_+ = V_-$$

$$V_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = V_2 + (V_o - V_2) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_1 R_1 = V_2 R_1 + V_2 R_2 + V_o R_2 - V_2 R_2$$

$$V_o = \frac{V_1 R_1 - V_2 R_1}{R_2}$$

$$V_o = (V_1 - V_2) \frac{R_1}{R_2}$$

Conclusión:

- La realimentación negativa nos permite generar circuitos amplificadores con características constantes a pesar de las posibles variaciones de los componentes activos.

Comentario resumen:

- Con un amplificador operacional, hemos construido un circuito amplificador. Tenemos que tener claro pues, que existen 2 amplificadores: el amplificador diferencial de ganancia A (en bucle abierto) y el circuito constituido con él, de ganancia A_f (en bucle cerrado).

Amplificador Operacional

- El **amplificador operacional** es un amplificador diferencial con un comportamiento cercano al ideal:

Muy alta ganancia

Alta impedancia de entrada, $R_i \uparrow$

Baja impedancia de salida, $R_o \downarrow$

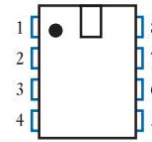
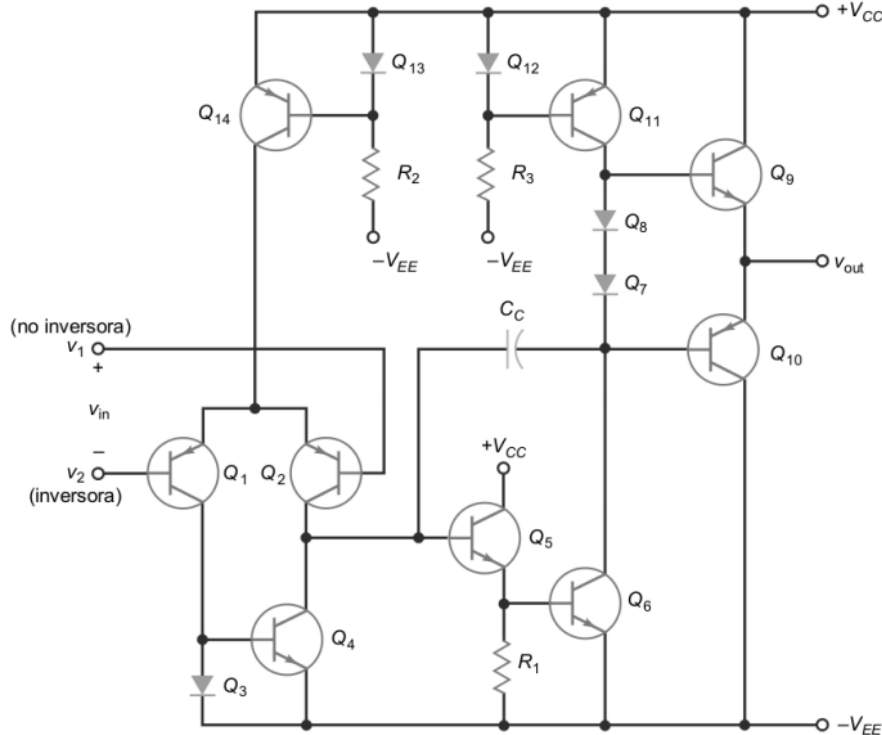
- En su diseño se utilizan varias etapas amplificadores (multitud de transistores conectados en cascada) para alcanzar una alta ganancia de voltaje.

- **Los amplificadores operaciones son la solución más recurrida por ingenieros (de cualquier disciplina) para solucionar problemas de control y de instrumentación.**

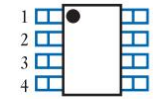
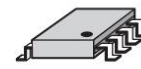
Amplificador Operacional

Un amplificador operacional (AO) es un **circuito integrado** (CI) formado por un número grande de elementos en un único componente de semiconductor, y que actúa como un tipo de **amplificador diferencial de tensión**.

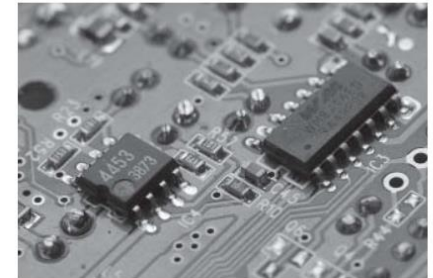
Esquemático simplificado del 741.



