

# DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y CIRCUITOS

## Grado en Nanociencia y Nanotecnología (2024/2025)

©2024 Autores Beatriz Romero, Belén Arredondo, Gonzalo del Pozo y Diego Martín

*Algunos derechos reservados*

Este documento se distribuye bajo la licencia  
“Atribución-Compartir Igual 4.0 Internacional” de Creative Commons,  
disponible en <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>

## Tema 1. Teoría de circuitos

## Índice

Conceptos básicos: magnitudes eléctricas, unidades. El Sistema Internacional. Elementos de un circuito. Conexión de elementos. Asociación de elementos.  
Leyes de Kirchhoff  
Divisores de tensión y corriente  
Principio de superposición  
Circuitos equivalentes. Teoremas de Thevenin y de Norton  
Introducción a la corriente alterna. Régimen sinusoidal permanente

**Carga eléctrica:** propiedad de la materia que reside en alguna de sus partículas elementales, responsable de muchos fenómenos físicos (culombios, C)

Las cargas eléctricas pueden ser positivas y negativas

Las cargas eléctricas son múltiplos de la carga del electrón  $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

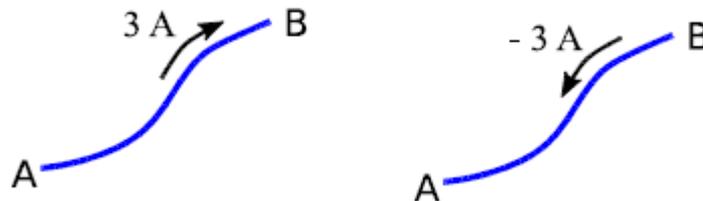
**Corriente eléctrica:** movimiento de las cargas eléctricas a lo largo de un conductor.

$$I = \Delta Q / \Delta t \text{ (amperios, A)}$$

Se considera que es el movimiento de cargas positivas, aunque la conducción en los metales se deba al movimiento de los electrones (cargas negativas).

Se utiliza una flecha al lado o sobre el conductor para indicar el sentido de la corriente.

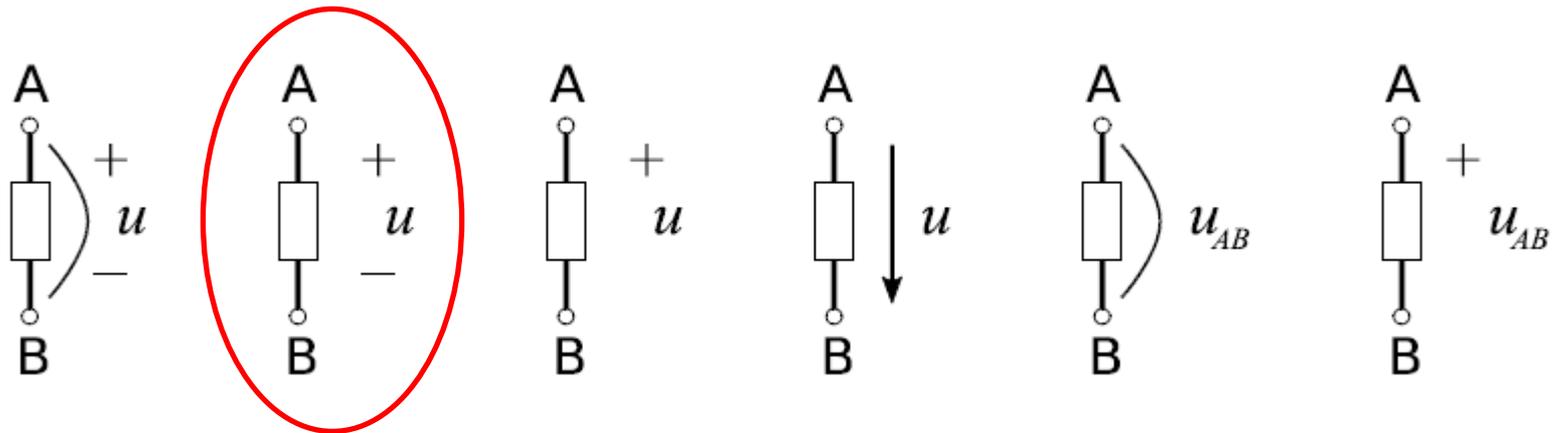
En los dos ejemplos siguientes, la corriente circula desde A hacia B. Ya que en el segundo caso, el signo negativo del valor de la corriente hace invertir el sentido de la flecha



**Diferencia de potencial o tensión entre dos puntos:** es el trabajo que hay que realizar para mover una carga unidad entre estos dos puntos.

Se mide en voltios  $V$

Las siguientes representaciones de la tensión entre A y B son equivalentes:



**El voltaje/diferencia de potencial siempre está referido entre dos puntos.**

**Potencia eléctrica** es el trabajo por unidad de tiempo ( $W/t$ ).

Una carga  $dq$  que se mueve desde el punto A hasta el punto B desarrolla un trabajo:

$$dW = dq \cdot u_{AB}$$

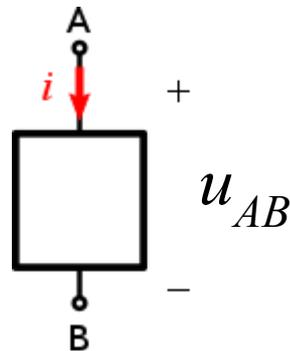
Por tanto, la potencia será:

$$p = i \cdot u_{AB}$$

Se mide en vatios  $W$  (J/s)

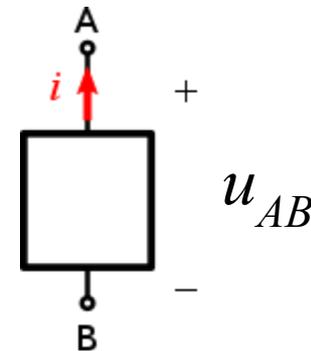
Hay que tener en cuenta los sentidos de la corriente y la tensión para saber si se consume o genera potencia.

Para:  
 $i > 0$   
 $u_{AB} > 0$



Consumo  
 potencia

Para:  
 $i > 0$   
 $u_{AB} > 0$



Genera  
 potencia

“El Sistema legal de Unidades de Medida obligatorio en España es el sistema métrico decimal de siete unidades básicas, denominado Sistema Internacional de Unidades (SI), adoptado en la Conferencia General de Pesas y Medidas y vigente en la Comunidad Económica Europea”

REAL DECRETO 1317/1989

- El SI tiene **siete unidades básicas de medida** (no se derivan de otras).
- Los símbolos de las unidades se **expresan con minúsculas** (**m**, **kg**), excepto si dichos símbolos corresponden a unidades derivadas de nombres propios, caso en el que **su letra inicial es mayúscula** (**A**, **Hz**).
- Los símbolos **no cambian cuando se trata de varias unidades**, es decir, no debe añadirse una “s” (**kgs**). Tampoco debe situarse un punto a continuación de un símbolo (**kg.**), salvo al final de una frase.

| UNIDAD                            | NOMBRE    | SÍMBOLO |
|-----------------------------------|-----------|---------|
| Longitud                          | metro     | m       |
| Masa                              | kilogramo | kg      |
| Tiempo                            | segundo   | s       |
| Intensidad de corriente eléctrica | amperio   | A       |
| Temperatura                       | kelvin    | K       |
| Intensidad luminosa               | candela   | cd      |
| Cantidad de sustancia             | mol       | mol     |

- Además de las unidades básicas, en el SI existen **unidades derivadas**, que se pueden expresar en función de las básicas.
- Los múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades del SI **se forman con prefijos que anteceden sin espacio al símbolo de la unidad** (kV,  $\mu$ A, ns). Algunos de ellos son:

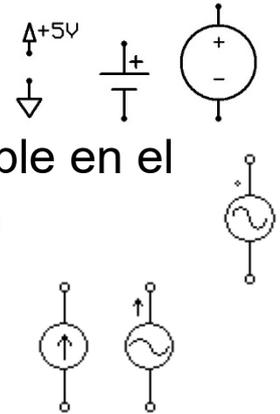
| UNIDAD   | NOMBRE | SIMBOLO | UNIDADES BÁSICAS                                   |
|----------|--------|---------|--|
| Energía  | julio  | J       | [N·m]<br>kg·m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>         |
| Voltaje  | voltio | V       | [J/C]<br>kg·m <sup>2</sup> /(A·s <sup>3</sup> )    |
| Potencia | vatio  | W       | [J/s] ó [V·A]<br>kg·m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> |

| MÚLTIPLO         | NOMBRE | SIMBOLO |
|------------------|--------|---------|
| 10 <sup>15</sup> | peta   | P       |
| 10 <sup>12</sup> | tera   | T       |
| 10 <sup>9</sup>  | giga   | G       |
| 10 <sup>6</sup>  | mega   | M       |
| 10 <sup>3</sup>  | kilo   | k       |

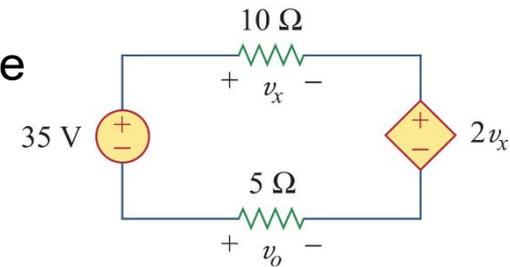
| SUBMÚLTIPLO       | NOMBRE | SIMBOLO |
|-------------------|--------|---------|
| 10 <sup>-1</sup>  | deci   | d       |
| 10 <sup>-2</sup>  | centi  | c       |
| 10 <sup>-3</sup>  | mili   | m       |
| 10 <sup>-6</sup>  | micro  | $\mu$   |
| 10 <sup>-9</sup>  | nano   | n       |
| 10 <sup>-12</sup> | pico   | p       |
| 10 <sup>-15</sup> | femto  | f       |

## Elementos activos, generan energía neta (fuentes o generadores):

- **Fuente de tensión continua, DC (pila, batería):** genera una diferencia de potencial constante entre sus terminales
- **Fuente de tensión alterna, AC:** ídem, pero con una d.d.p. variable en el tiempo (onda sinusoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra...)
- **Fuente de corriente (AC o DC):** genera una corriente eléctrica en el sentido indicado por la flecha

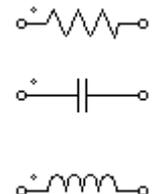


Existen fuentes **independientes y dependientes**. El valor de la tensión (o corriente) en estas últimas depende de la tensión o corriente en otra parte del circuito



## Elementos pasivos, consumen o almacenan energía (cargas del circuito):

- **Resistencia:** consume energía y la disipa en forma de calor
- **Condensador:** almacena energía en forma de campo eléctrico
- **Bobina:** almacena energía en forma de campo magnético



## Resistencia

- Símbolo circuital:



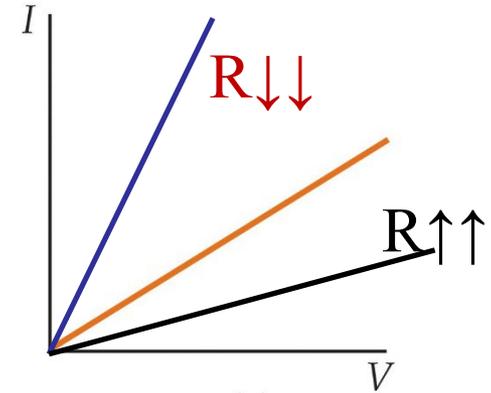
- Da idea de la **oposición del material al paso de la corriente** a través de él

- Se mide en **ohmios** ( $\Omega$ )

- $v(t) = R \cdot i(t)$  Para valores constantes  $V$

- **Potencia** en una resistencia:  $P = I \cdot R$

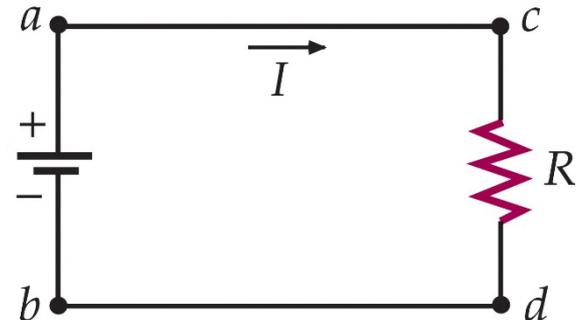
- ✓ El circuito eléctrico más sencillo es el que consta de una fuente de tensión, una resistencia eléctrica y dos cables conductores "ideales" (con resistencia eléctrica nula):



¿Cuánto vale la pendiente "m"?

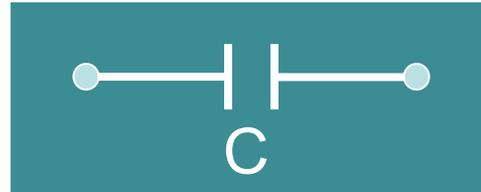
$$I = V/R \rightarrow m = 1/R$$

Ley de ohm



## Condensador (capacidad)

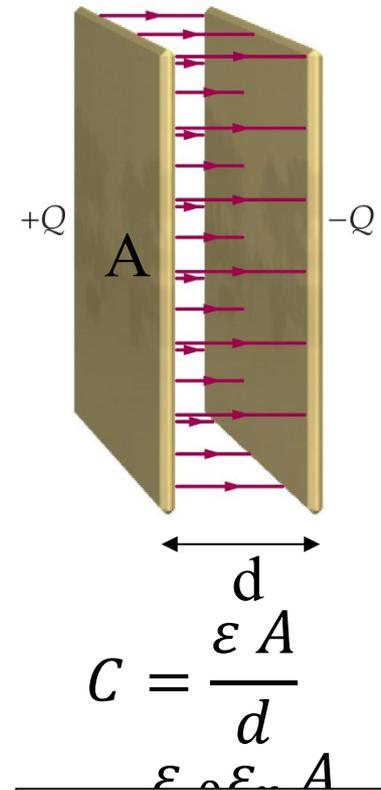
- Símbolo circuital:



- La **capacidad C** de un condensador da idea de cuánta carga eléctrica puede almacenar. Depende del material ( $\epsilon_r$ ) y de las dimensiones geométricas ( $d, A$ )  
 La capacidad se mide en **faradios (F)**. Un faradio es la capacidad de un condensador que almacena 1 C de carga al aplicarle una tensión de 1 V
- Se **consideran elementos lineales**, como las resistencias, aunque su relación corriente-tensión es:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$

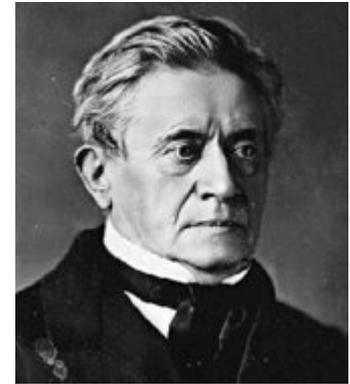
- Si  $v$  es constante,  $i = 0$  (circuito abierto en DC)



*¿Cómo se puede modificar C sin cambiar las dimensiones del condensador?*

## Bobina

- Símbolo circuital:



- **L** (autoinductancia o coeficiente de autoinducción) da idea de la relación entre el flujo magnético provocado por el paso de corriente y dicha corriente:

$$\varphi_m(t) = L \cdot i(t) \rightarrow L$$

- La inductancia se mide en **henrios (H)**, en honor a Joseph Henry (1797-1878).  
 $1 \text{ H es igual a } 1 \text{ Wb/A} = (\text{T} \cdot \text{m}^2)/\text{A}$  en el SI.
- Se **consideran elementos lineales**, como las resistencias, aunque su relación corriente-tensión, que proviene de la Ley de Faraday, es:

$$v(t) = - \frac{d\varphi_m(t)}{dt}$$

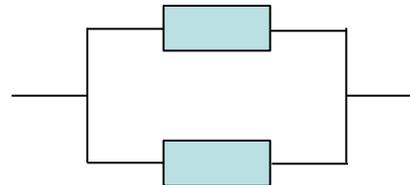
- Si  $i$  es constante,  $v = 0$  (cortocircuito en DC)  
 $= -L \frac{di(t)}{dt}$

## Formas de conexión entre los elementos de un circuito

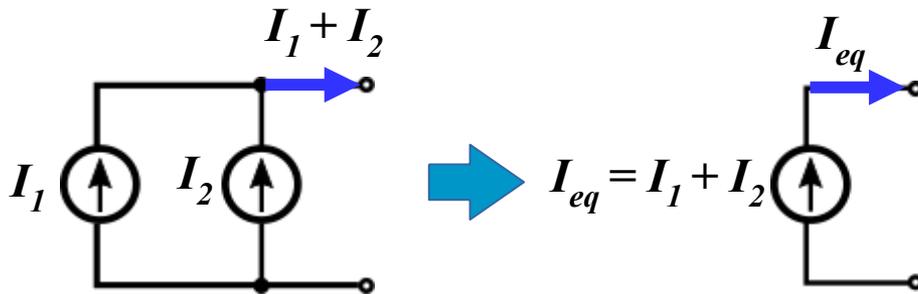
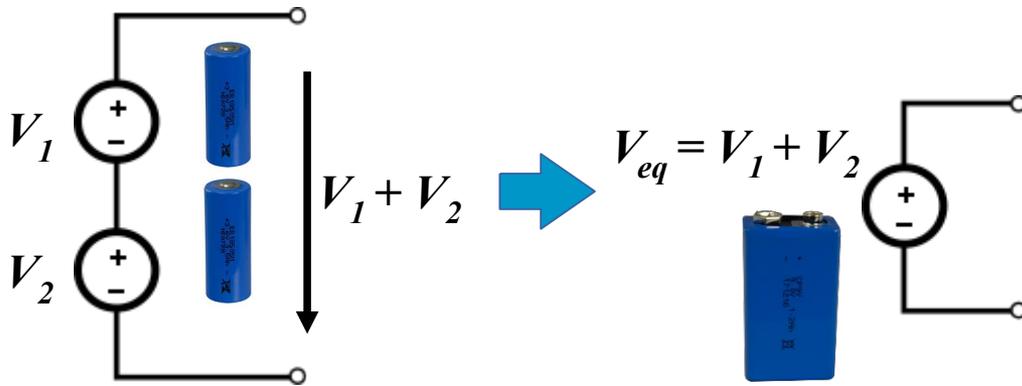
- 1. Serie.** La conexión entre dos o más elementos es en serie cuando son **recorridos por la misma intensidad** de corriente. Cada elemento tiene un extremo común con el siguiente.



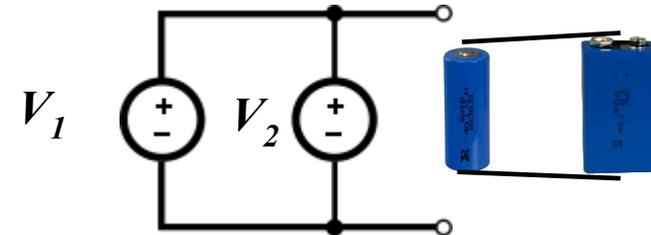
- 2. Paralelo.** La conexión entre dos o más elementos es en paralelo cuando **todos están sometidos a la misma diferencia de potencial**. Cada elemento queda unido a los demás por los dos extremos.