(a) A DIL package

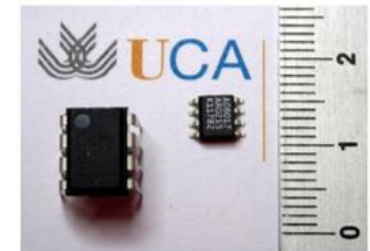


(b) An SMT package

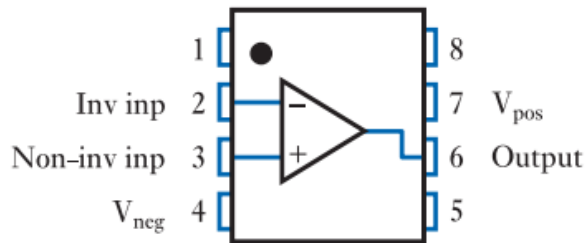


(c) An SMT circuit board

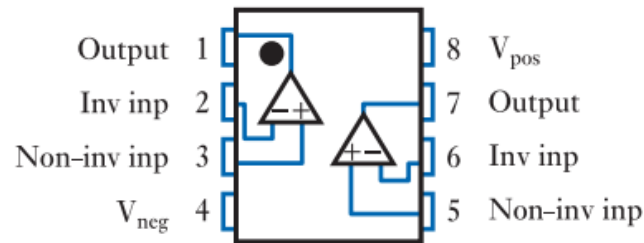
Encapsulados
Through hole y SMD
(Surface mount
device)



Amplificador Operacional



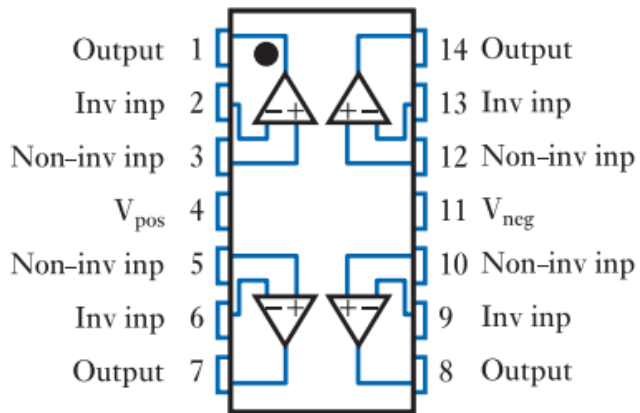
(a) A single op-amp



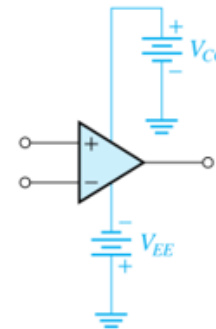
(b) A dual op-amp

Amplificador **Activo**, necesita alimentación externa:

$$V_{CC}; -V_{EE}$$



(c) A quad op-amp



En los esquemas del circuito la alimentación externa se omite por simplicidad (se sobreentiende)

Alimentación AO y excursión de salida

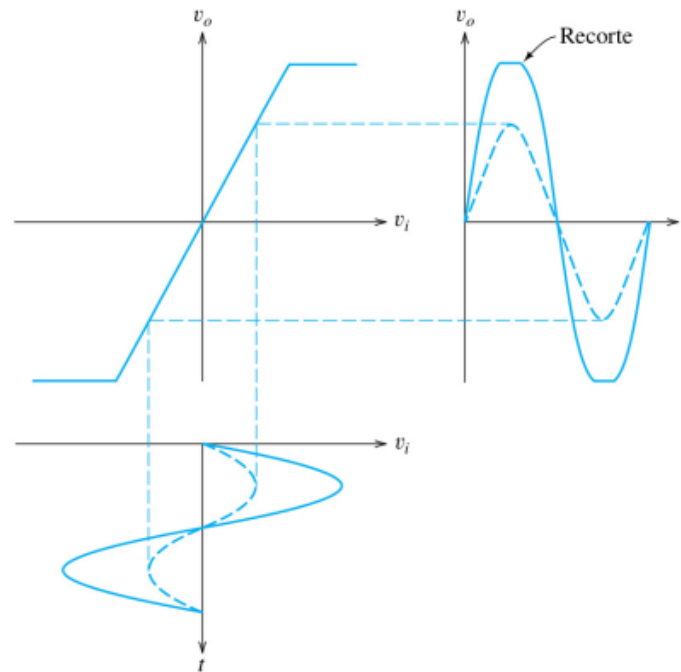
- ⊙ Existen varios modos de trabajo no lineal para los amplificadores operacionales reales. En primer lugar, la tensión de salida presenta un límite máximo y un límite mínimo.
- ⊙ Si una señal de entrada es lo suficientemente grande como para que la salida sobrepase estos límites, la salida deja de responder y se produce un **recorte**.
- ⊙ La pequeña diferencia que impide alcanzar los voltajes de las líneas de suministro de energía, o "rail" es debido a las pérdidas internas normales.
- ⊙ A los amplificadores que sí consiguen amplificar en todo el rango se dice que presentan las características rail-to-rail (línea a línea).

Alimentación AO y excursión de salida

Límites de funcionamiento

Máxima oscilación de la tensión de salida

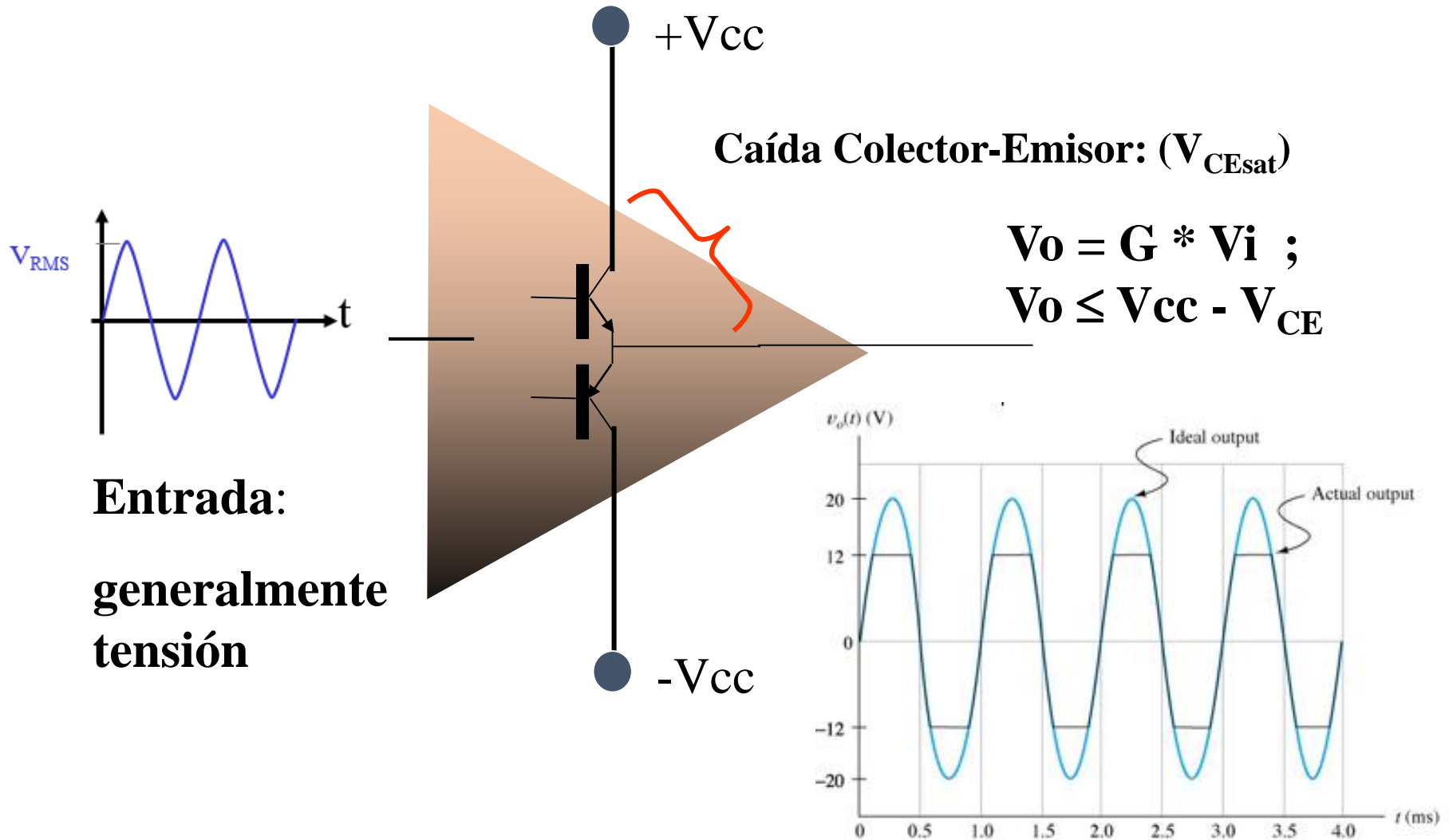
- Algo menor que la tensión de alimentación usada (entre unas décimas y 2V menor)
- Si no se respeta el límite de máxima oscilación de tensión o corriente obtenemos este recorte