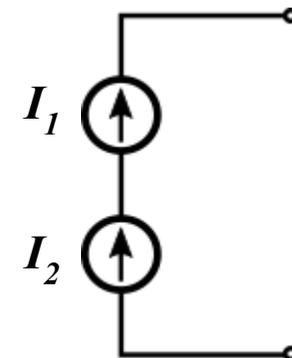
## Asociación de fuentes ideales en serie y en paralelo



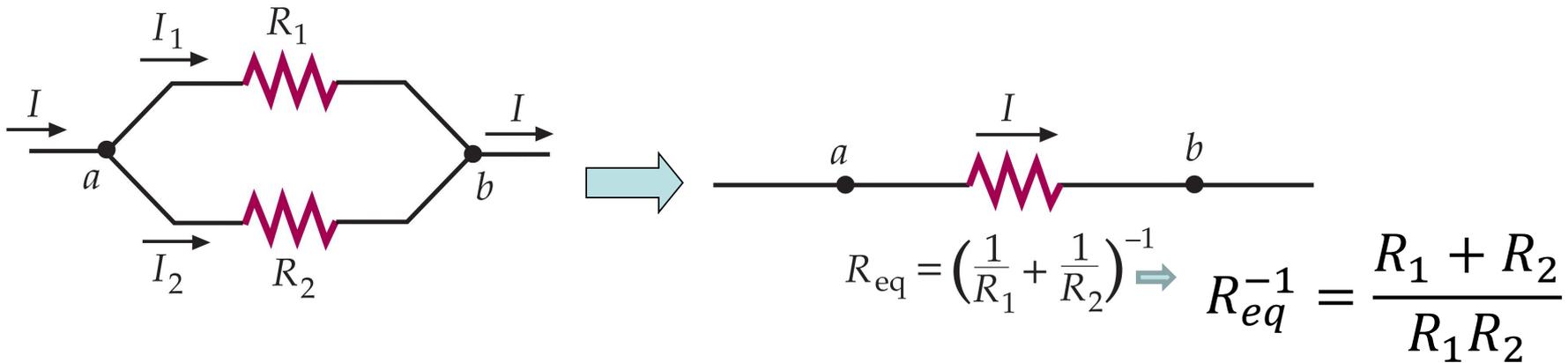
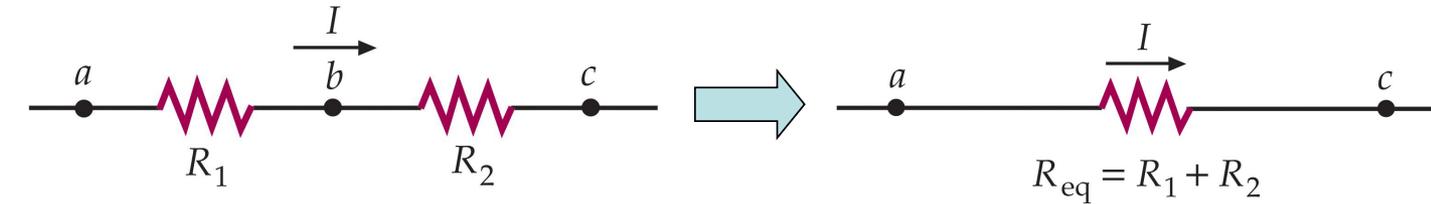

**Fuentes de tensión no se pueden conectar en paralelo si  $V_1 \neq V_2$**



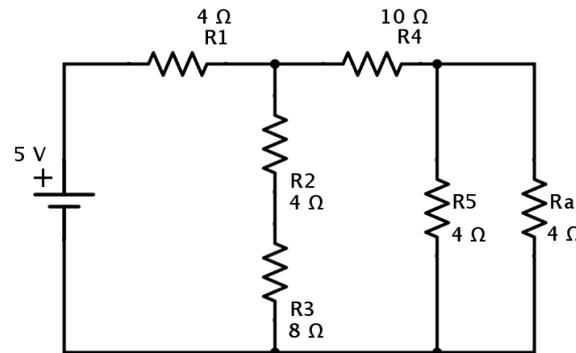

**Fuentes de corriente no se pueden conectar en serie si  $I_1 \neq I_2$**



# Asociación de resistencias en serie y en paralelo



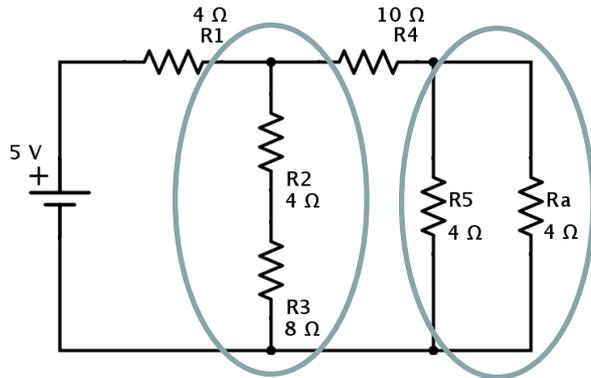
**Ejemplo:** Calcula la corriente  $I$  y la potencia  $P$  que proporciona la fuente de tensión del circuito de la figura:



$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left[ \frac{\Omega \Omega}{\Omega} \right]$$

# Asociación de resistencias en serie y en paralelo

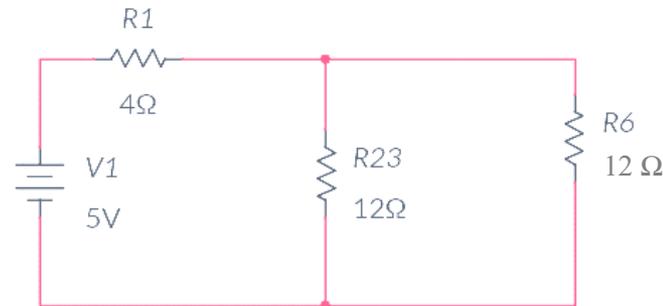
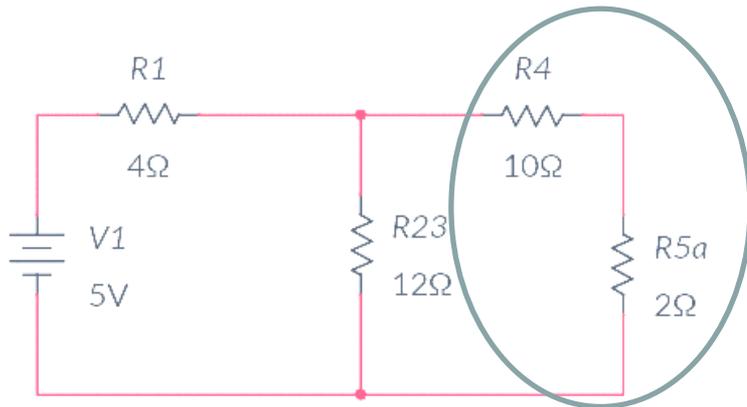
**Ejemplo:** Calcula la corriente  $I$  y la potencia  $P$  que proporciona la fuente de tensión del circuito de la figura:



$$R_a \parallel R_b = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}$$

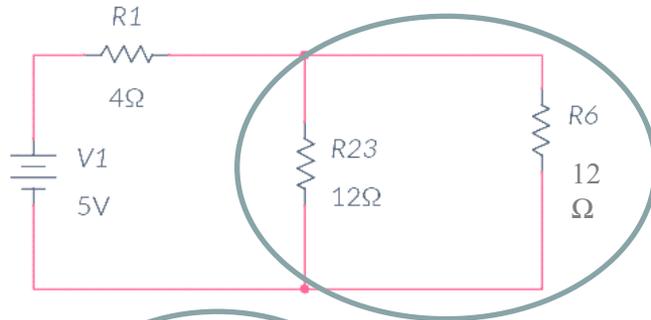
$$R_5 \parallel R_a = R_{5a} = \frac{4 \times 4}{4 + 4} = 2 \Omega = R_2 + R_3 = 12$$

$$R_6 = R_4 + R_{5a} = 12 \Omega$$

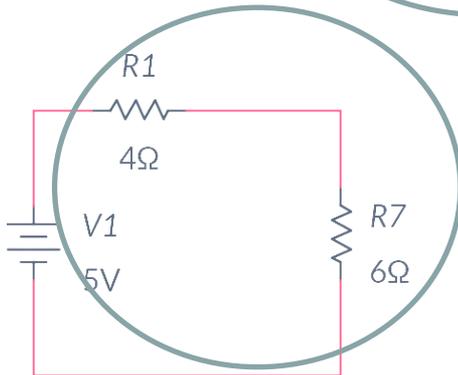


# Asociación de resistencias en serie y en paralelo

**Ejemplo:** Calcula la corriente  $I$  y la potencia  $P$  que proporciona la fuente de tensión del circuito de la figura:



$$R_7 = R_{23} \parallel R_6 = \frac{12 \times 12}{12 + 12} = 6\Omega$$



$$R_{Tot} = 10\Omega$$

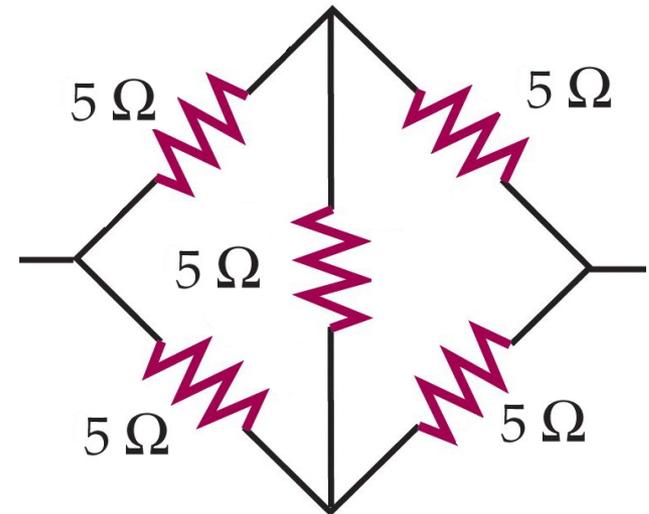
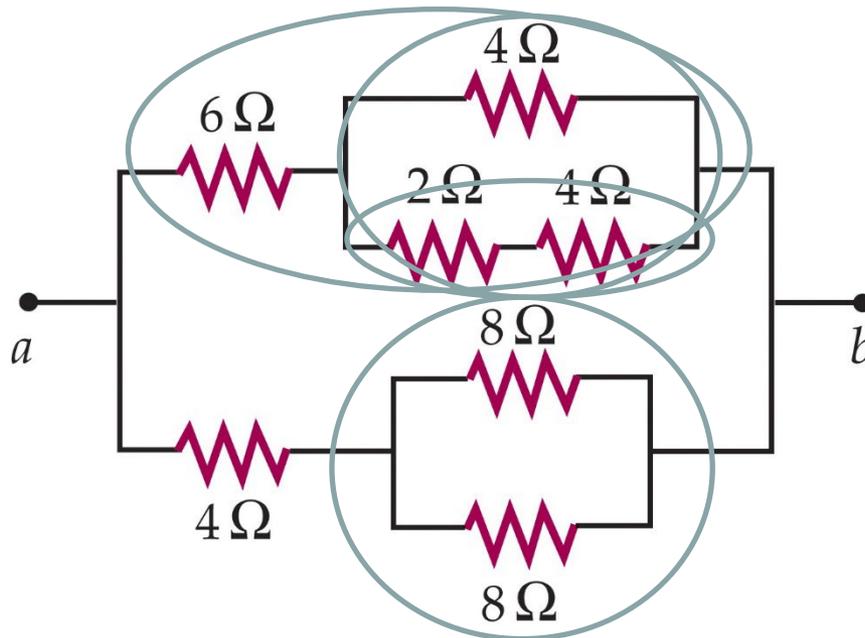


$$I = V/R = 5/10 = 0.5\text{ A}$$

$$P = I \times V = 5 \times 0.5 = \frac{V^2}{R} = \frac{5^2}{10} = I^2 \times R = 0.5^2 \times 10 = 2.5\text{ W}$$

# Asociación de resistencias en serie y en paralelo

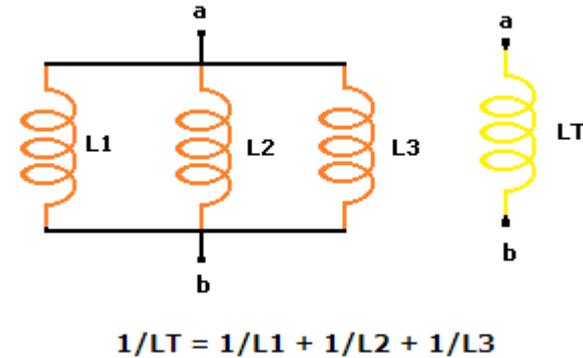
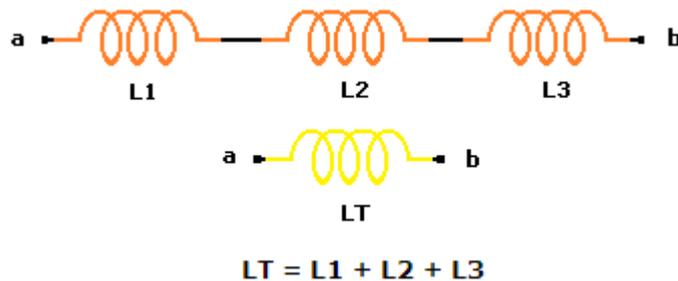
**Más ejemplos:** Calcula la resistencia equivalente, vista desde los terminales indicados, de las siguientes asociaciones de resistencias:



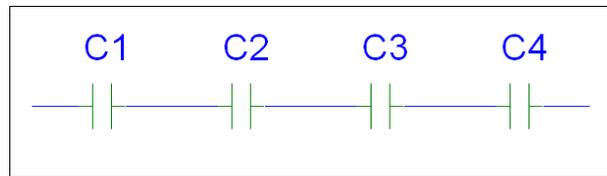
*¿Qué ocurre en este caso?*

# Asociación de otros elementos en serie y en paralelo

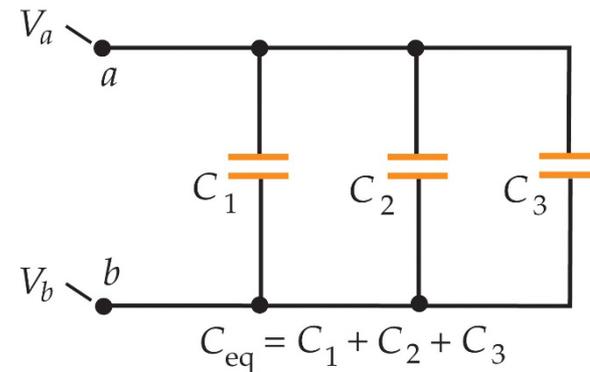
**Bobinas.** Se asocian con las mismas reglas que las resistencias:



**Condensadores.** Se asocian con las reglas “opuestas” a resistencias y bobinas:

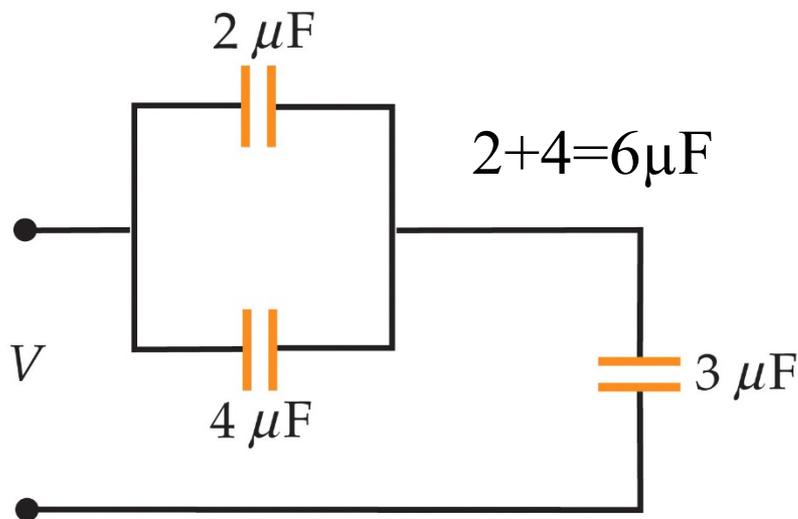


$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \Rightarrow C_{eq} = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \right)^{-1}$$

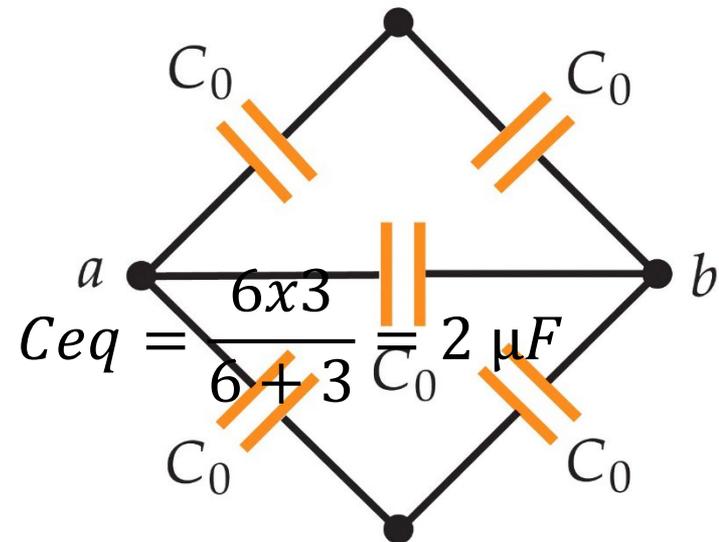


## Asociación de otros elementos en serie y en paralelo

**Ejemplos:** Calcula la capacidad equivalente, vista desde los terminales indicados, de las siguientes asociaciones de condensadores:



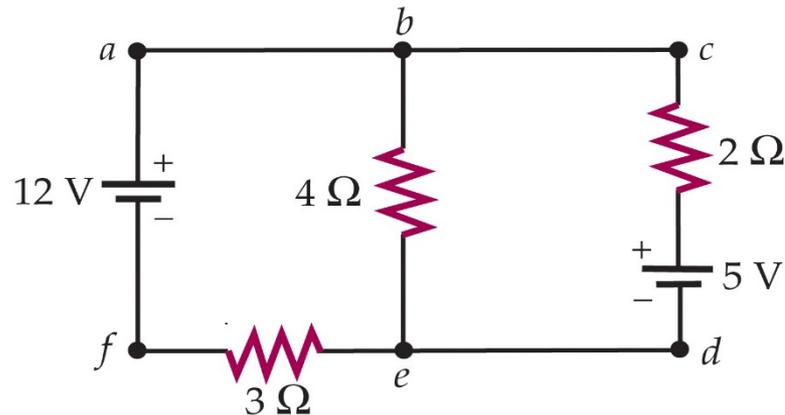
*Asociación 1*



*Asociación 2 (entre a y b)*

$$C_{eq} = 2C_0$$

- ✓ Analizar (o resolver) un circuito eléctrico consiste en **calcular las corrientes y las tensiones en el circuito**, conocidos los elementos que componen el circuito y su disposición en el mismo.
- ➔ ¿Se puede resolver este circuito utilizando únicamente las reglas de asociación de resistencias vistas hasta ahora?

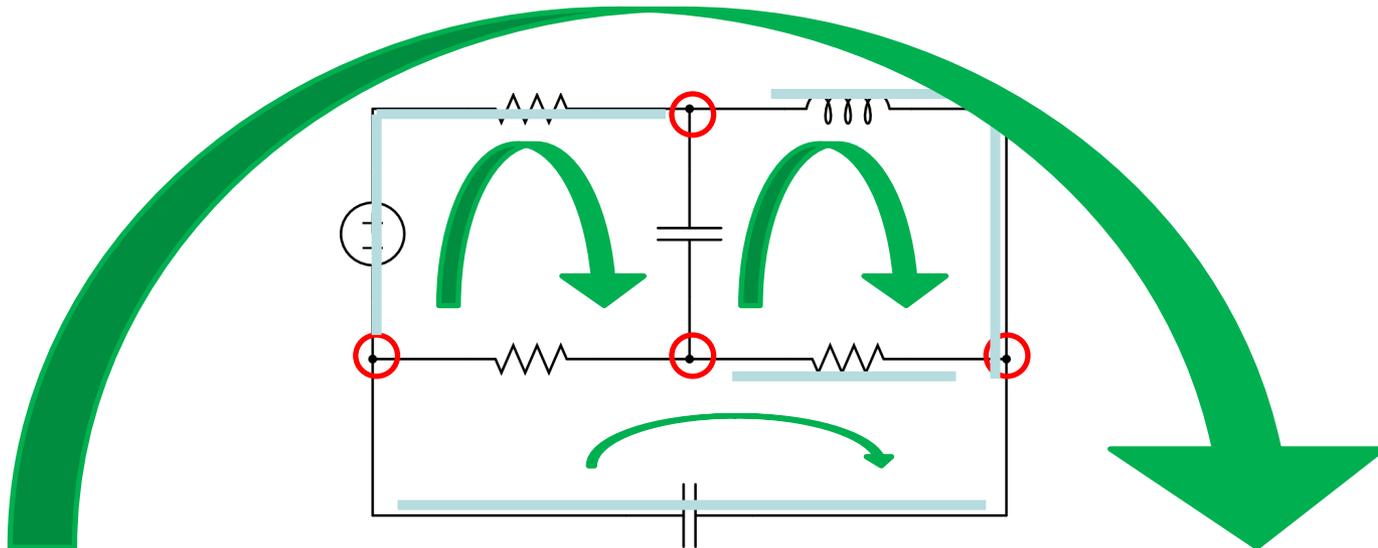


Necesitamos herramientas adicionales: las llamadas **leyes de Kirchhoff**

*Conceptos previos:*

- 👉 **Nudo (o “nodo”)**: punto de conexión de tres o más hilos conductores.
- 👉 **Rama**: tramo de hilo conductor entre dos nudos.
- 👉 **Malla**: cualquier camino cerrado que pueda ser definido en el circuito

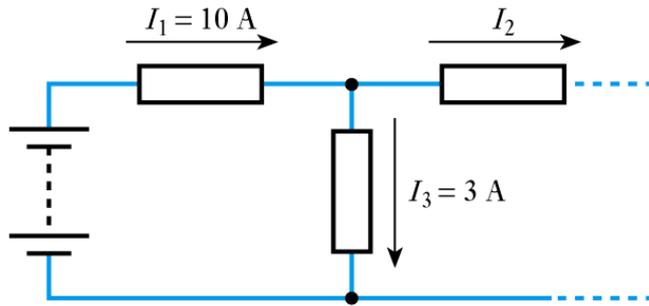
**Ejemplos:** indica cuántos nudos, ramas y mallas hay en el siguiente circuito:



- Las leyes de Kirchhoff son en realidad dos **REGLAS**, enunciadas por el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que permiten la **obtención sistemática de las ecuaciones necesarias para la resolución de los circuitos eléctricos**.
- Las reglas de Kirchhoff **son aplicables a cualquier tipo de circuito eléctrico**, ya sea de corriente continua o de corriente alterna, y con independencia de los elementos que contenga (R, L, C, fuentes, diodos, transistores...)
- Los circuitos no se resuelven únicamente con las leyes o reglas de Kirchhoff. **Es necesario además conocer la relación entre la corriente que circula por un elemento del circuito y su tensión**. Dicha relación  $I = I(V)$  se llama “**curva característica**”:
  - ✓ **Resistencias, condensadores, bobinas:** ya estudiadas.
  - ✓ **Diodos, transistores:** Bloque I (electrónica analógica)



**1ª Ley de Kirchhoff (ley de los nudos).** La suma algebraica de las intensidades que concurren en un nudo es igual a cero. Se consideran positivas las entrantes y negativas las salientes.

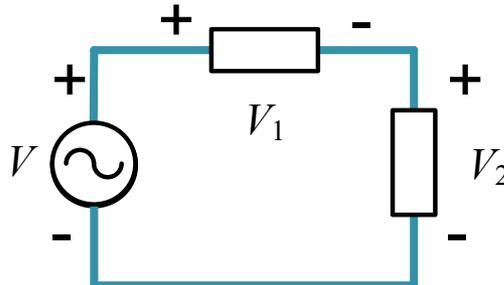


$$\sum_i I_i = 0$$

$$I_1 - I_2 - I_3$$

$$\cancel{I_1} \neq I_2 + I_3$$

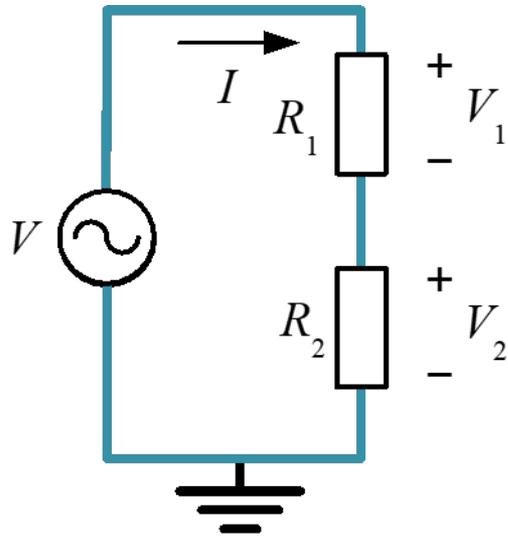
**2ª Ley de Kirchhoff (ley de las mallas).** La suma algebraica de las diferencias de potencial de todos los elementos de una malla es igual a cero.



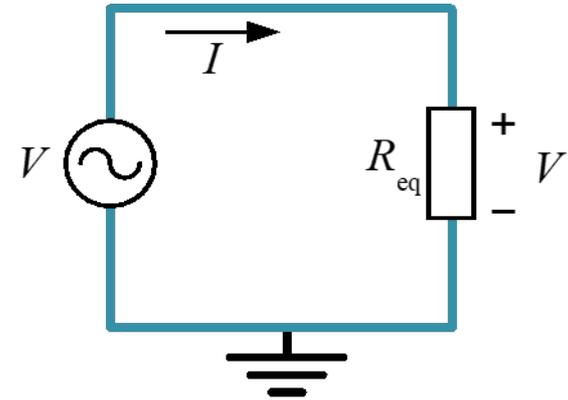
$$\sum_i V_i = 0$$

$$V - V_1 - V_2$$

$$\cancel{V} \neq V_1 + V_2$$



circuito equivalente

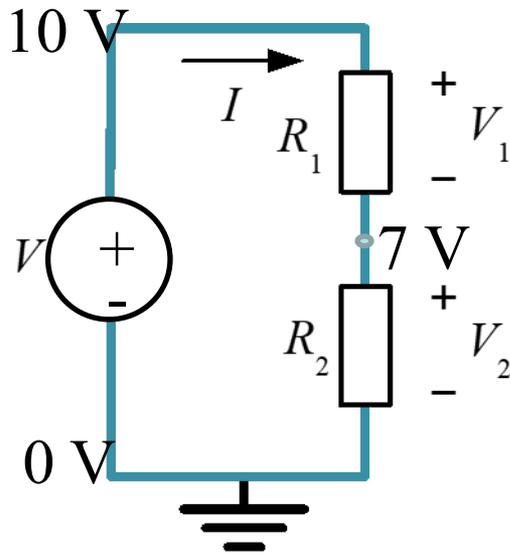


$$\begin{aligned}
 V &= I \cdot R_{eq} \\
 &= I(R_1 + R_2) \\
 I &= \frac{V}{R_1 + R_2}
 \end{aligned}$$

$V_1 = I \cdot R_1$        $V_2 = I \cdot R_2$   
 Sustituyendo en el circuito equivalente:

$$V_1 = V \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

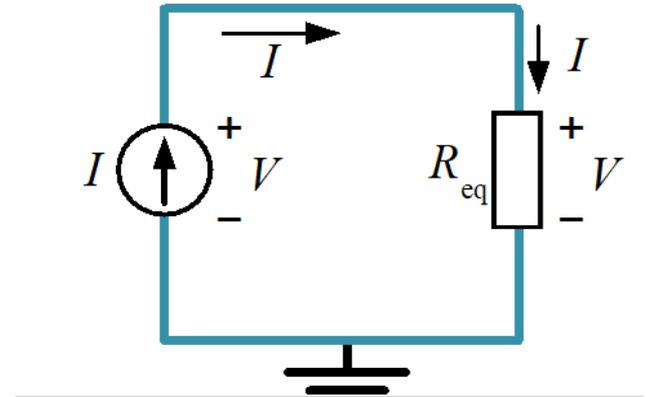
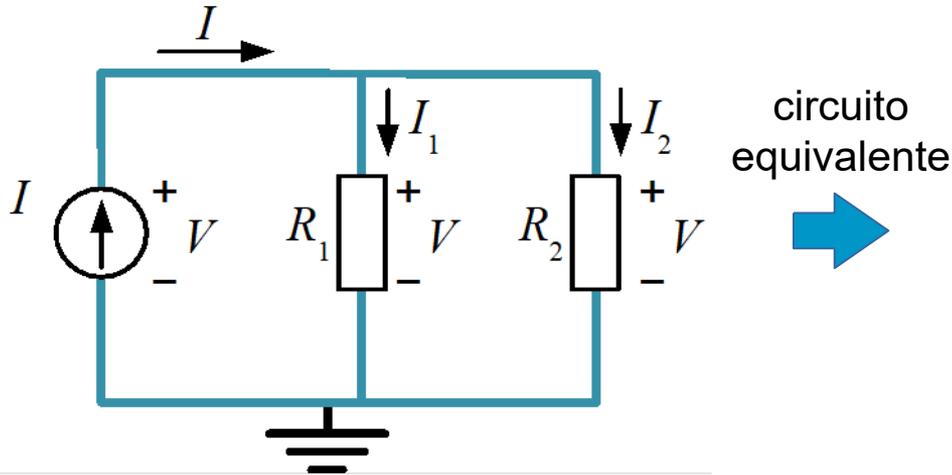
$$V_2 = V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



$$V_1 = V \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{3}{10} = 3 \text{ V}$$

$$V_2 = V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \times \frac{7}{10} = 7 \text{ V}$$

Si  $V=10 \text{ V}$ ,  $R_1=3 \Omega$  y  $R_2=7 \Omega$



(no hacer mallas con fuente de corriente)

$$V = I_1 \cdot R_1 \quad V = I_2 \cdot R_2$$

Sustituyendo  $V$  del circuito equivalente:

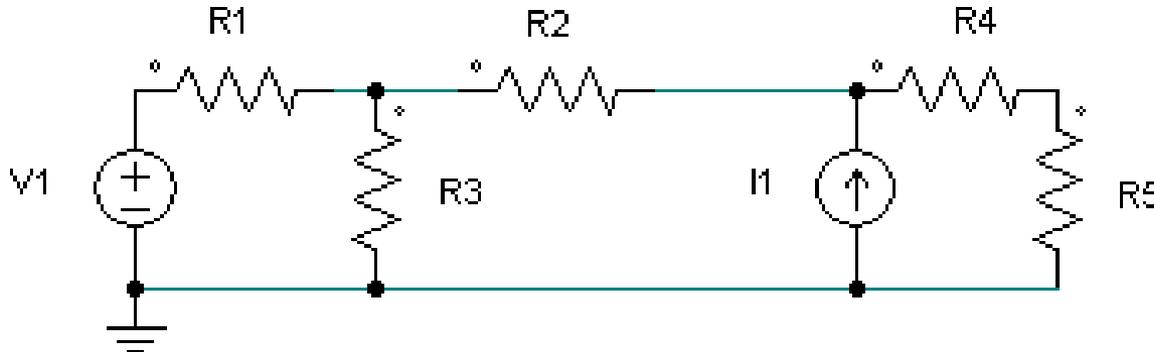
$$I \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_1 \cdot R_1 \quad I \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I_2 \cdot R_2$$

$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = I \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V = I \cdot R_{eq} = I \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

La respuesta de un **circuito lineal** a varias fuentes de excitación **independientes** será igual a la suma de las respuestas de cada una de las fuentes independientes aplicadas individualmente

**Ejemplo:** Circuito con dos fuentes: una de tensión ( $V_1$ ) y otra de corriente ( $I_1$ ). Se puede resolver utilizando dos circuitos más sencillos. En el primero se anula la fuente de corriente, en el segundo se anula la fuente de tensión. Para terminar se suman los resultados.



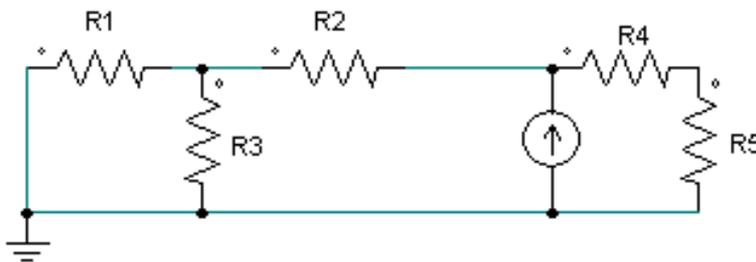
Si el circuito tuviese **fuentes dependientes**, estas no se deben anular, se dejan tal cual en todos los circuitos más sencillos

## Anulación o puesta a cero de fuentes de V e I

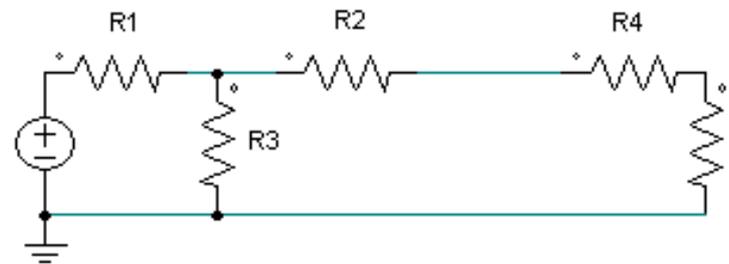
- Anular o poner a cero una **fente de tensión** equivale a **cortocircuitar sus bornes (  $V = 0\text{ V}$  )**
- Anular o poner a cero una **fente de corriente** equivale a **dejar en circuito abierto sus bornes (  $I = 0$  en dicha rama )**

**Ejemplo anterior:** Si anulamos la fuente de tensión nos queda el circuito de la izquierda. Si anulamos la fuente de corriente nos queda el de la derecha

Con  $V_1=0$

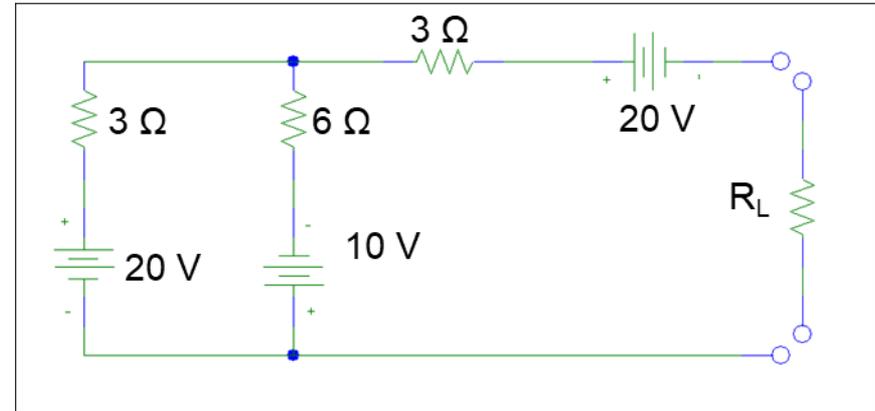


Con  $I_1=0$



# Teoremas de reducción de circuitos. Circuitos equivalentes

Supongamos que es necesario **calcular la corriente  $I$**  que circula por la resistencia  $R_L$  del siguiente circuito para 10 valores diferentes de la misma:



Para resolver el problema sería necesario:

1. Construir los 10 circuitos diferentes que se obtienen de conectar las 10 resistencias  $R_L$  diferentes.
2. Resolver los 10 circuitos utilizando las reglas de Kirchhoff.



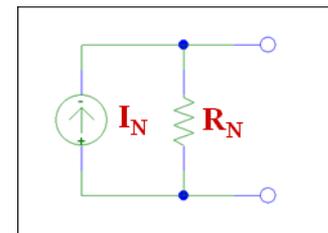
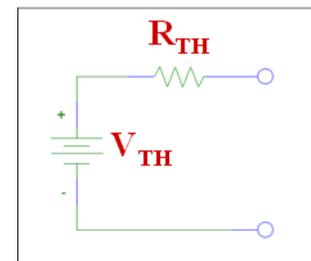
Existe otra solución mucho más sencilla para este problema:

1. Buscar un **circuito equivalente** al que se tiene, pero **MÁS SENCILLO**, que permita simplificar los cálculos.
2. **Conectar las 10  $R_L$  al circuito equivalente sencillo y resolver el sistema.**

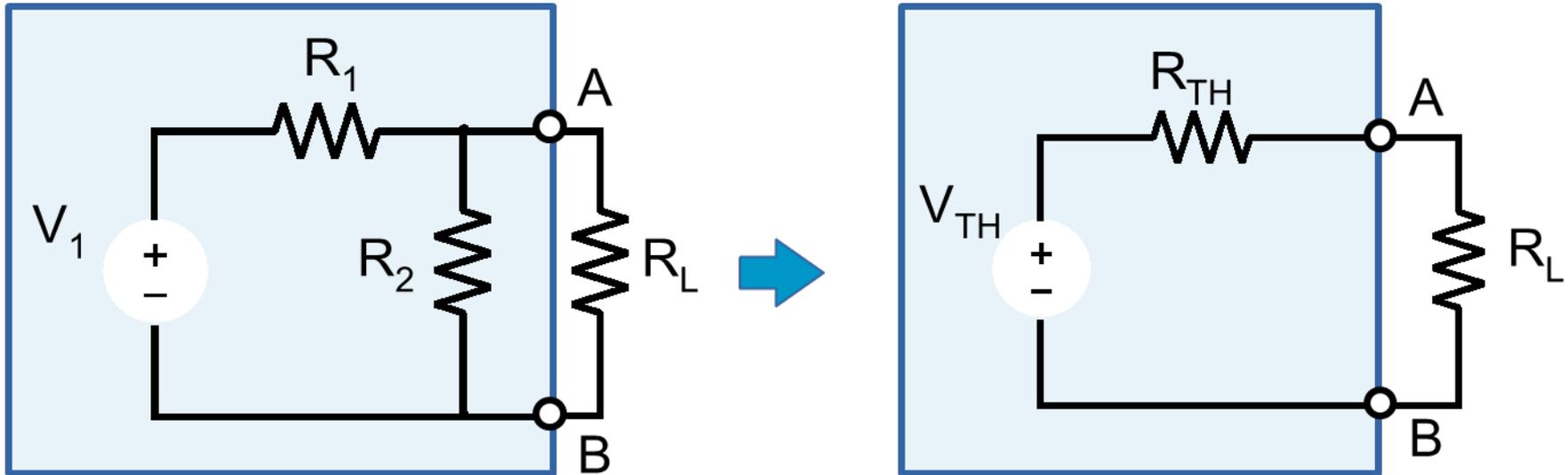
# Teoremas de reducción de circuitos. Circuitos equivalentes

- ✓ Un circuito equivalente de uno dado es otro ficticio que, visto desde sus terminales, **SE COMPORTA igual que el dado**.
- ✓ Un circuito equivalente **NO** es igual que el original, tan sólo su **comportamiento** (hacia el exterior) resulta equivalente al del original.
- ✓ Las ventajas se obtienen si el circuito equivalente es **MUCHO MÁS SENCILLO** que el circuito original, dado que así se simplifica su análisis (ejemplo anterior).

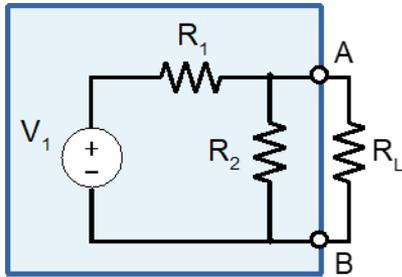
- Uno de los circuitos equivalentes más extendidos es el **circuito equivalente de Thevenin**. Sólo necesita una fuente de tensión y una resistencia
- Otro es el circuito **equivalente de Norton**. Está formado por una fuente de corriente y una resistencia



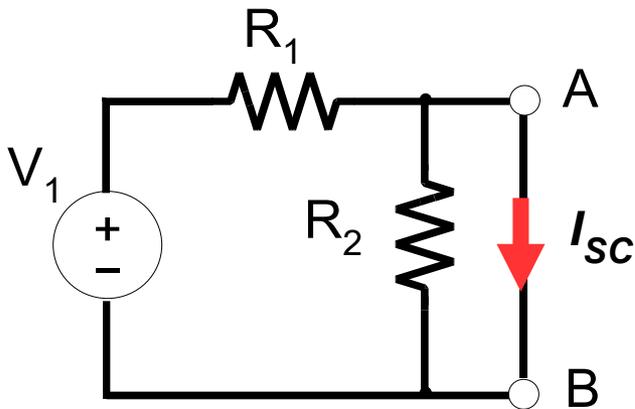
Calcular el equivalente Thevenin visto desde AB



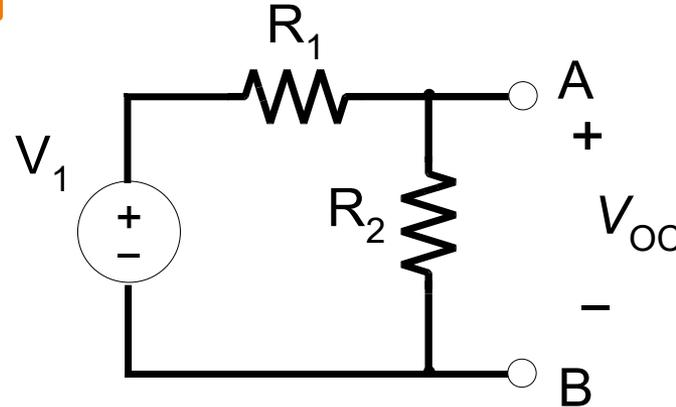
Calcular el equivalente Thevenin visto desde AB



2 Corriente de cortocircuito entre A y B:  $I_{sc}$



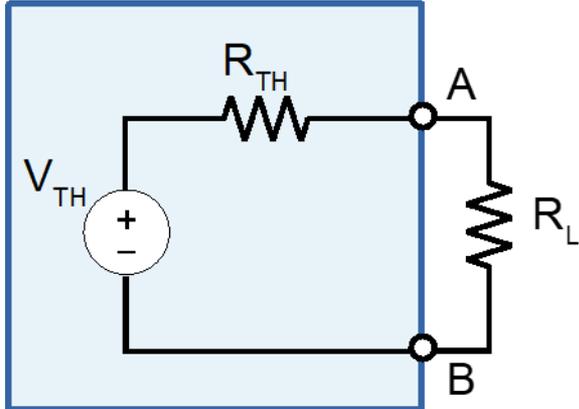
1 Tensión de circuito abierto entre A y B:  $V_{oc}$



3 Obtener los valores de la tensión y resistencia del equivalente Thevenin

$$V_{TH} = V_{OC}$$

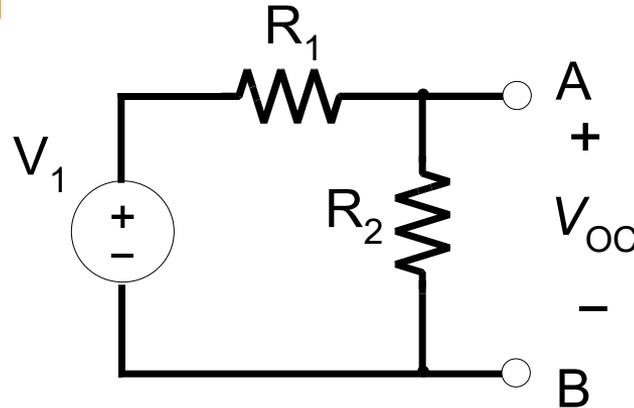
$$R_{TH} = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$



Si no hay fuentes dependientes el proceso se puede simplificar

1

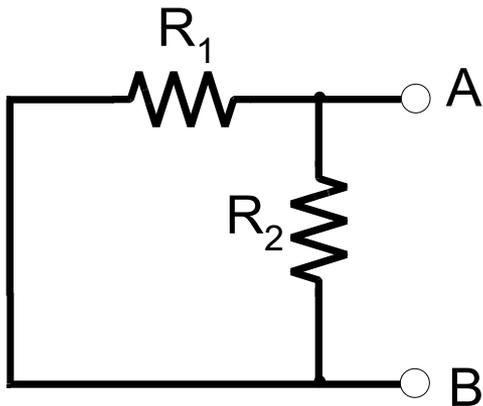
Tensión de circuito abierto entre A y B:  $V_{OC}$



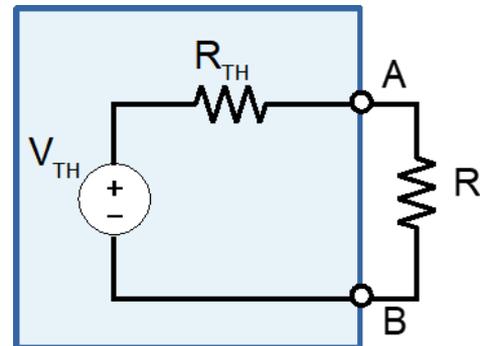
$$V_{TH} = V_{OC}$$

2

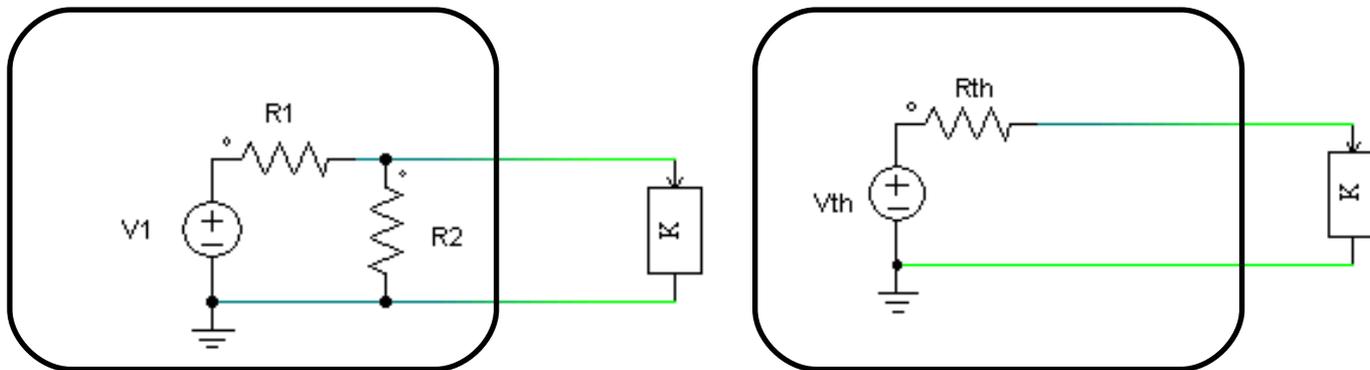
La resistencia Thevenin es la resistencia vista desde los terminales A y B anulando todas las fuentes (deberán ser independientes)



$$R_{TH}$$



## Ejemplo



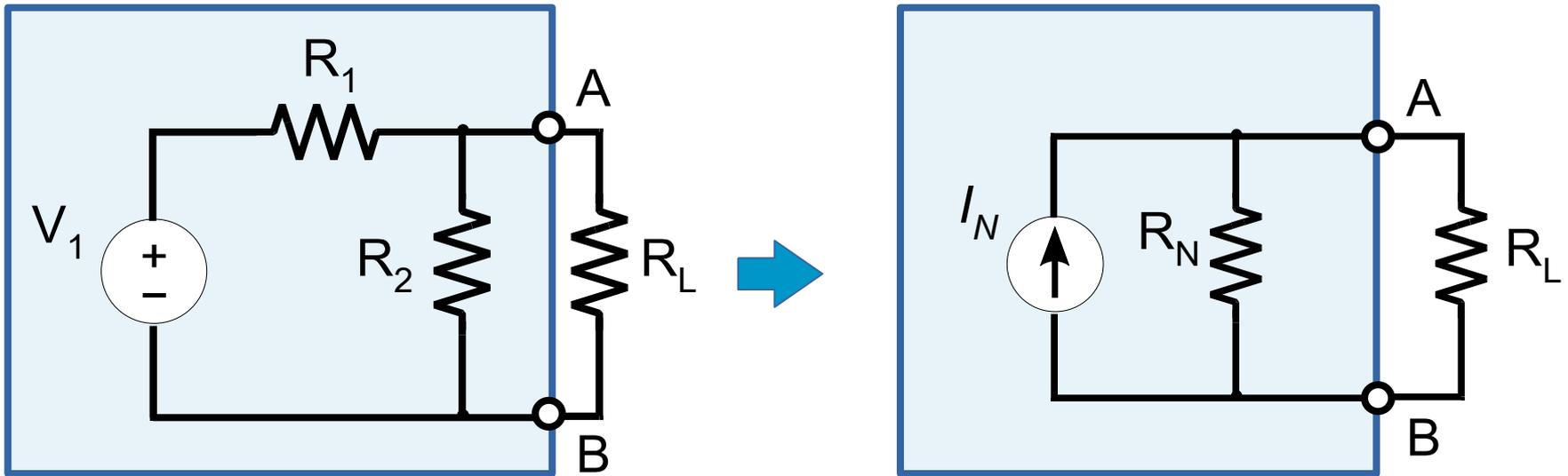
**Ejercicio:** Hallar cuánto tiene que valer  $R_{th}$  y  $V_{th}$  para que estos circuitos sean equivalentes