Otra limitación del AO sería la corriente máxima que puede suministrar a una carga.

ej. para el A741 es de ± 25 mA

Alimentación AO y excursión de salida



Alimentación AO y excursión de salida

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 5.0V$, $V_{EE} = GND$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM258			LM358			LM2904			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	$V_{CC} = 30V$ $R_L = 2k\Omega$	26	-	-	26	-	-	22	-	-	V
		$V_{CC} = 26V$ for LM2904 $R_L = 10k\Omega$	27	28	-	27	28	-	23	24	-	V
	$V_{O(L)}$	$V_{CC} = 5V$, $R_L = 10k\Omega$	-	5	20	-	5	20		5	20	mV

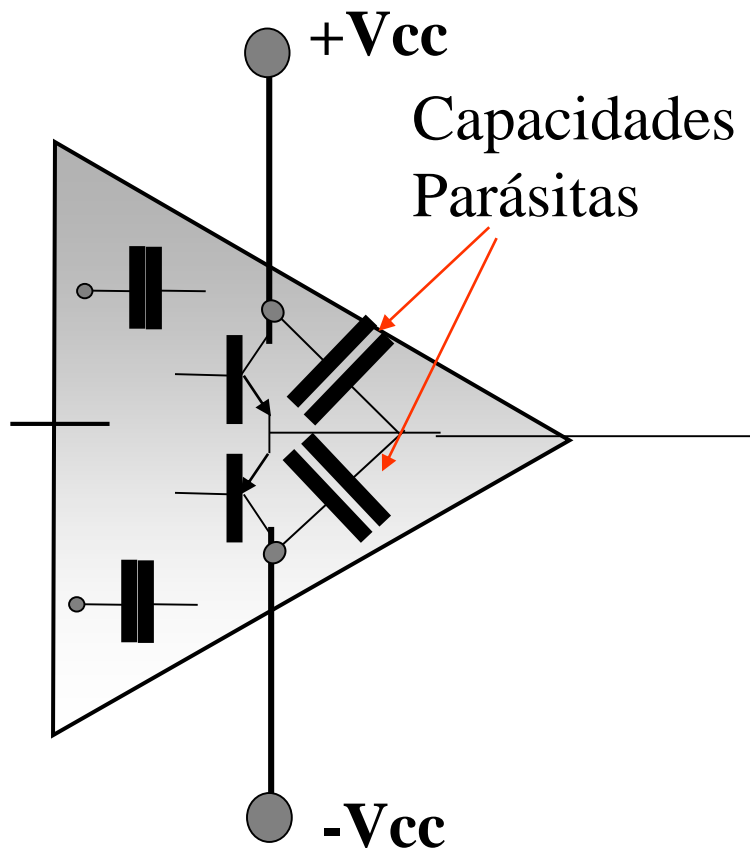
Electrical Characteristics (Note 5) (Continued)

Parameter	Conditions	LM741A			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 20V$ $R_L \geq 10k\Omega$		± 16								V
	$R_L \geq 2k\Omega$		± 15								V
	$V_S = \pm 15V$ $R_L \geq 10k\Omega$				± 12	± 14		± 12	± 14		V
	$R_L \geq 2k\Omega$				± 10	± 13		± 10	± 13		V