Solución:

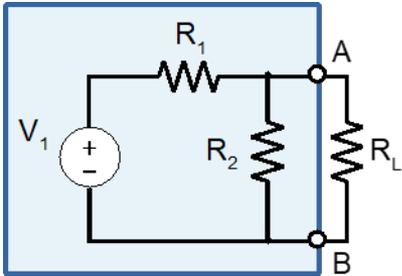
$$V_{th} = V_1 \frac{R_2}{R_2 + R_1}$$

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

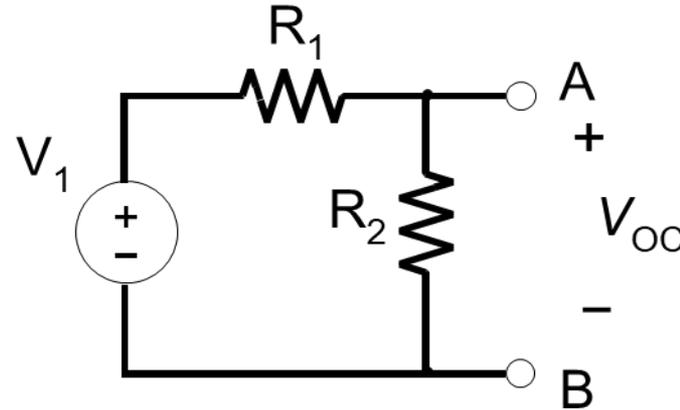
Calcular el equivalente Norton visto desde AB



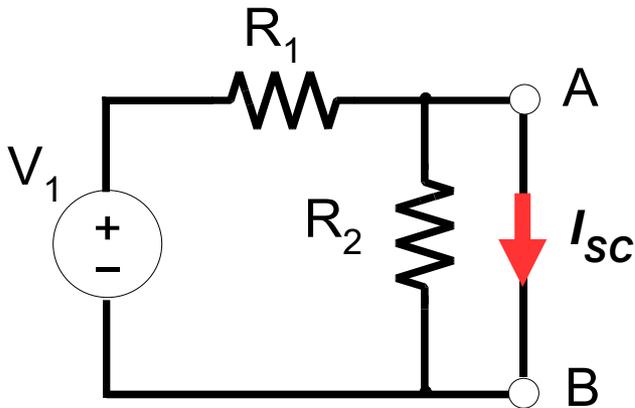
Calcular el equivalente Norton visto desde AB



1 Tensión de circuito abierto entre A y B:  $V_{OC}$



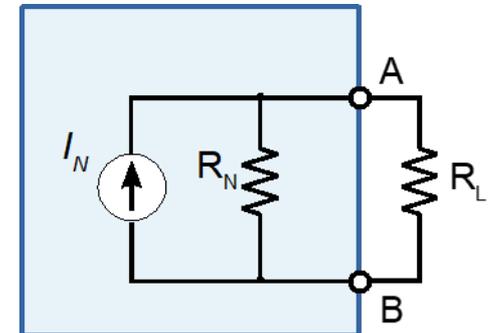
2 Corriente de cortocircuito entre A y B:  $I_{SC}$



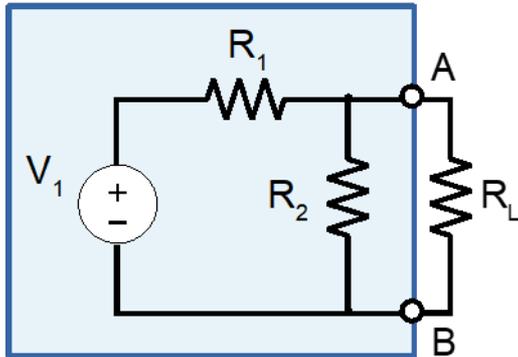
3 Obtener los valores de la intensidad y resistencia del equivalente Norton

$$I_N = I_{SC}$$

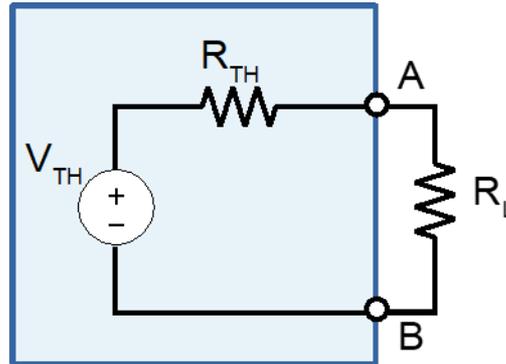
$$R_N = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$



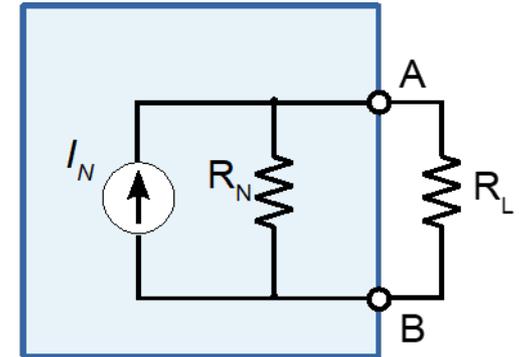
Circuito original



Equivalente Thevenin



Equivalente Norton



$$V_{TH} = V_{OC}$$

$$I_N = I_{SC}$$

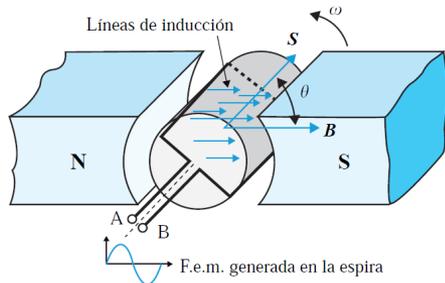
$$R_{TH} = R_N = \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$

Si **no hay fuentes dependientes** la resistencia Thevenin/Norton será la resistencia equivalente vista entre A y B después de anular todas las fuentes del circuito

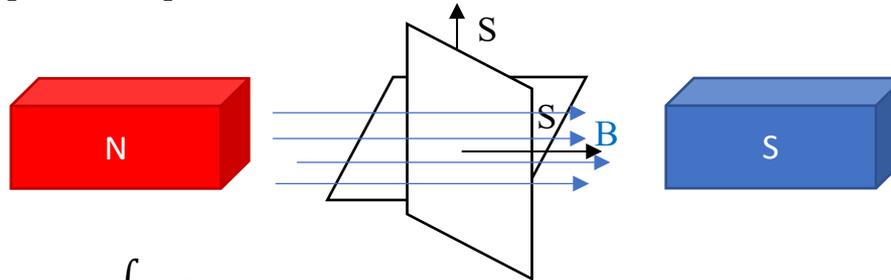
- *Circuitos Eléctricos. J. Fraile Mora. Pearson*
- *Microelectrónica: circuitos y dispositivos. M. N. Horenstein, Prentice Hall*
- *Circuitos Electrónicos, análisis simulación y diseño. N. Malik, Prentice Hall*

## Introducción

### Corriente Alterna (c.a.)



Espira de superficie  $S$  ( $\text{m}^2$ ) girando sobre su eje a una velocidad angular constante  $\omega$  (rad/seg) dentro de un campo magnético uniforme de valor  $B$  (T) producido por un imán.

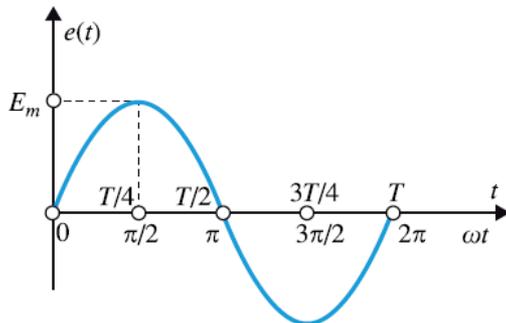


$$\Phi = \int B ds = B * S = BS \cos \omega t$$

Aplicando la Ley de Faraday-Lenz:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(BS \cos \omega t) = BS\omega \sin \omega t$$

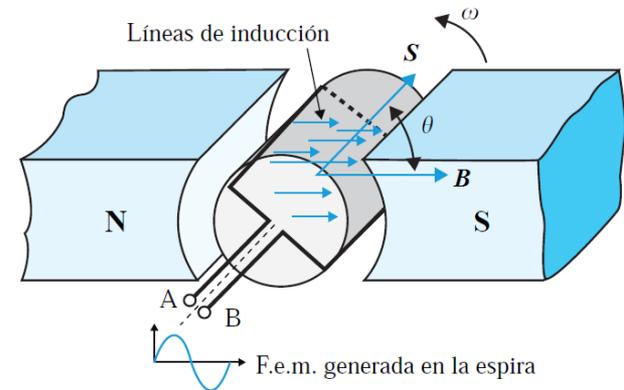
$$\boxed{e = E_m \sin \omega t} \quad E_m = BS\omega \quad \text{f.e.m. instantánea (dependiente del tiempo) generada en la bobina y cuya evolución con el tiempo es de forma sinusoidal}$$



## Introducción

### Corriente Alterna (c.a.)

- Los sistemas de generación de energía eléctrica más extendidos se basan en espiras en movimiento en un campo magnético, y generan una tensión alterna sinusoidal (AC).
- Permite su transformación a tensiones muy elevadas (kV) con mínimas pérdidas en el proceso.
- Dichas tensiones tan elevadas reducen enormemente las pérdidas de transporte y distribución de la energía por la red eléctrica.



# Un poco de historia: la “guerra de las corrientes”

## THE CURRENT WAR

THE TALE OF AN EARLY TECH RIVALRY

### DC

#### DIRECT CURRENT

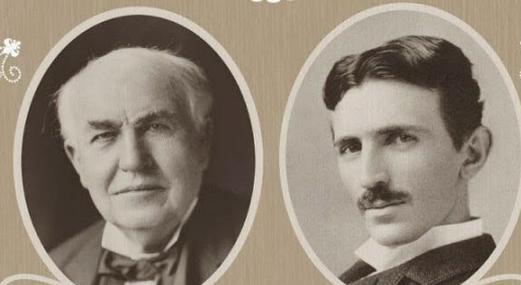
The flow of electricity is in one direction only. The system operates at the same voltage level throughout and is not as efficient for high-voltage long distance transmission.

Direct current runs through:

- Battery-Powered Devices
- Fuel and Solar Cells
- Light Emitting Diodes

**"[TESLA'S] IDEAS ARE SPLENDID, BUT THEY ARE UTTERLY IMPRACTICAL."**

- THOMAS EDISON



**THOMAS EDISON** VS. **NIKOLA TESLA**

You would have never found two geniuses so spiteful of each other beyond turn-of-the-century inventors Nikola Tesla and Thomas Edison. They worked together—and hated each other. Let's compare their life, achievements, and embittered battles.

### AC

#### ALTERNATING CURRENT

Electric charge periodically reverses direction and is transmitted to customers by a transformer that could handle much higher voltages.

Alternating current runs through:

- Car Motors
- Radio Signals
- Appliances

**"IF EDISON HAD A NEEDLE TO FIND IN A HAYSTACK, HE WOULD PROCEED AT ONCE... UNTIL HE FOUND THE OBJECT OF HIS SEARCH. I WAS A SORRY WITNESS OF SUCH DOINGS, KNOWING THAT A LITTLE THEORY AND CALCULATION WOULD HAVE SAVED HIM 90 PERCENT OF HIS LABOR."**

- NIKOLA TESLA

1847 BORN 1858

Milan, Ohio BIRTHPLACE Smiljan, Croatia  
 Wizard of Menlo Park NICKNAME Wizard of the West  
 Home-schooled and self-taught EDUCATION Studied math, physics, and mechanics at The Polytechnic Institute at Graz  
 Trial and error METHOD Getting inspired and seeing the invention in his mind in detail before fully constructing it

"Genius is one percent inspiration and ninety nine percent perspiration."  
 Thomas Edison  
 "Mass communication and business FORTE Electromagnetism and electromechanical engineering"

DC (Direct Current) WAR OF CURRENTS: ELECTRICAL TRANSMISSION IDEA AC (Alternating Current)  
 Incandescent light bulb; phonograph; cement making technology; motion picture camera; DC motors and electric power NOTABLE INVENTIONS Tesla coil - resonant transformer circuit; radio transmitter; fluorescent light; AC motors and electric power generation system

1,093 NUMBER OF US PATENTS 112  
 0 NUMBER OF NOBEL PRIZES WON 0  
 1 NUMBER OF ELEPHANTS ELECTROCUTED 0

1931—Passed away peacefully in his New Jersey home, surrounded by friends and family DEATH 1943—Died lonely and in debt in Room 3527 at the New Yorker Hotel

### FALLING OUT

Edison promised Tesla a generous reward if he could smooth out his direct current system. The young engineer took on the assignment and ended up saving Edison more than \$100,000 (millions of dollars by today's standards). When Tesla asked for his rightful compensation, Edison declined to pay him. Tesla resigned shortly after, and the older inventor spent the rest of his life campaigning to discredit his counterpart.

### LATE BLOOMER

Thomas Edison, the youngest in his family, didn't learn to talk until he was almost 4 years old.

### WAR OF CURRENTS OFFICIALLY SETTLED

In 2007, Edison ended 125 years of direct current electricity service that began when Thomas Edison opened his power station in 1882. It changed to only provide alternating current.

### EDISON FRIES AN ELEPHANT

In order to prove the dangers of Tesla's alternating current, Thomas Edison staged a highly publicized electrocution of the three-ton elephant known as "Topsy." She died instantly after being shocked with a 6,600-volt AC charge.

### NOBEL PRIZE CONTROVERSY

In 1915, both Edison and Tesla were to receive Nobel Prizes for their strides in physics, but ultimately, neither won. It is rumored to have been caused by their animosity towards each other and refusal to share the coveted award.

SOURCES: CHENEY, MARGARET, "TESLA: MAN OUT OF TIME"; UTH, ROBERT, "TESLA: MASTER OF LIGHTNING"; THOMASEDISON.COM | PBS.ORG | WEB.MIT.EDU | WIRED.COM

A COLLABORATION BETWEEN GOOD AND COLUMN FIVE

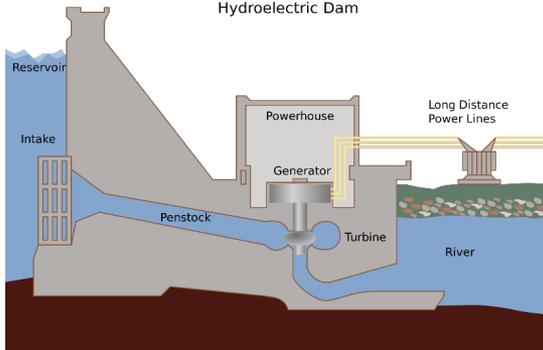
## Introducción

La mayoría de las centrales eléctricas funcionan generando AC a base de girar bobinas.

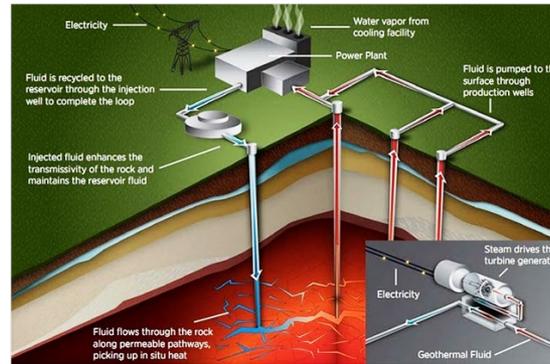
Hidroeléctrica



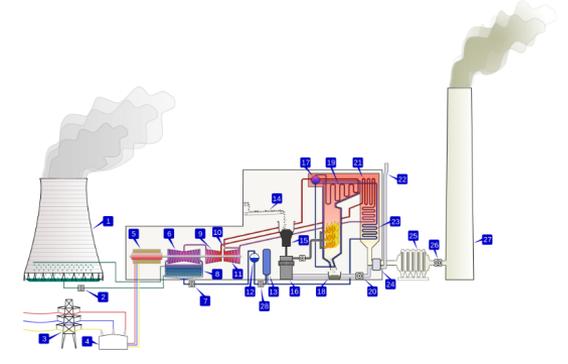
Hydroelectric Dam



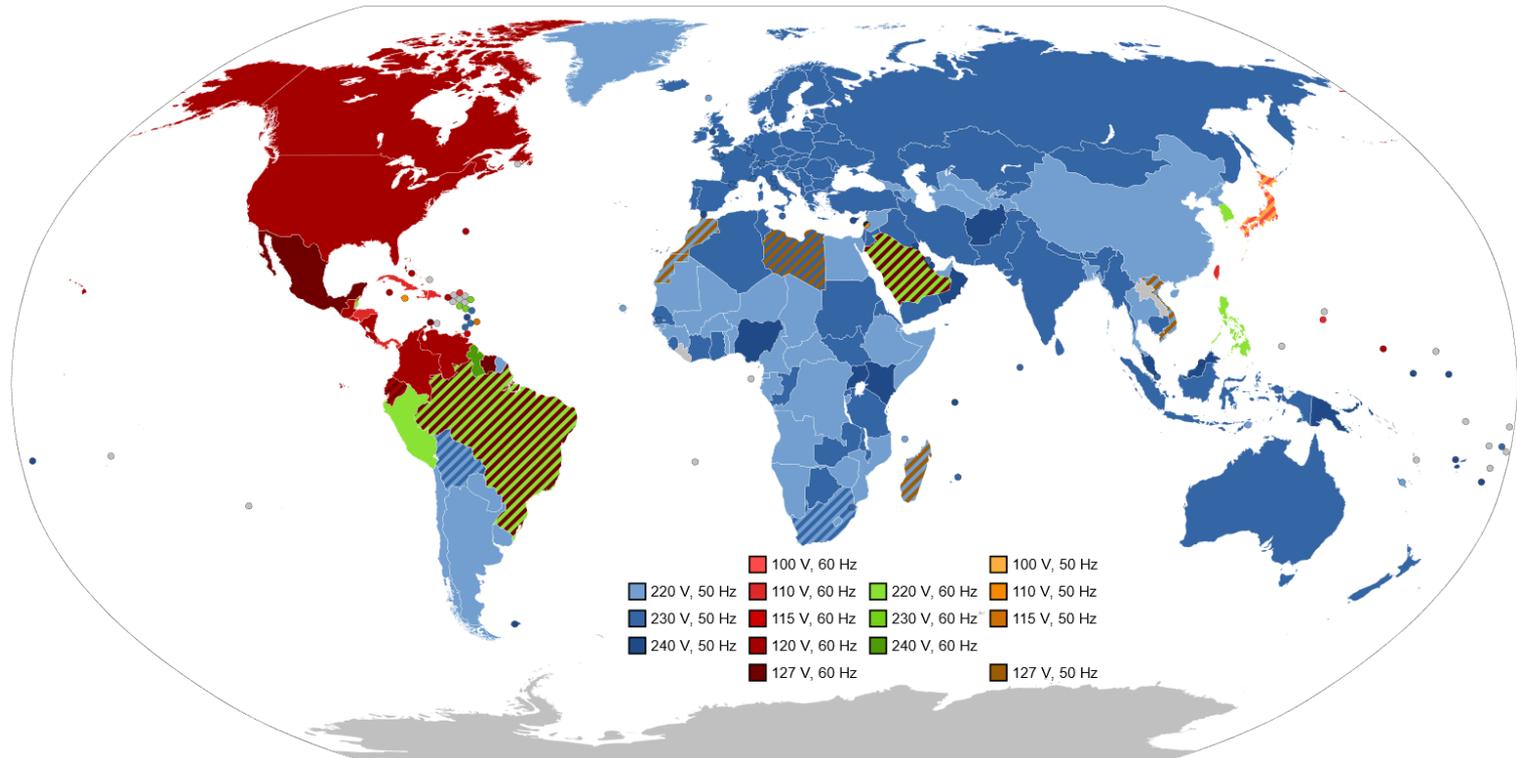
Geotérmica



Nuclear

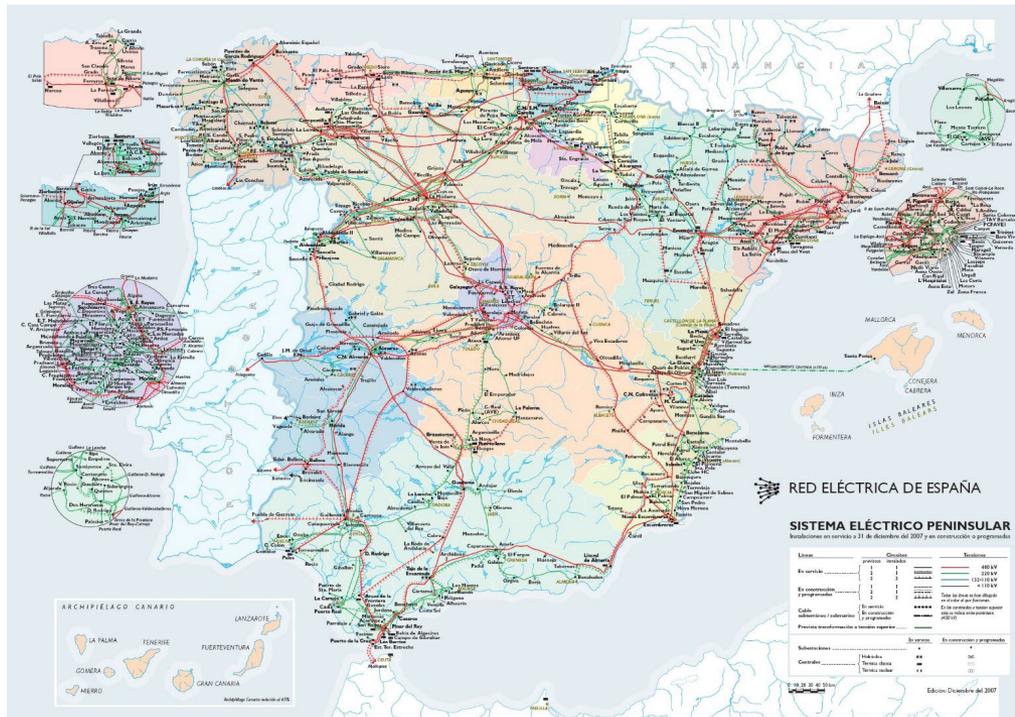


## Tensión eficaz y frecuencia lineal de la red eléctrica doméstica en el mundo



[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Enchufes,\\_voltajes\\_y\\_frecuencias\\_por\\_país](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Enchufes,_voltajes_y_frecuencias_por_país)

## Mapa de la red de transporte de energía eléctrica en España



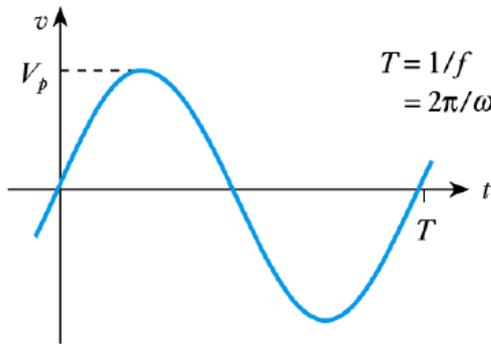
<http://www.ree.es/>

## Introducción

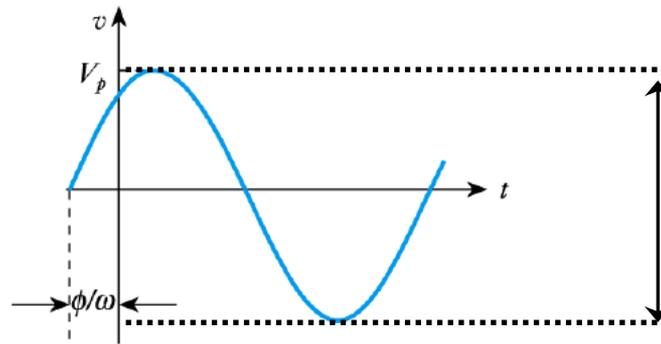
Una fuente de tensión alterna (AC) es una fuente cuya amplitud varía con el tiempo periódicamente. La más típica es la sinusoidal. Se caracteriza por una **amplitud o valor de pico**,  $V_p$  (voltios), una **fase  $\Phi$**  (rad) y una **frecuencia angular** (rad/s).  $T$  (segundos) es el periodo, inverso de la frecuencia lineal (Hz).

$$v = V_p \text{sen}(\omega t + \phi)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$



$$v = V_p \text{sen}(\omega t)$$



$$v = V_p \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Voltaje de *pico a pico*,  
 $V_{PP}$

## Introducción

### Valor medio y valor eficaz de una onda sinusoidal

- El **valor medio** (en un periodo T) de una onda sinusoidal es cero.
- El **valor eficaz** (también denominado **valor cuadrático medio** o **valor RMS**, *root mean square*) es una manera de cuantificar la magnitud de una cantidad variable. Se define como la **raíz cuadrada de la media aritmética del cuadrado de una magnitud**, es decir:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} \quad \Rightarrow \quad V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V_P \text{sen}(\phi)]^2 dt} = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \Rightarrow v(t) = V_{ef} * \sqrt{2} \text{sen}(\omega t + \phi)$$

Los valores eficaces se utilizan para **calcular la potencia eléctrica media** disipada en una resistencia R sometida a una tensión alterna.

El valor eficaz de una magnitud alterna representa **la tensión (o corriente) continua que disiparía la misma potencia eléctrica** al aplicarse a una R

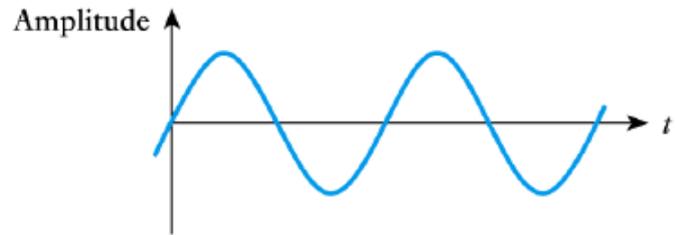
$$P_{m.c.c} = I_{CC} \cdot V_{CC}$$

$$P_{m.c.a} = I_{ef} \cdot V_{ef}$$

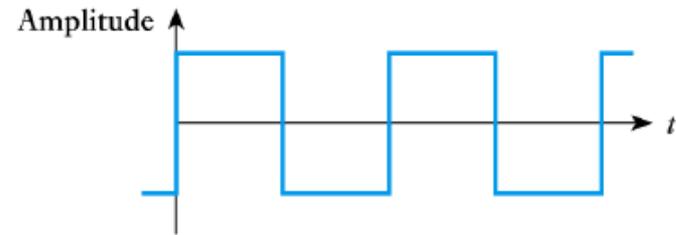
## Introducción

### Otras formas de onda

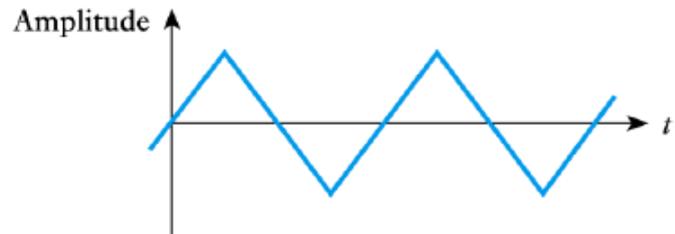
Además de la sinusoidal existen **otras formas de corriente alterna (AC)**. Todas ellas son funciones periódicas.



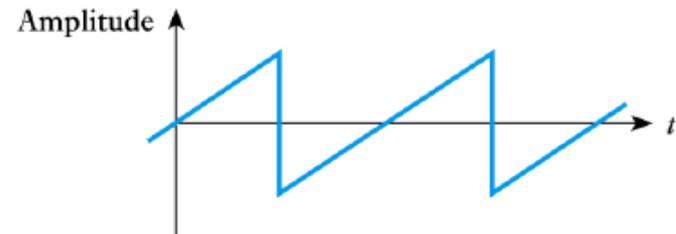
(a) A sinusoidal wave



(b) A square wave



(c) A triangular wave

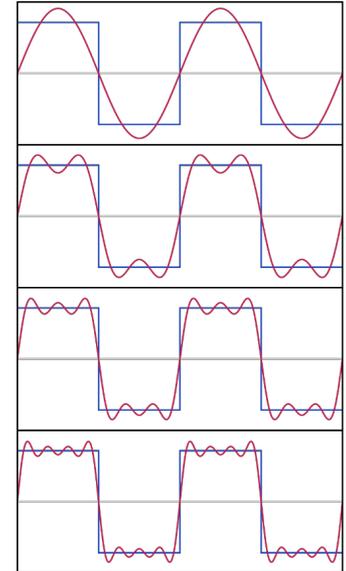


(d) A sawtooth wave

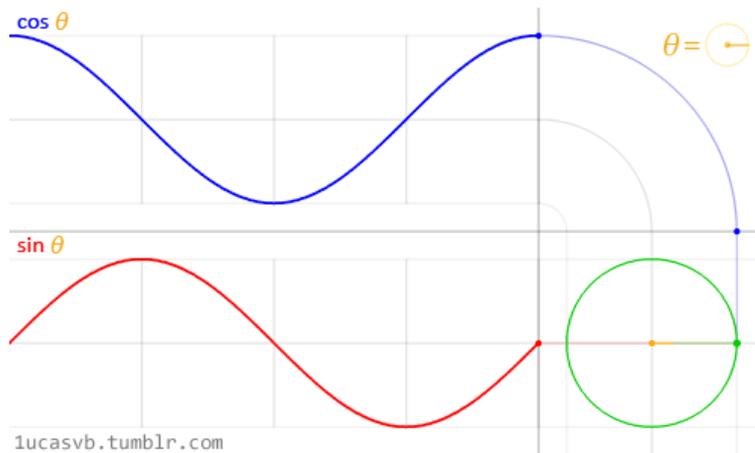
## Introducción

# Respuesta de un circuito a una entrada sinusoidal

- La respuesta de un circuito lineal (R, L, C) a una entrada (tensión) alterna sinusoidal es una **función sinusoidal de igual frecuencia**. La amplitud y la fase pueden variar.
- La suma de funciones senoidales de igual frecuencia es una **función sinusoidal de igual frecuencia**. La amplitud y la fase pueden variar.
- La derivada y la integral de una senoide es otra senoide.
- Mediante la descomposición en serie de Fourier **cualquier función periódica puede representarse como una combinación lineal de un número finito de funciones sinusoidales**.
- Los alternadores (si giran a velocidad constante) generan tensión con forma sinusoidales. Es una forma de onda **fácil de obtener**.
- La respuesta de un sistema ante funciones senoidales de distinta frecuencia nos da **información del sistema (Espectroscopía de Impedancias)**.



## Introducción



### Fórmula de Euler

$$e^{jx} = \cos x + j\sin(x) \Rightarrow \cos x = \operatorname{Re}[e^{jx}]$$

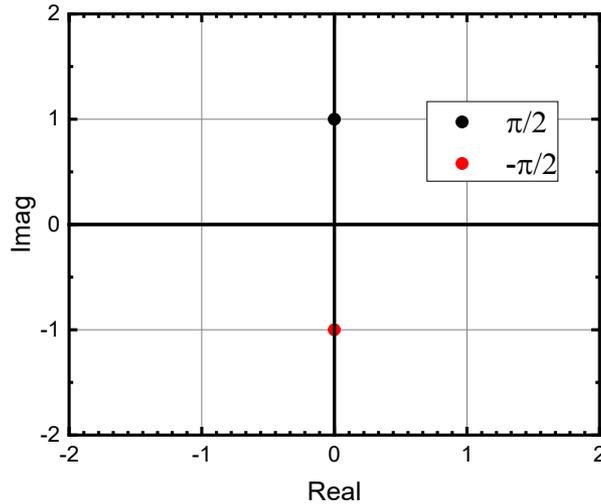
$$e^{j(\omega t + \varphi)} = \cos(\omega t + \varphi) + j\sin(\omega t + \varphi)$$

$$y = Y \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}[Y e^{j(\omega t + \varphi)}] = \operatorname{Re}[Y e^{j\varphi} e^{j\omega t}]$$

*Un fasor es un número complejo que representa la magnitud y la fase de una senoide.*

$$\underline{Y} = Y \angle \varphi$$

## Introducción



### Fórmula de Euler

$$e^{jx} = \cos x + j \operatorname{sen}(x) \Rightarrow \cos x = \operatorname{Re}[e^{jx}]$$

$$e^{j(\omega t + \varphi)} = \cos(\omega t + \varphi) + j \operatorname{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$y = Y \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}[Y e^{j(\omega t + \varphi)}] = \operatorname{Re}[Y e^{j\varphi} e^{j\omega t}]$$

*Un fasor es un número complejo que representa la magnitud y la fase de una senoide.*

$$\text{Fasor: } \underline{Y} = Y \angle \varphi$$

### Casos particulares fórmula de Euler

$$(90^\circ) \quad e^{j\pi/2} = \cancel{\cos(\pi/2)} + j \operatorname{sen}(\pi/2) = j$$

$$e^{-j\pi/2} = \cancel{\cos(-\pi/2)} + j \operatorname{sen}(-\pi/2) = -j \quad (-90^\circ)$$

## Introducción

### Operaciones número complejos

$$Ae^{jx} = A\cos x + jA\sin(x) \Rightarrow A\cos x = \operatorname{Re}[Ae^{jx}]$$

Forma binómica a forma fasorial

$$a + j * b = \sqrt{a^2 + b^2} \angle \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right)$$

Forma fasorial a forma binómica

$$A \angle \phi = A\cos\phi + jA\sin\phi$$

Producto de fasores

$$(A \angle \phi_1) * (B \angle \phi_2) = (A * B) \angle (\phi_1 + \phi_2)$$

Cociente de fasores

$$\frac{(A \angle \phi_1)}{(B \angle \phi_2)} = (A/B) \angle (\phi_1 - \phi_2)$$

Suma y resta complejos

$$(a + jb) + (c + jd) = [(a + c) + j(b + d)]$$

## Impedancia

### Elementos pasivos en régimen sinusoidal permanente. Concepto de impedancia

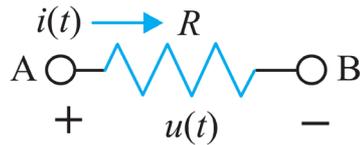
- En DC los condensadores e inductancias no son elementos lineales. **En régimen sinusoidal sí lo son**, debido a que tanto la derivada como la integral de una senoide es otra senoide.
- Se puede definir la **impedancia de un elemento** (resistencia, condensador o inductancia) como el **cociente entre el voltaje aplicado a un elemento y la corriente que pasa por él**:

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

- Podemos considerar a estos elementos (L y C) como “**resistencias de valor complejo**” y operar como lo hemos hecho hasta ahora con circuitos puramente resistivos.

## Impedancia

Respuesta transitoria de elementos pasivos (R) al régimen sinusoidal permanente



$$v(t) = R * i(t)$$

$$v(t) = V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$i(t) = I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$v(t) = V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = R I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

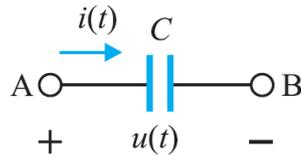
$$\varphi_V = \varphi_i$$

La corriente está **en fase** con la tensión

$$Z_R = \frac{V}{I} = R = \frac{V_P}{I_P}$$

## Impedancia

Respuesta transitoria de elementos pasivos (C) al régimen sinusoidal permanente



$$i(t) = C * \frac{dv(t)}{dt}$$

$$v(t) = V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$i(t) = I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} = j\omega C V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = \omega C V_P e^{\frac{j\pi}{2}} e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = \omega C V_P e^{j(\frac{\pi}{2} + \varphi_V)} e^{j\omega t}$$

$$\varphi_i = \varphi_V + \pi/2$$

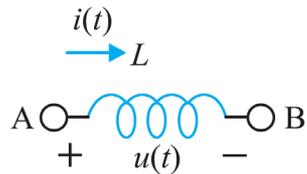
La corriente está adelantada 90° a la tensión

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}}{j\omega C V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}} = \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$

## Impedancia

Respuesta transitoria de elementos pasivos (C) al régimen sinusoidal permanente



$$v(t) = L * \frac{di(t)}{dt}$$

$$v(t) = V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$i(t) = I_P e^{j\varphi_I} e^{j\omega t}$$

$$V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = j\omega L I_P e^{j\varphi_I} e^{j\omega t} = \omega L I_P e^{j\pi/2} e^{j\varphi_I} e^{j\omega t}$$

$$\varphi_V = \varphi_I + \frac{\pi}{2} \rightarrow \varphi_I = \varphi_V - \frac{\pi}{2}$$

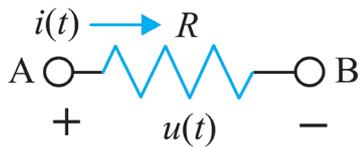
La corriente está **retrasada 90°** a la tensión

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{j\omega L I_P e^{j\varphi_I} e^{j\omega t}}{I_P e^{j\varphi_I} e^{j\omega t}} = j\omega L$$

$$Z_L = j\omega L$$

## Impedancia

Respuesta transitoria de elementos pasivos (R, L, C) al régimen sinusoidal permanente



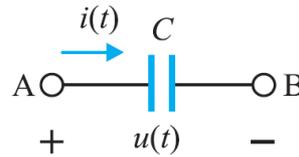
$$v(t) = R * i(t)$$

$$V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = R I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$\varphi_V = \varphi_i$$

La corriente está **en fase** con la tensión

$$Z_R = R = \frac{V_P}{I_P}$$



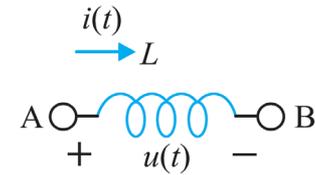
$$i(t) = C * \frac{dv(t)}{dt}$$

$$I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} = j\omega C V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$\varphi_i = \varphi_V + \pi/2$$

La corriente está **adelantada 90°** a la tensión

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$



$$v(t) = L * \frac{di(t)}{dt}$$

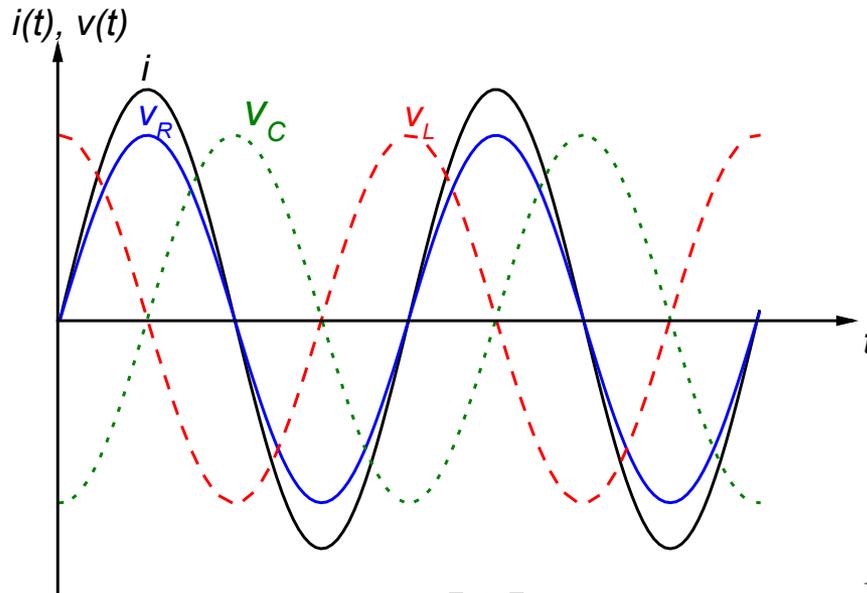
$$V_P e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = j\omega L I_P e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$\varphi_i = \varphi_V - \pi/2$$

La corriente está **retrasada 90°** a la tensión

$$Z_L = j\omega L$$

## Impedancia



$v_R$  en fase con  $i(t)$

$v_L$  está adelantada  $90^\circ$  a  $i(t)$

$v_C$  está retrasada  $90^\circ$  a  $i(t)$

$$Z_R = R$$

$$Z_C = \frac{-j}{\omega C}$$

$$Z_L = j\omega L$$

$$Z = R + jX \text{ } [\Omega]$$

Resistencia:  $R \text{ } [\Omega]$

Reactancia inductiva  $X_L = \omega L \text{ } [\Omega]$

Reactancia capacitiva  $X_C = \frac{-1}{\omega C} \text{ } [\Omega]$

La impedancia es un **número complejo**:

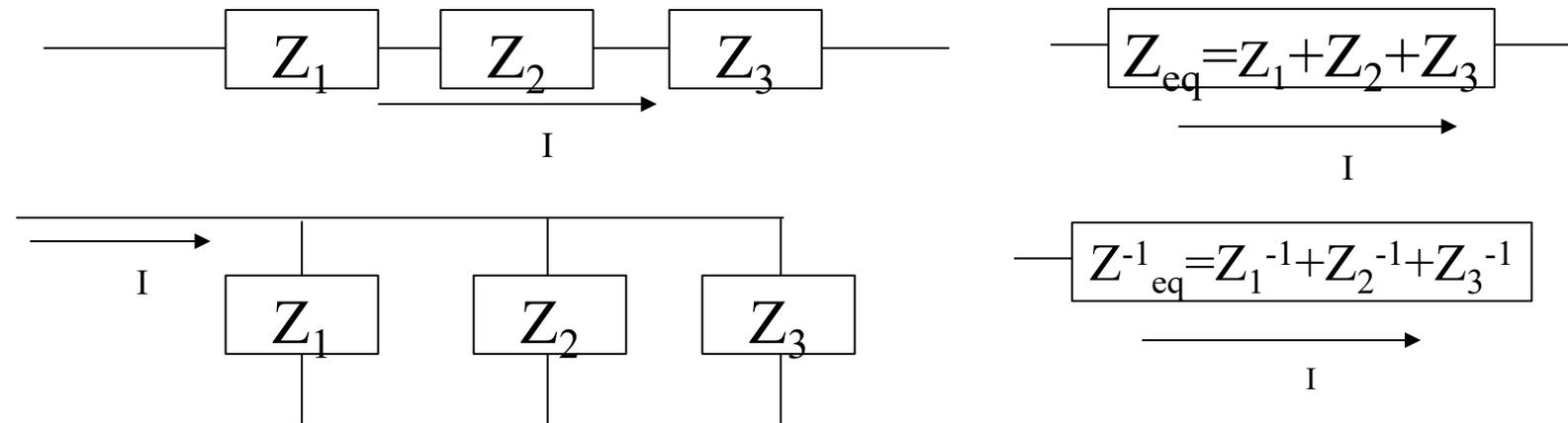
A la parte **real** la llamaremos **resistencia**

A la parte **imaginaria** la denominamos **reactancia**.

## Impedancia

### Asociación de elementos pasivos. Leyes de Kirchoff. Thevenin.

- Las reglas para determinar impedancias equivalentes (asociaciones en serie y en paralelo) son **idénticas a las estudiadas en DC para las resistencias**.
- Las leyes de Kirchoff se aplican igualmente en forma fasorial sustituyendo tensiones, corrientes e impedancias por los fasores correspondientes.
- Los teoremas de Thevenin y Norton se aplican de maneras análoga empleando fasores e impedancias complejas.