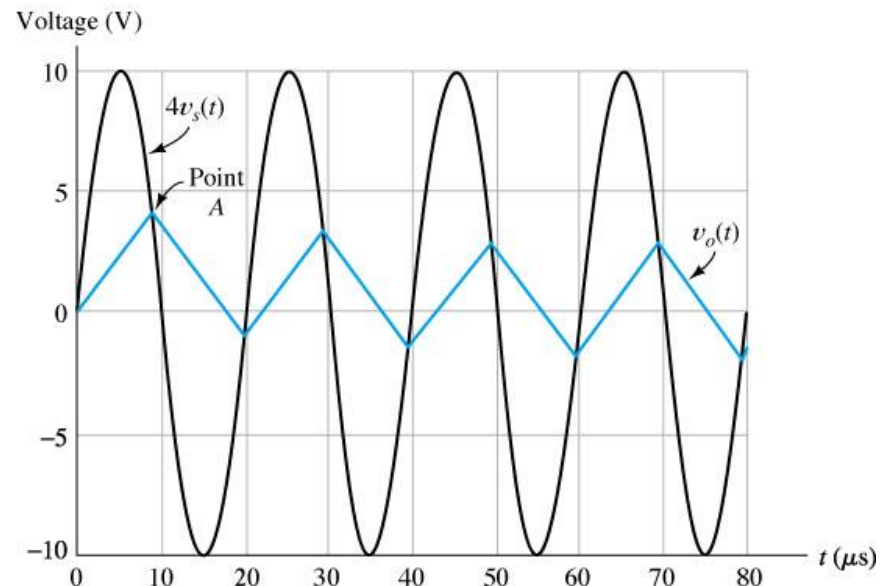
Slew-rate

➤ La tasa de variación de tensión de salida está limitada, no puede aumentar (o disminuir) más rápido que el límite **slew-rate**. En forma de ecuación:

$$\left| \frac{dv_o}{dt} \right| \leq SR$$



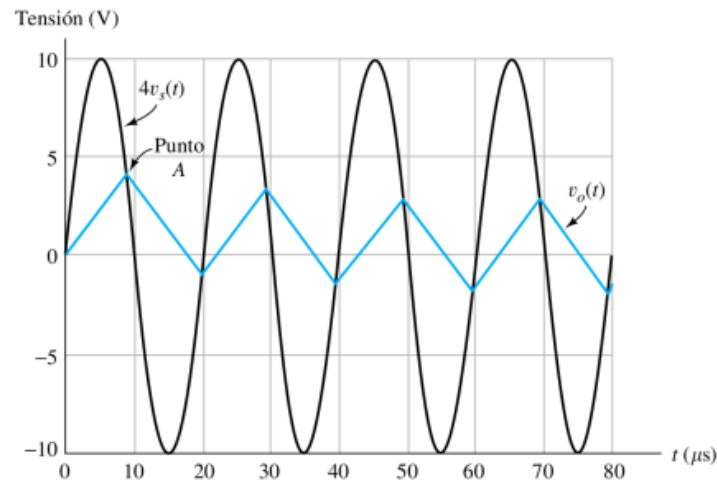
Ejemplo: $SR = 0,5V/\mu s$ y entrada con onda senoidal de 50kHz



Circuitos Típicos con Amplificador Operacional

Límites de funcionamiento: Slew-Rate

- Máxima velocidad de cambio de la tensión de salida (entre décimas y decenas de $V/\mu S$). La tasa de variación de la tensión de salida está limitada
- Si no se respeta: la señal se distorsiona
- **Ancho de banda de potencia:** margen de frecuencia para el que el AO puede producir una señal de salida senoidal sin distorsiones, con una amplitud de pico igual al máximo garantizado de la tensión de salida.



$$\left[\frac{dv_o}{dt} \right]_{max} = \omega V_{o,max} = 2\pi f V_{o,max} < SR$$

Ancho de banda de plena potencia

$$f < \frac{SR}{2\pi V_{o,max}}$$

Slew-rate

Velocidad de subida
(Slew Rate) del uA741

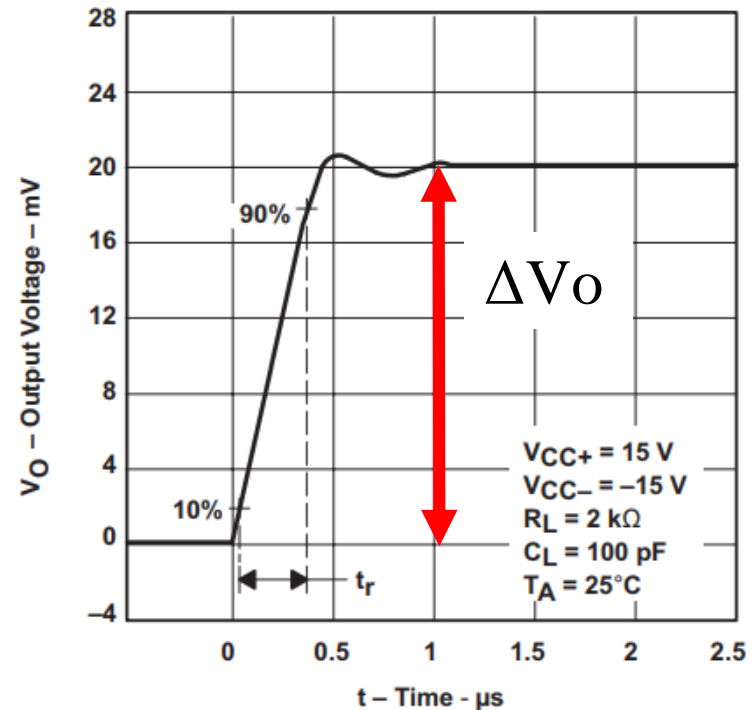


Figure 9. Output Voltage vs Elapsed Time

over operating free-air temperature range, $V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_r Rise time	$V_I = 20 \text{ mV}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$		0.3		μs
Overshoot factor	$C_L = 100 \text{ pF}$; see Figure 1		5%		
SR Slew rate at unity gain	$V_I = 10 \text{ V}$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ $C_L = 100 \text{ pF}$; see Figure 1		0.5		$\text{V}/\mu\text{s}$

Otras características

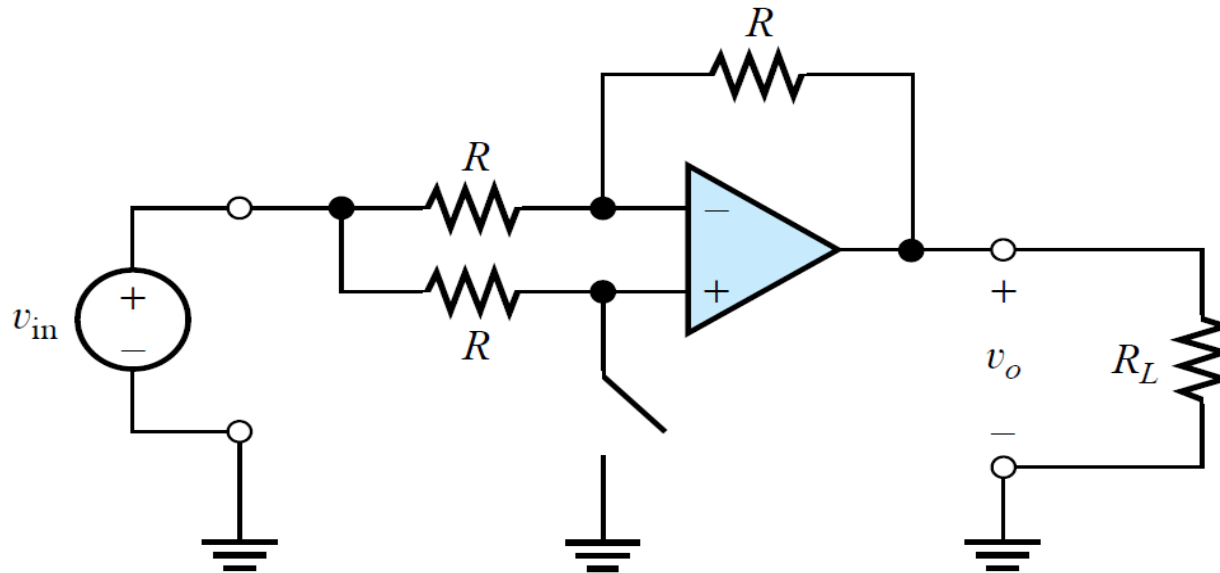
$V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^{\circ}C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_{io}	Input Offset Voltage ($R_s \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 6	mV
I_{io}	Input Offset Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 70	nA
I_{ib}	Input Bias Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100 200	nA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$				V
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, unity Gain	0.25	0.5		V/ μs
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $f = 100kHz$	0.7	1		MHz

- Input offset voltaje: Diferencia de tensión que puede haber entre las entradas.
- Input bias current: Corriente que puede haber en las entradas.
- Input offset current: Diferencia de corriente que puede haber entre las entradas.

Aplicaciones con operacionales

Amplificador Inversor/No inversor



Según cómo esté el interruptor,

Abierto \rightarrow Amp. No inversor $V_o = +V_{in}$ \rightarrow Seguidor de tensión

Cerrado \rightarrow Amp. Inversor $V_o = -V_{in}$ \rightarrow Inversor de tensión