## Respuesta en frecuencia de circuitos RC y RL.

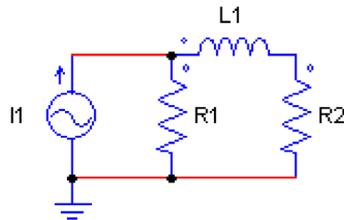
Ej1. Calcular la corriente en un circuito R-L-C en serie con una fuente de tensión de valor  $v=10\cos(8t)$ , donde  $R=4 \Omega$ ,  $C=0.025 \text{ F}$  y  $L=1 \text{ H}$ .

$$i(t) = 2\cos(8t - 36.9^\circ)$$

Ej2. Hallad el voltaje que cae en el condensador del ejercicio anterior.

$$v(t) = 10\cos(8t - 126.9^\circ)$$

Ej3. Hallad el voltaje que cae en  $R_2$  de la figura inferior si  $R_1 = 1 \Omega$ ,  $R_2 = 2 \Omega$ ,  $L=0,5 \text{ H}$  y  $i_1 = 10 \cos 8t$ .



## Respuesta en frecuencia de circuitos RC y RL.

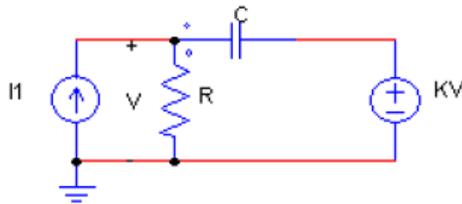
Ej4. Tenemos una fuente  $V = 1$  conectada en serie con dos elementos  $Z_1 = -2j$  y  $Z_2 = 1 + 2j$ . Hallad el voltaje que cae en  $Z_2$ .

$$v_{z_2}(t) = \sqrt{5} \cos(63.43^\circ)$$

Ej5. En el mismo circuito del problema 18 hallad  $Z_2$  para que  $V_2 = 7 - 3j$ , sabiendo que  $V_1 = 3 + j$  y que  $Z_1 = -2j$ .

$$Z_2 = 4.81 \angle -131.63^\circ$$

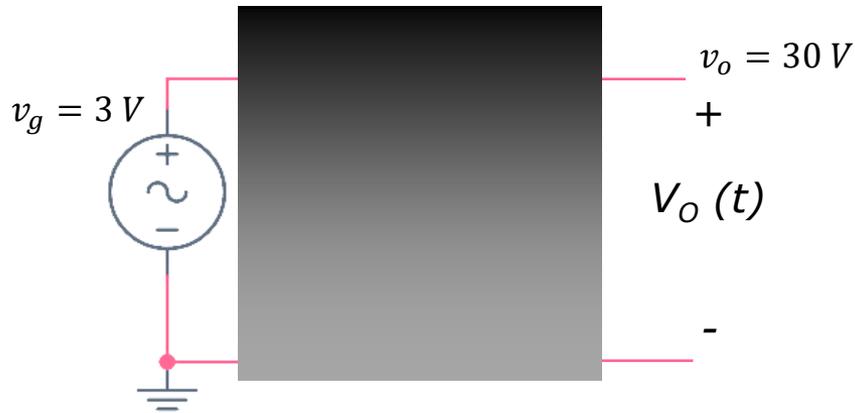
Ej6. Hallar en el circuito inferior la corriente que circula por la resistencia.  $R = 4\Omega$ ,  $C = 0.125 \text{ F}$ ,  $I(t) = 3 \cos 4t$ ,  $K = 0.5$ .



$$i_R(t) = \frac{3\sqrt{2}}{2} \cos(4t - 45^\circ)$$

## Función de Transferencia

En lugar de estudiar todas las I, V de un circuito nos centramos en la relación entrada-salida:  $T(\omega) = \frac{v_o(t)}{v_g(t)}$



P. Ej en DC: Tenemos  $v_g = 3V$  y  $v_o = 30V \rightarrow$   
 La función de transferencia sería  $T = 10$

La *amplificación* o *ganancia* de este circuito sería 10.  
 Definimos la ganancia en decibelios:

$$g_v = 20 \log_{10}|T| = 20 \log_{10} 10 = 20 \text{ (dB)}$$

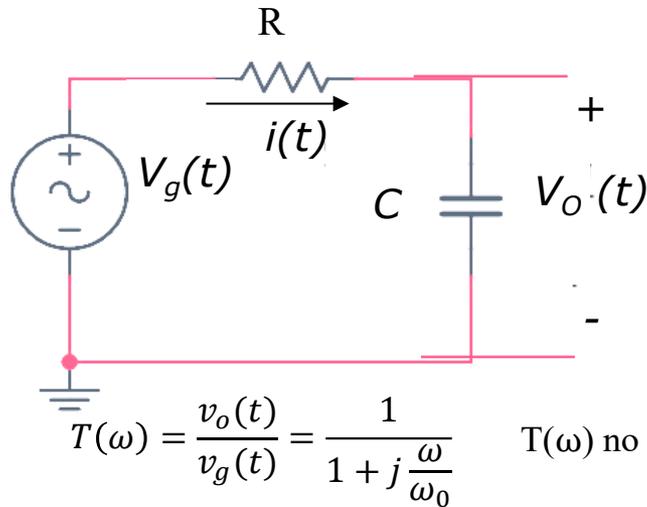
2º. Ej en DC:  $v_g = 3V$  y  $v_o = 0.3V \rightarrow$   
 La función de transferencia sería  $T = 0.1 = 10^{-1}$

La *atenuación* o *ganancia* de este circuito sería 0.1 o en decibelios:

$$g_v = 20 \log_{10}|T| = 20 \log_{10} 0.1 = -20 \text{ (dB)}$$

## Función de Transferencia

En lugar de estudiar todas las I, V de un circuito nos centramos en la relación entrada-salida:  $T(\omega) = \frac{v_o(t)}{v_g(t)}$



Divisor de tensión  $v_o(t) = v_g(t) \times \frac{Z_c}{Z_c + Z_R}$

$$T(\omega) = \frac{v_o(t)}{v_g(t)} = \frac{v_g(t) \times \frac{Z_c}{Z_c + Z_R}}{v_g(t)} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_R}$$

$$\frac{Z_c}{Z_R + Z_c} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + Rj\omega C} \uparrow = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}$$

$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

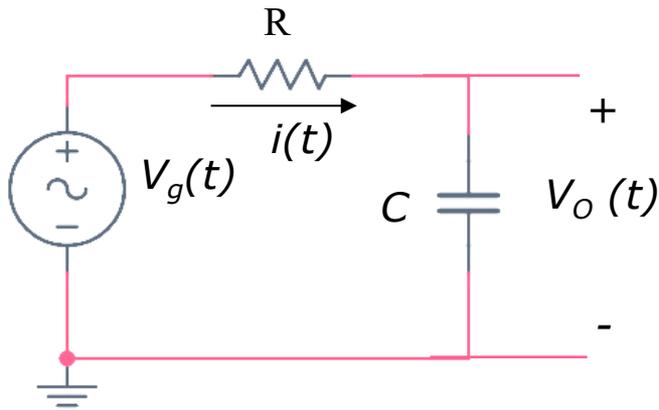
$T(\omega)$  no depende del valor de  $v_g$ , solo de la frecuencia  $\omega$

Es un número complejo  $\Rightarrow |T| \angle \phi \quad \Rightarrow T(\omega) = \frac{1 - j\frac{\omega}{\omega_0}}{1^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$

$$\left\{ \begin{array}{l} |T(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \\ \phi = -\text{atan}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \end{array} \right.$$

## Función de Transferencia

Valores extremos de la función de transferencia ( $\omega \rightarrow 0$  y  $\omega \rightarrow \infty$ )



$$|T(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$

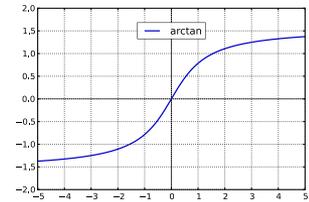
$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(\omega)| = 1$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(\omega)| = 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \phi = 0^\circ$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \phi = -90^\circ$$

$$\phi = -\text{atan}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

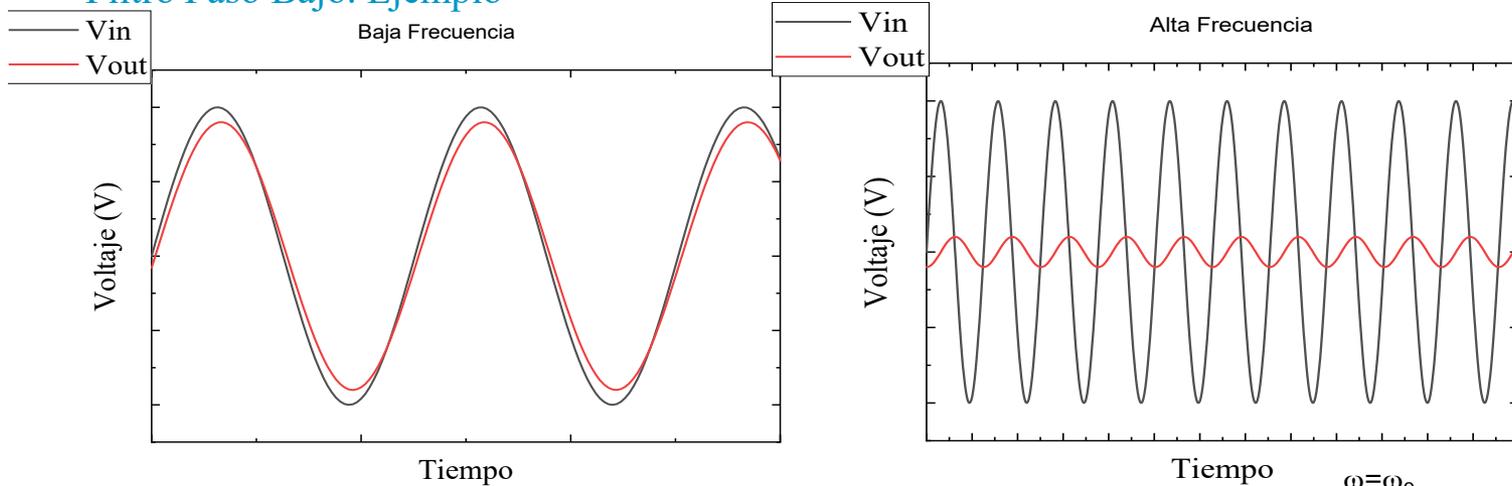


$$T(\omega) = \frac{v_o(t)}{v_g(t)} \rightarrow v_o = v_g T \rightarrow \begin{cases} T(\omega = 0) = 1 \angle 0^\circ \rightarrow \text{Salida} = \text{Entrada} \\ T(\omega \rightarrow \infty) = 0 \angle -90^\circ \rightarrow |\text{Salida}| \rightarrow 0 \\ \angle \text{salida} = \angle \text{entrada} - 90^\circ \end{cases}$$

$$i \omega = \omega_0 ? \rightarrow \begin{cases} |T(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \phi = -\text{atan}(1) = -45^\circ \end{cases}$$

## Función de Transferencia

### Filtro Paso Bajo. Ejemplo

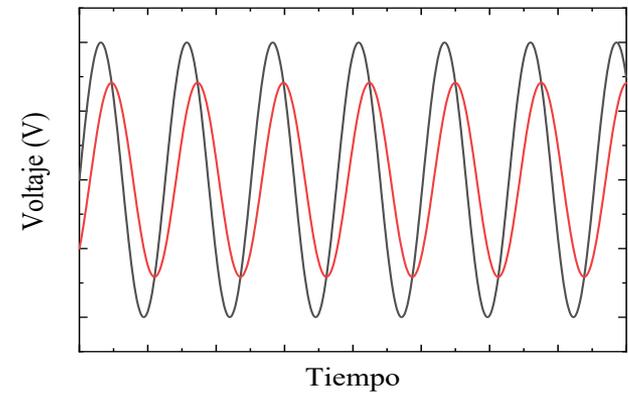


¿Qué es baja y alta? → Depende del circuito ( $R \cdot C$ )

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Por ej:  $R=1 \text{ k}\Omega$  y  $C=10 \text{ }\mu\text{F} \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{10^3 \times 10^{-5}} = 100 \text{ rd/s}$

Para  $\omega = \omega_0$ ,  $v_o = v_g T = \sqrt{\frac{1}{2}} v_g$   
 $\phi = -45^\circ$

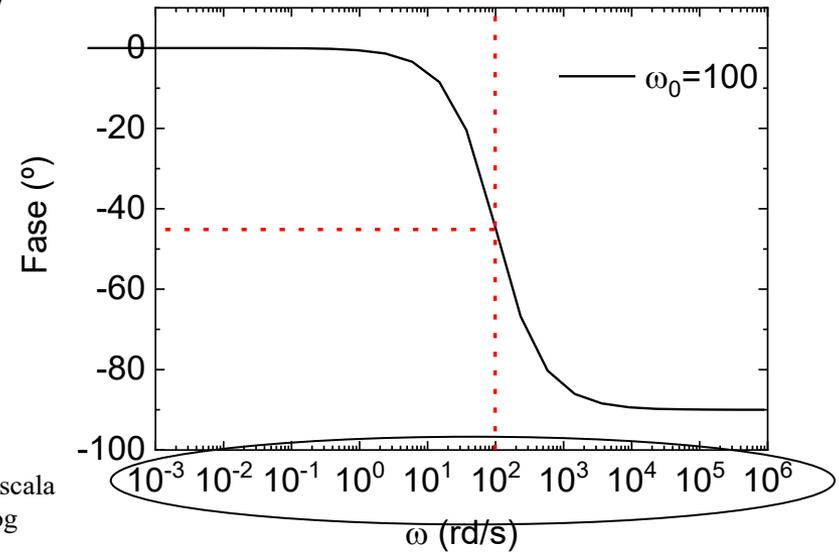
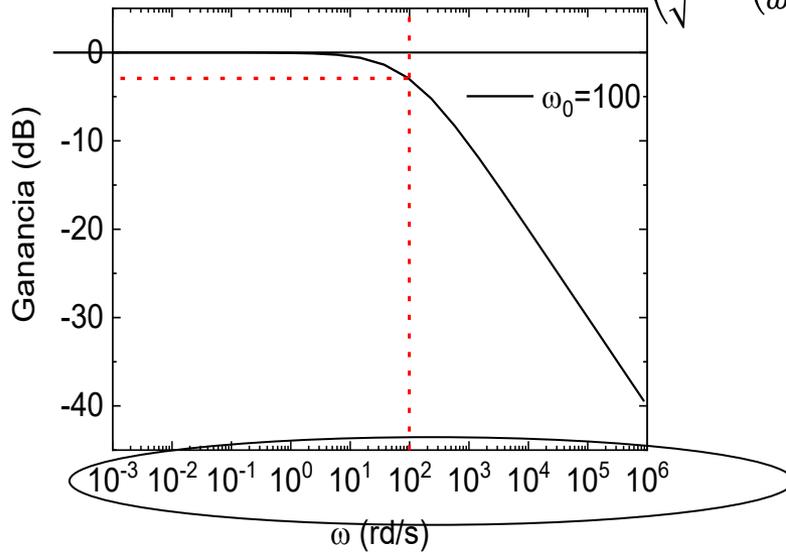


## Función de Transferencia

### Filtro Paso Bajo

$$|T(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad \phi = -\text{atan}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$$

$$\text{Ganancia(dB)} = 20 \log\left(\left|\frac{V_{out}(\omega)}{V_{in}(\omega)}\right|\right) = 20 \log\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}\right)$$



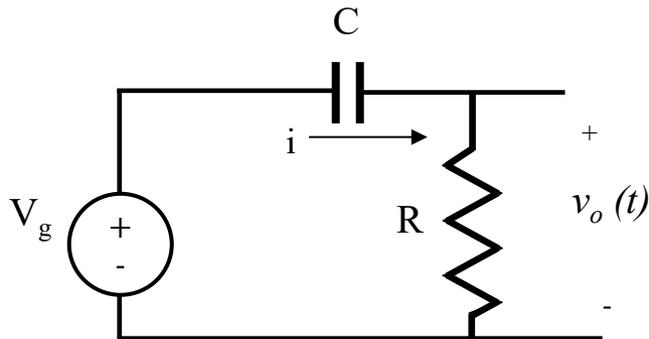
Escala log

$$\omega = \omega_0 \Rightarrow \text{Gain} = 20 \log(1/\sqrt{2}) \approx -3 \text{dB}$$

$$\phi = -45^\circ$$

## Función de Transferencia

### Filtro Paso Alto



$$T(\omega) = \frac{v_o(t)}{v_g(t)} = \frac{j\omega}{j\omega + \omega_0}$$

$$|T(\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

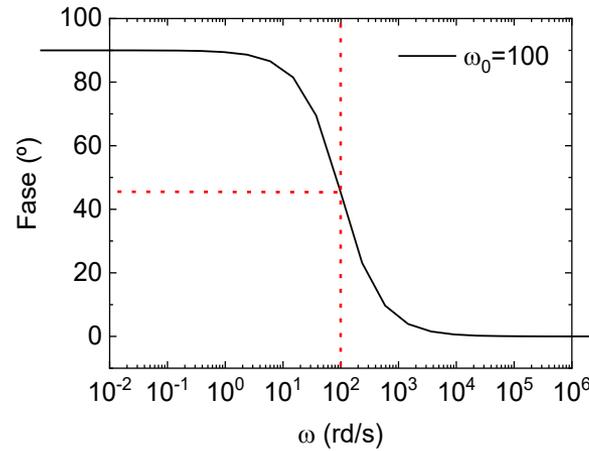
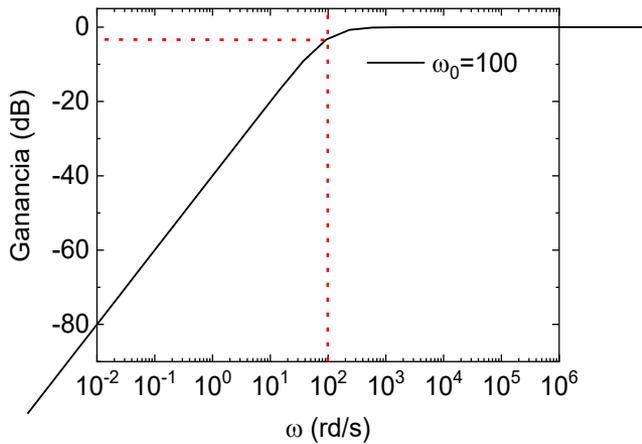
$$\phi = \text{atan}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} |T(\omega)| = 0$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |T(\omega)| = 1$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \phi = 90^\circ$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \phi = 0^\circ$$



- *Circuitos Eléctricos*. J. Fraile Mora. Pearson
- *Microelectrónica: circuitos y dispositivos*. M. N. Horenstein, Prentice Hall
- *Circuitos Electrónicos, análisis simulación y diseño*. N. Malik, Prentice Hall

• **Guerra de las corrientes:**

- <https://www.filmaffinity.com/es/film506234.html>
- <https://www.youtube.com/watch?v=v19k8g30emo>
- <https://www.youtube.com/watch?v=iPW9m6RKR0Y>

REE, Red Eléctrica de España <http://www.ree.es/>

• **Mapa mundial de voltajes y frecuencias**

[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Enchufes,\\_voltajes\\_y\\_frecuencias\\_por\\_país](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Enchufes,_voltajes_y_frecuencias_por_país)

## BIBLIOGRAFÍA

## Tema 2. Amplificador Operacional

# Índice

Introducción

Modelo ideal

Límites de funcionamiento

Amplificador operacional sin realimentación

Amplificador operacional realimentado

Montajes lineales con A.O.

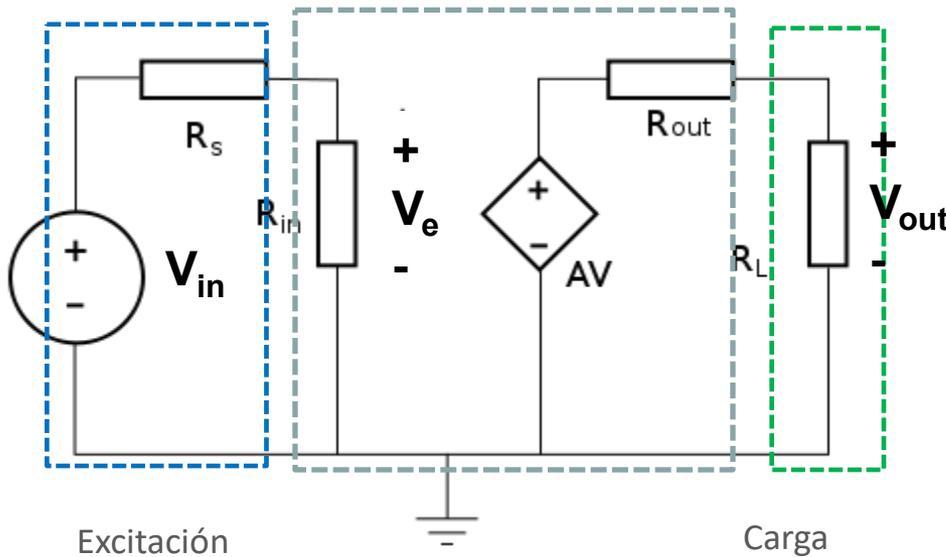
Montajes no lineales con A.O.

- Microelectrónica. Jacob Millman, Arvin Grabel. McGraw Hill.
- Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos. Mark N. Horenstein. Ed. Prentice Hall
- The Art of Electronics. Paul Horowitz. Cambridge University Press.

# Introducción

## Amplificador de tensión

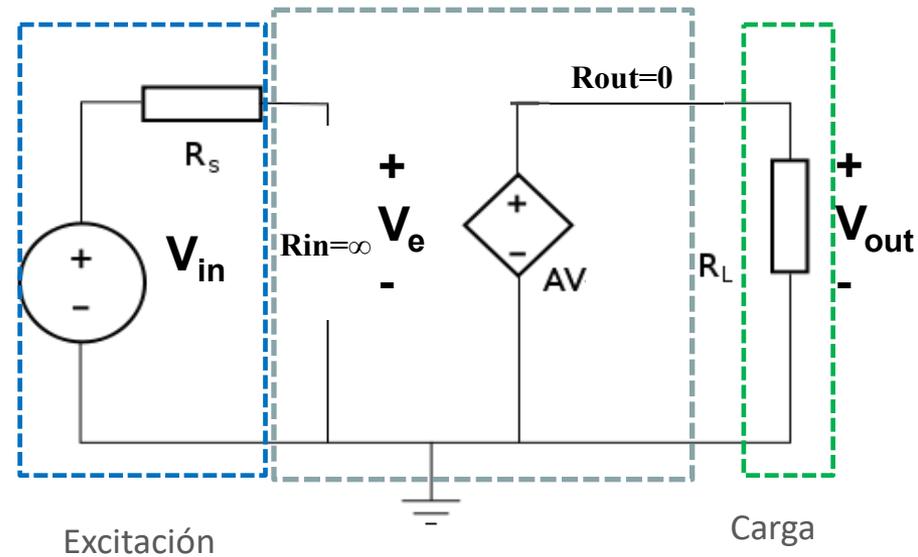
### Amplificador real



$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} < \frac{V_{out}}{V_e}$$

**Ganancia en tensión**

### Amplificador ideal



$$A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_e}$$

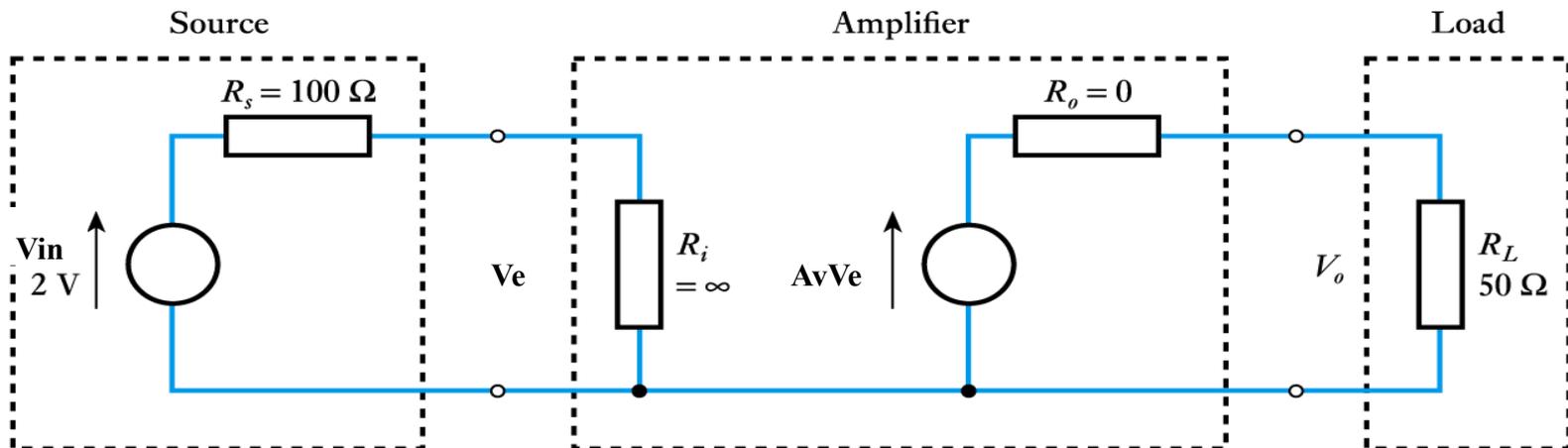
# Introducción

## Amplificador de tensión

### Ejemplo 1

**Amplificador ideal** con  $A_v=10$ ,  $R_i=\infty$  y  $R_o=0$ .

El amplificador conectado en su entrada con un sensor de 2V de salida y una resistencia de salida de  $100\Omega$ . El amplificador conectado a la salida una carga de  $50\Omega$ . Calcular la tensión de salida.



# Introducción

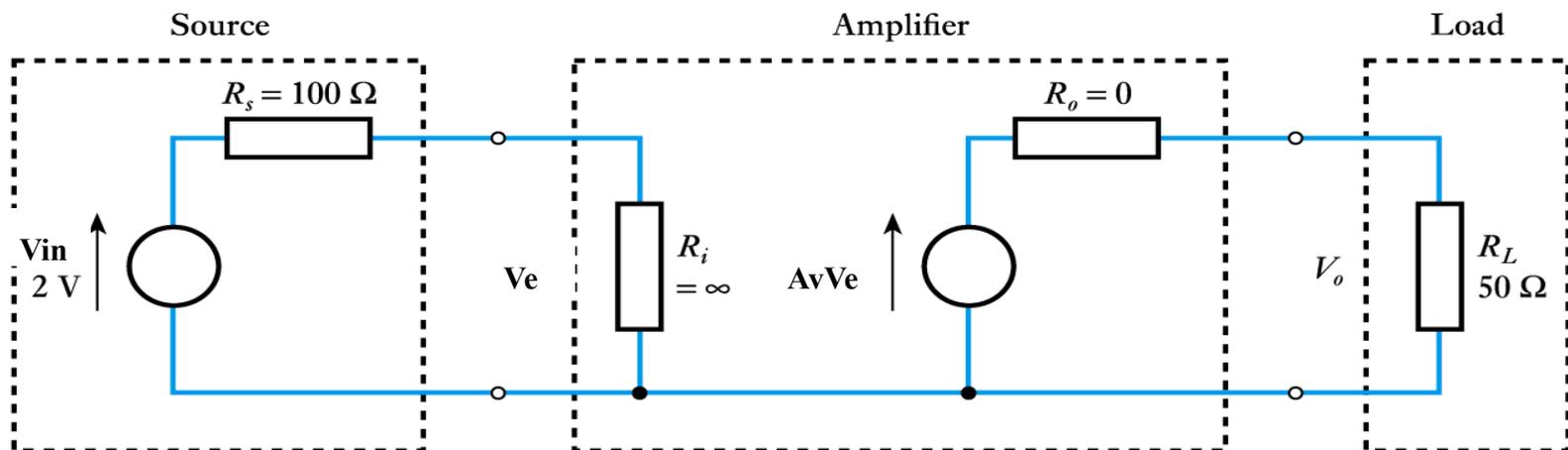
## Amplificador de tensión

### Solución Ejemplo 1

$$V_e = \frac{R_i}{R_s + R_i} V_{in} \approx V_{in} = V_e = 2 \text{ V}$$

$$V_o = A_v V_e \frac{R_L}{R_o + R_L} = 10 V_e \frac{50 \Omega}{0 \Omega + 50 \Omega} = 10 \times 2 \frac{50 \Omega}{50 \Omega} = 20 \text{ V}$$

$$\text{Voltage gain } (A_v) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_o}{V_e} = \frac{20}{2} = 10$$



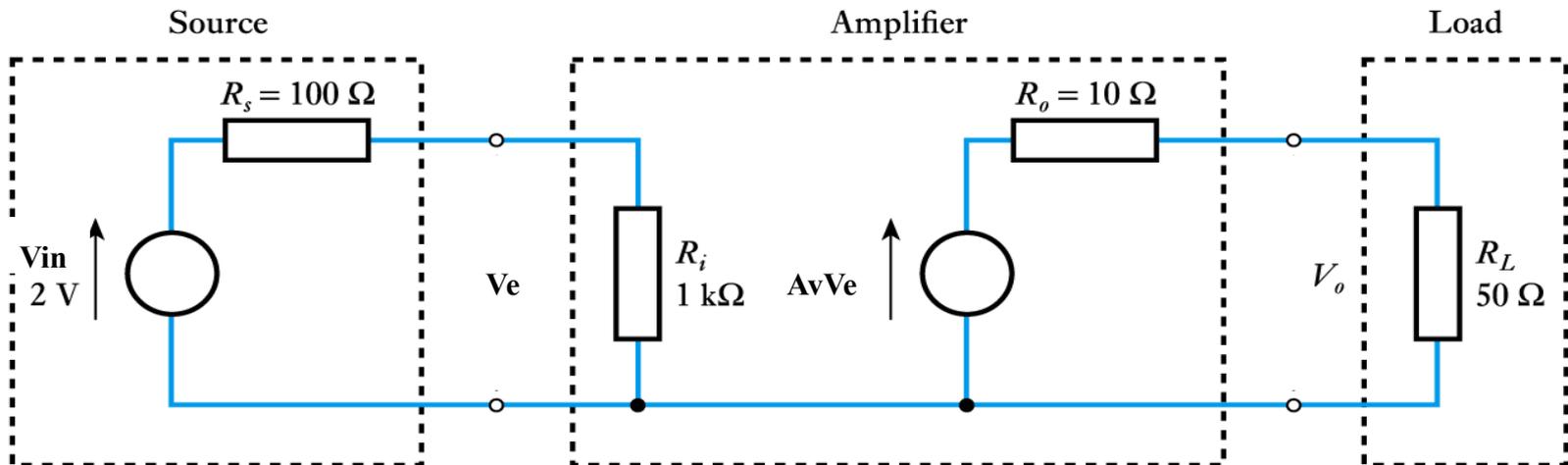
# Introducción

## Amplificador de tensión

### Ejemplo 2

**Amplificador real** con  $A_v=10$ ,  $R_i=1\text{k}\Omega$  y  $R_o=10\Omega$ .

El amplificador conectado en su entrada con un sensor de 2V de salida y una resistencia de salida de  $100\Omega$ . El amplificador conectado a la salida una carga de  $50\Omega$ . Calcular la tensión de salida.



# Introducción

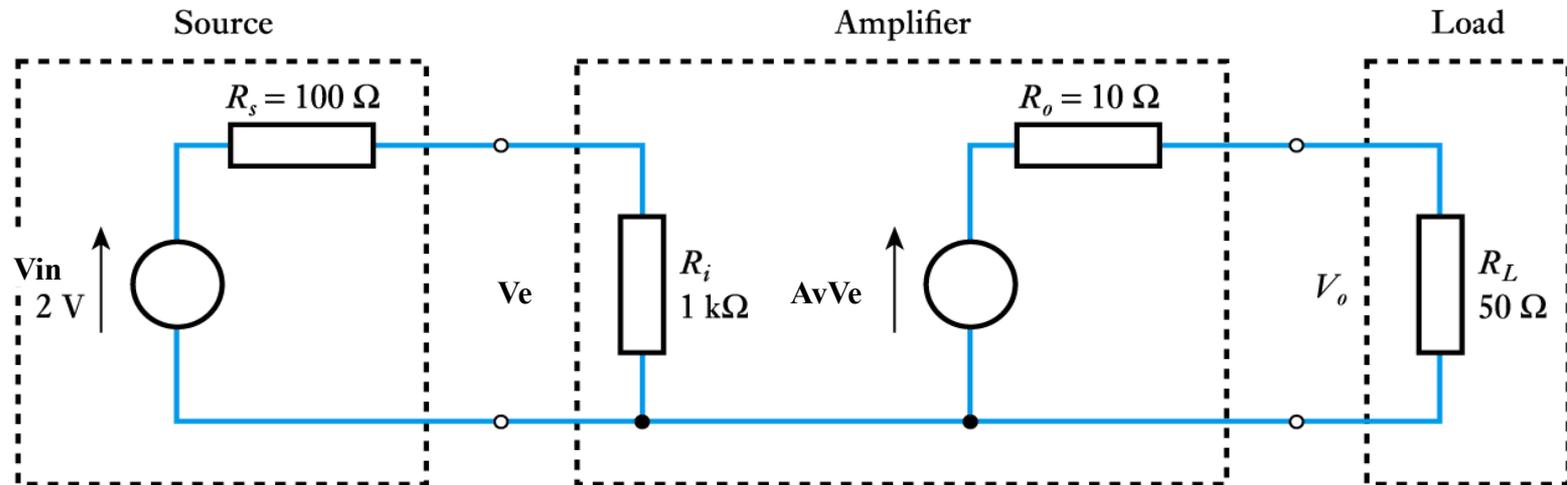
## Amplificador de tensión

### Solución Ejemplo 2

$$\begin{aligned}
 V_e &= \frac{R_i}{R_s + R_i} V_{in} \\
 &= \frac{1 \text{ k}\Omega}{100 \Omega + 1 \text{ k}\Omega} 2 \text{ V} = 1.82 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\text{Voltage gain } (A_v) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{15.2}{2} = 7.6$$

$$\begin{aligned}
 V_o &= A_v V_e \frac{R_L}{R_o + R_L} \\
 &= 10 V_e \frac{50 \Omega}{10 \Omega + 50 \Omega} \\
 &= 10 \times 1.82 \frac{50 \Omega}{10 \Omega + 50 \Omega} = 15.2 \text{ V}
 \end{aligned}$$

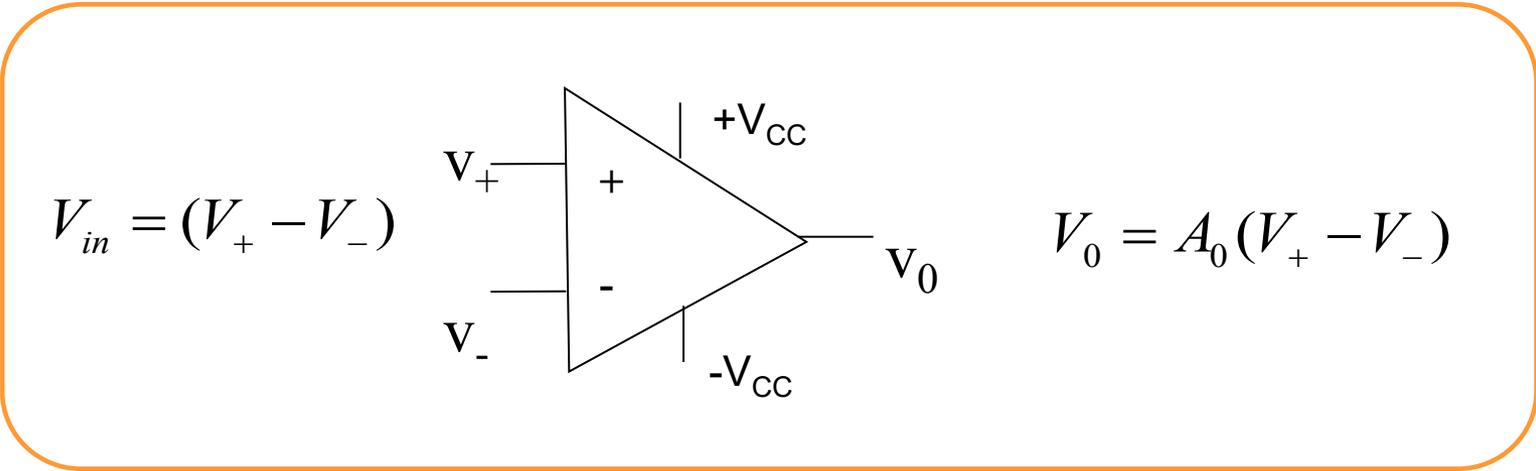


# Introducción

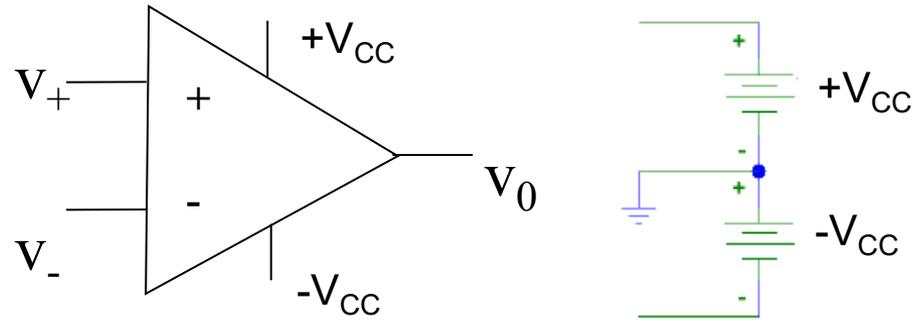
El A.O. es un amplificador de tensión de ganancia muy alta.

Numerosas aplicaciones en electrónica analógica: amplificación, filtrado analógico, acoplamiento, rectificación, detección de umbrales, operaciones analógicas, etc.

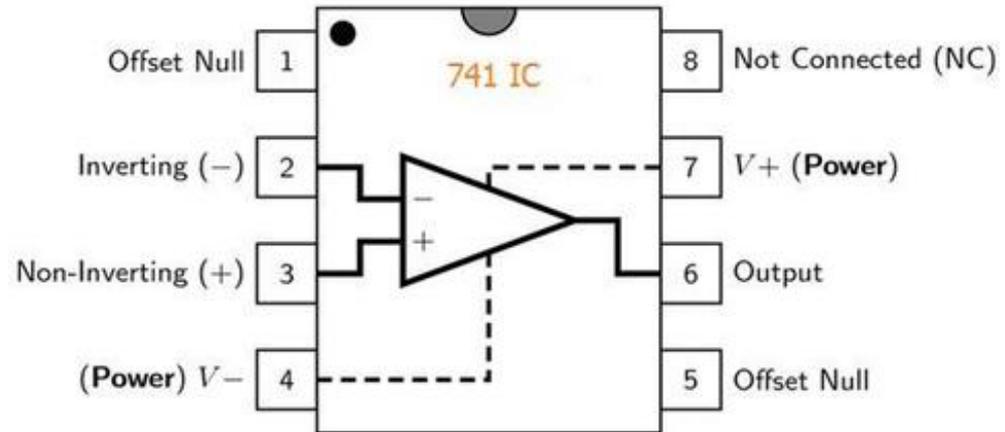
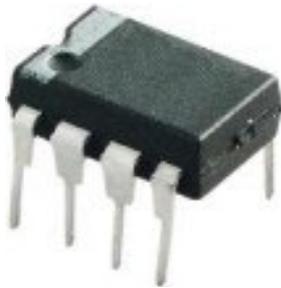
Símbolo circuital del AO:



# Introducción



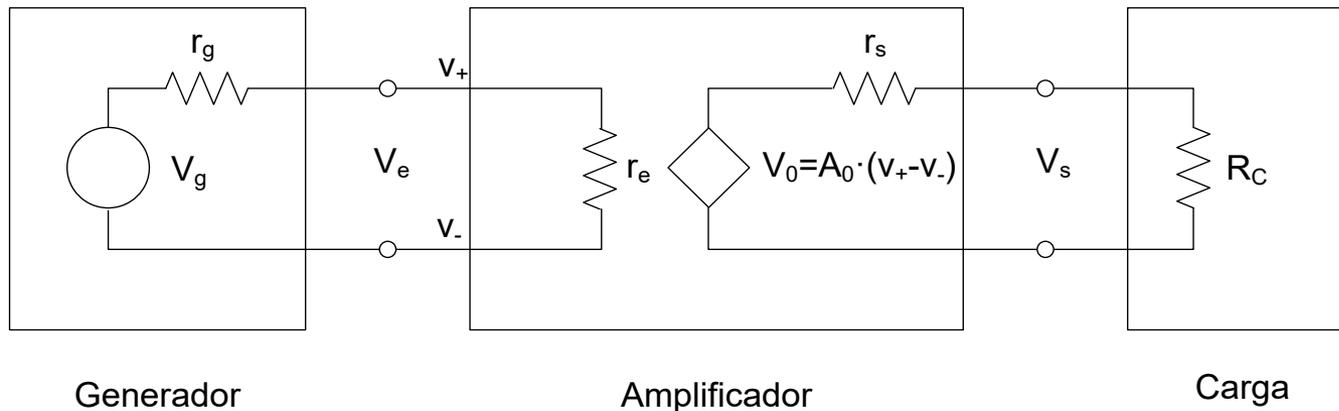
El AO es un Circuito Integrado



741 Op-Amp IC

## Modelo simplificado A.O.

Dispositivo electrónico con dos entradas a las cuales se conecta una señal llamada **fuente (source)** y produce una señal de salida proporcional, **ganancia (gain)**, a la señal de entrada. Esta señal de salida se conecta normalmente a otro circuito o elemento, llamado **carga (load)**.



$$A_0 = \frac{V_0}{V_e} = \frac{V_0}{V_+ - V_-}$$

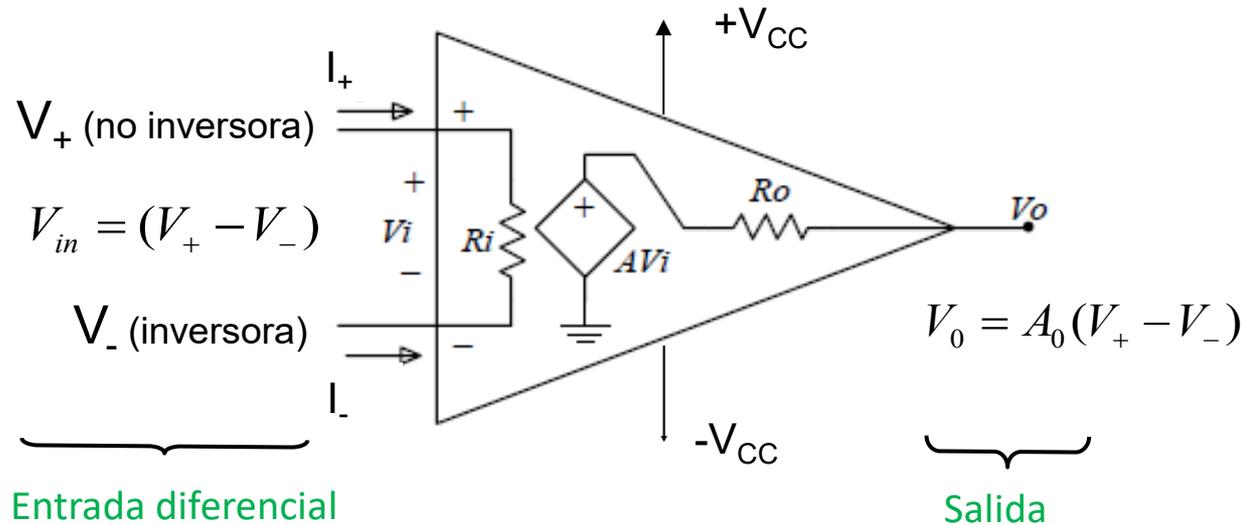
$$\frac{V_s}{V_g} = \frac{r_e}{r_e + r_g} \cdot A_0 \cdot \frac{R_C}{r_s + R_C}$$

idealmente



$$\frac{V_s}{V_g} = A_0$$

# Modelo Ideal del AO



## A.O. ideal

$$A_0 \rightarrow \infty \quad (V_+ - V_-) = \frac{V_o}{A_0}$$

$$R_i \rightarrow \infty \quad \boxed{I_+ \approx I_- \approx 0}$$

$$R_o \rightarrow 0 \quad \boxed{V_o = V_s}$$

Valores típicos de A.O. reales

$$10^4 \leq A_0 \leq 10^6$$

$$R_i \geq 10^6 \Omega$$

$$R_o \leq 100 \Omega$$

# Resumen parámetros AO ideal

## Parámetros del Amplificador Operacional Ideal

Ganancia en lazo abierto ( $A_v$ )  $\rightarrow \infty$

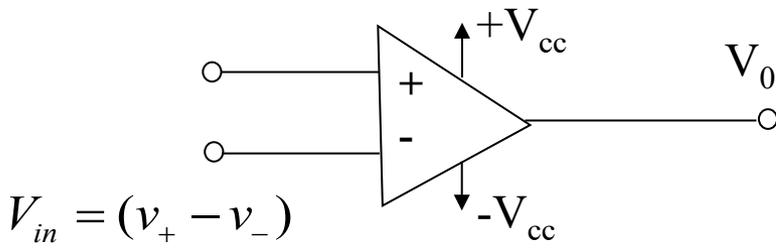
Impedancia de entrada ( $R_i$ )  $\rightarrow \infty$

Impedancia de salida ( $R_o$ )  $\rightarrow 0$

Corrientes de polarización ( $I_+$ ,  $I_-$ )  $\rightarrow 0$

# Límites de funcionamiento del AO Ideal

Saturación de la salida a ( $+V_{cc}$  y  $-V_{cc}$ )



$$v_0 = A_0(v_+ - v_-) \text{ si } -V_{cc} \leq A_0(v_+ - v_-) \leq +V_{cc}$$

$$v_0 = +V_{cc} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) > +V_{cc} \text{ (si } v_+ > v_-)$$

$$v_0 = -V_{cc} \text{ si } A_0(v_+ - v_-) < -V_{cc} \text{ (si } v_+ < v_-)$$

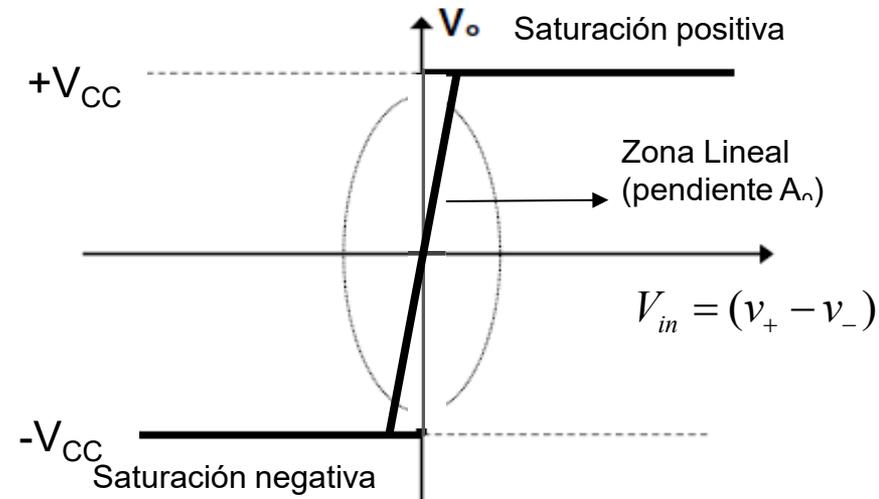
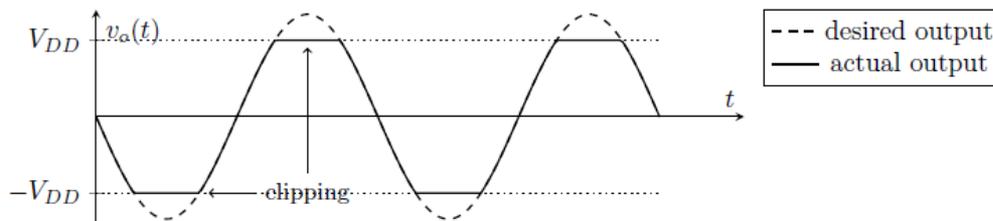
Idealmente  $A_0 \rightarrow \infty$

Comportamiento lineal

Rango de salida

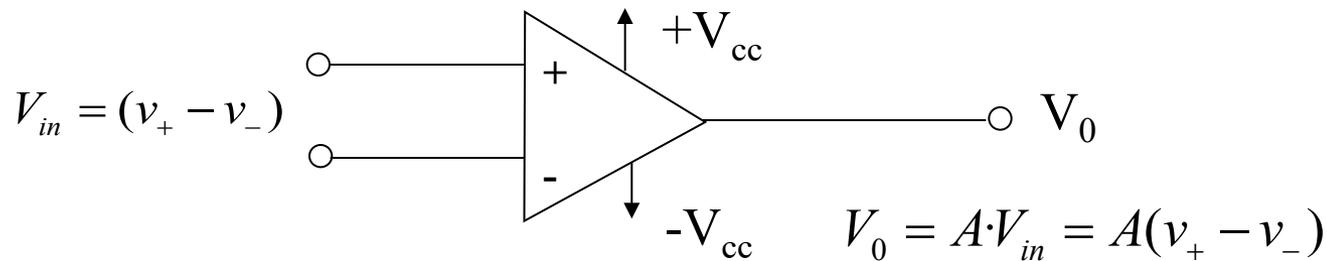
$$V_0 = A_0(v_+ - v_-)$$

$$+V_{cc} < V_0 < -V_{cc}$$



# Ganancia en lazo abierto del A.O

$$A \rightarrow \infty$$



$$A \rightarrow \infty$$

$$V_{in} \geq 0 \Rightarrow V_0 = +V_{cc}$$

La ganancia A es variable con la T<sup>a</sup>

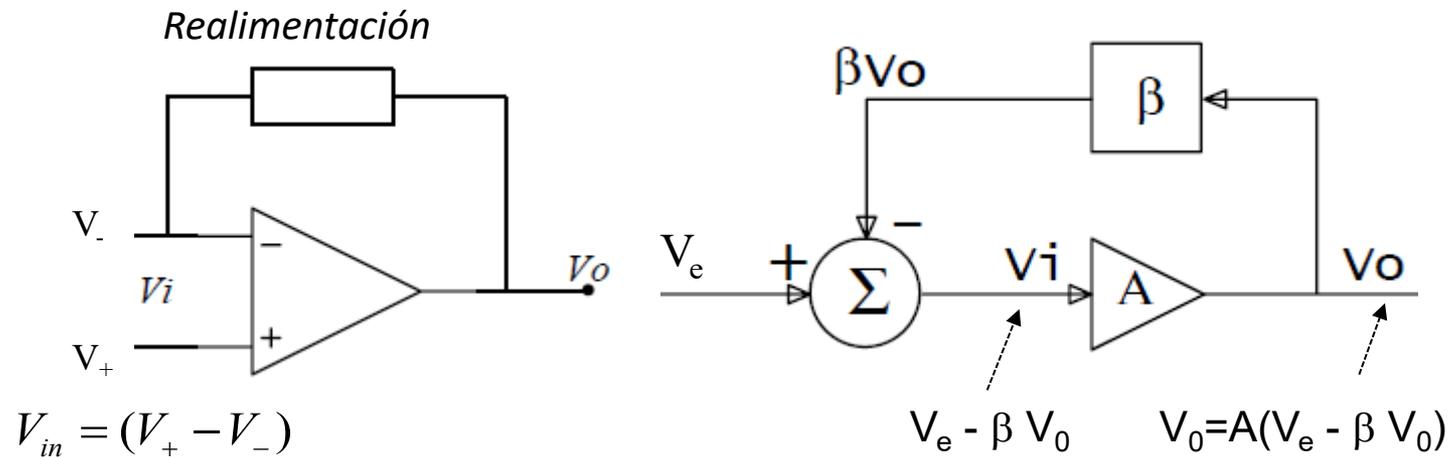
$$V_{in} \leq 0 \Rightarrow V_0 = -V_{cc}$$

Obtener diferentes funcionalidades del AO  
 Estabilizar al AO frente cambios externos de T<sup>a</sup>, etc.



**Realimentación → conectar la salida con la entrada.**

# AO Realimentado (en lazo cerrado)



$$V_0 = A(V_e - \beta V_0) \Rightarrow V_0 = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} V_e \Rightarrow A_f = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

$$A \rightarrow \infty$$

$$A_f = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{A \cdot \beta}} \Rightarrow A_f \approx \frac{1}{\beta}$$

**A:** Ganancia en Lazo Abierto  
**A<sub>f</sub>:** Ganancia en Lazo Cerrado

**A<sub>f</sub> sólo depende de la realimentación**

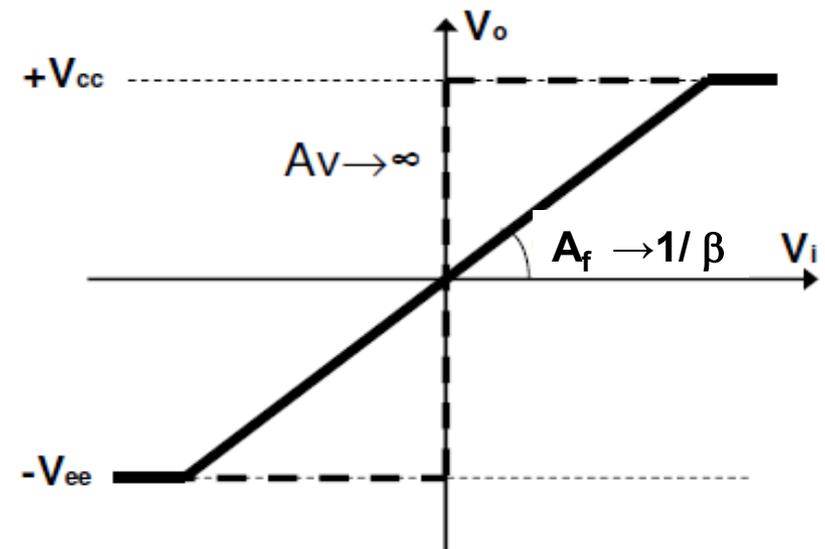
## AO realimentado negativamente

- ✓ Realimentación negativa: sistema estable
- ✓ Realimentación negativa: comportamiento lineal
- ✓ Realimentación positiva: sistema inestable. Aplicación: osciladores
- ✓ Ganancia Ideal en Lazo Cerrado ( $A_f$ ) =  $1/\beta$
- ✓ La ganancia en lazo cerrado sólo depende de la red de realimentación y es independiente de las propiedades internas del AO:  $A$ ,  $r_e$ ,  $r_o$ ...

$$V_{in} = (v_+ - v_-) = \frac{V_0}{A_0}; \quad A_0 \rightarrow \infty$$

$$V_0 = 0 \Rightarrow V_{in} = 0 \Rightarrow \boxed{v_+ \approx v_-}$$

**Cortocircuito Virtual**

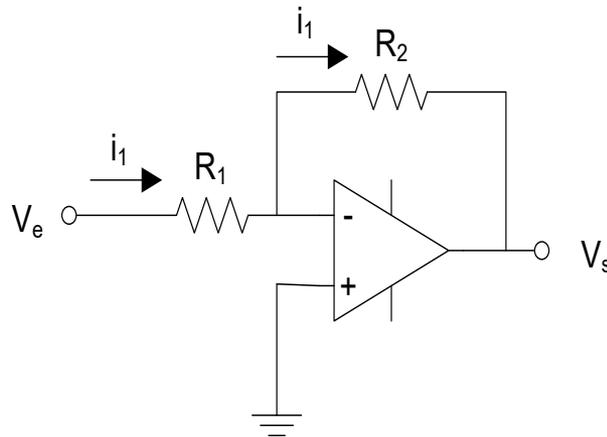


# Montajes lineales con AO

## Amplificador inversor

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$$



$$\frac{V_e - 0}{R_1} = \frac{0 - V_s}{R_2} \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

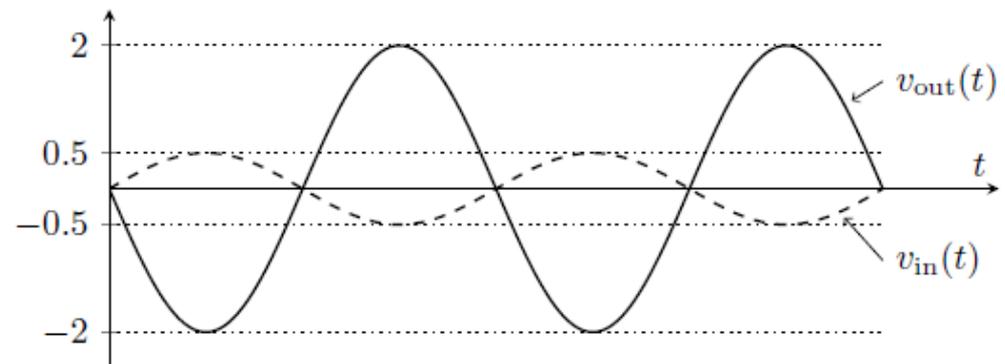
$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

$$R_e = \frac{v_e}{i_e} = R_1$$

Si  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  y  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$

$$\frac{V_s}{V_e} = -4$$

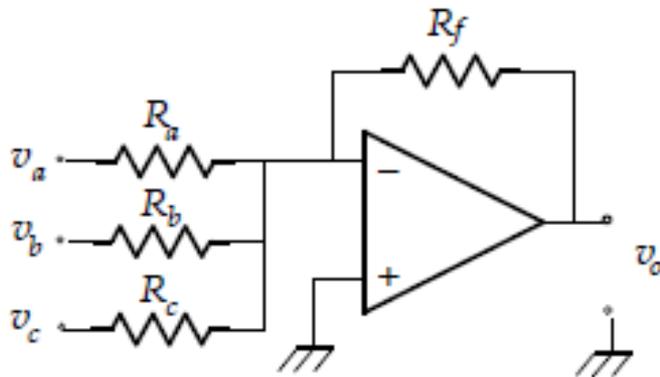


# Montajes lineales con AO

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$$

## Amplificador Sumador



$$\frac{V_a - V_-}{R_a} + \frac{V_b - V_-}{R_b} + \frac{V_c - V_-}{R_c} = \frac{V_- - V_o}{R_f}$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

$$V_o = -R_f \left( \frac{V_a}{R_a} + \frac{V_b}{R_b} + \frac{V_c}{R_c} \right)$$

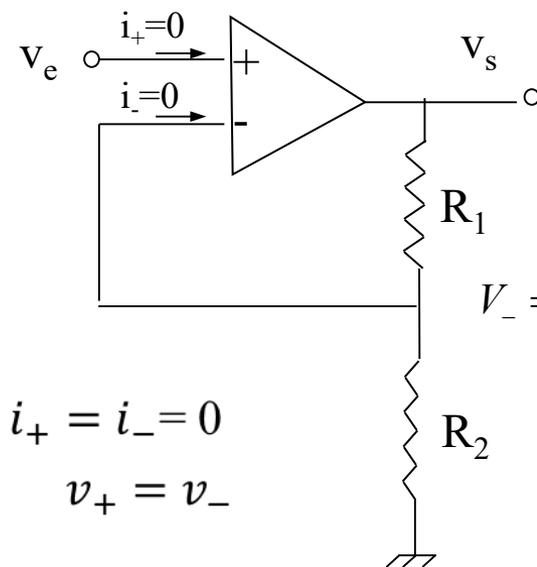
Amplificador utilizado en mezcla de audio

# Montajes lineales con AO

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_0)$$

## Amplificador no inversor



$$V_e = V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s \Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$V_- = \beta \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_s$$

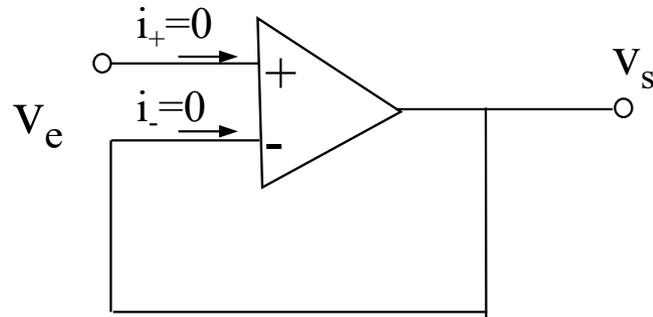
$$R_e = \frac{v_e}{i_e} = \infty$$

# Montajes lineales con AO

## Amplificador seguidor de tensión

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$$



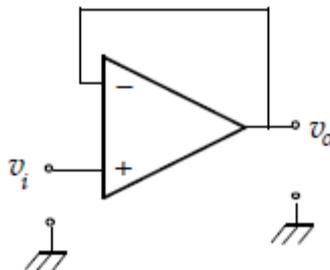
$$R_1 = 0 \text{ y } R_2 = \infty$$

$$\frac{v_s}{v_e} = 1$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

Buffer o adaptador impedancias



$$R_e = \frac{V_e}{I_e} \approx \infty \quad \text{A la entrada es una carga ideal}$$

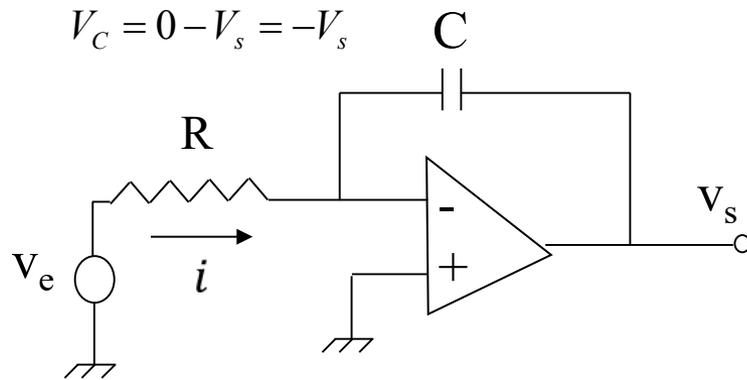
$$R_o = \frac{V_o}{I_o} \approx 0 \quad \text{A la salida es un generador ideal}$$

# Montajes lineales con AO

## Amplificador Integrador

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$$



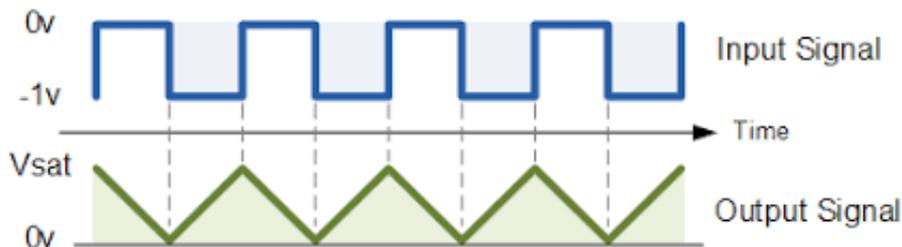
$$V_C = 0 - V_s = -V_s$$

$$i = \frac{V_e}{R} = C \frac{dV_C}{dt} \Rightarrow \frac{dV_C}{dt} = \frac{V_e}{RC}$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_e}{RC} \Rightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$



$$\frac{V_e - 0}{R} = \frac{0 - V_s}{Z_c} \rightarrow \frac{V_e}{R} = \frac{-V_s}{1/j\omega C}$$

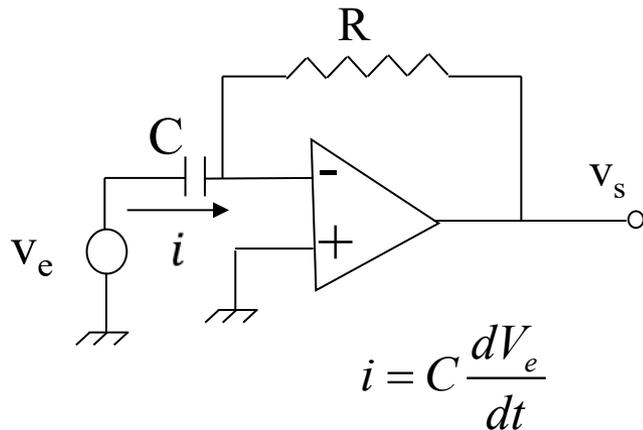
$$V_s = -\frac{V_e}{j\omega RC}$$

# Montajes lineales con AO

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_0)$$

## Amplificador Derivador



$$i = C \frac{dV_e}{dt} = -\frac{V_s}{R}$$

$$V_s = -RC \frac{dV_e}{dt}$$

$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

$$\frac{V_e - 0}{Z_c} = \frac{0 - V_s}{R} \rightarrow \frac{V_e}{1/j\omega C} = \frac{-V_s}{R}$$

$$V_s = -j\omega R C V_e$$

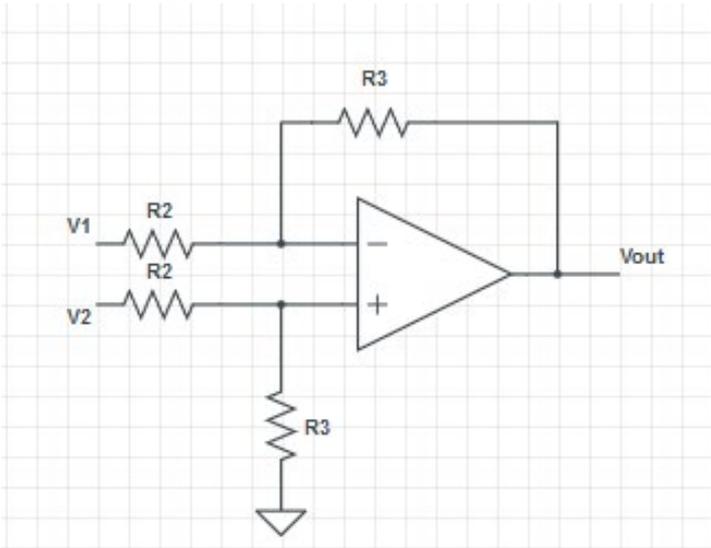
# Montajes lineales con AO

## Amplificador Diferencial

### Amplificador básico de instrumentación

**El AO es ideal**

$$(v_+ = v_-; i_+ = i_- = 0; v_s = v_o)$$



$$\frac{V1 - V^-}{R2} = \frac{V^- - Vout}{R3}$$

$$\frac{V2 - V^+}{R2} = \frac{V^+ - 0}{R3}$$

Circuitos de  **acondicionamiento de señal**  que minimizan el ruido. Amplifican señales débiles procedentes de sensores.

#### Aplicaciones:

Acondicionar la salida de un puente de Wheatstone

Amplificar señales eléctricas biológicas.

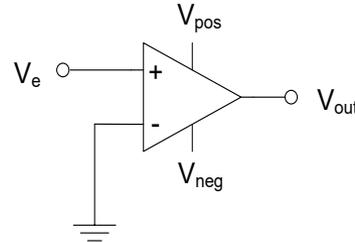
$$i_+ = i_- = 0$$

$$v_+ = v_-$$

$$Vout = -\frac{R3}{R2} (V1 - V2)$$

## Montajes no lineales con AO. Comparador lazo abierto.

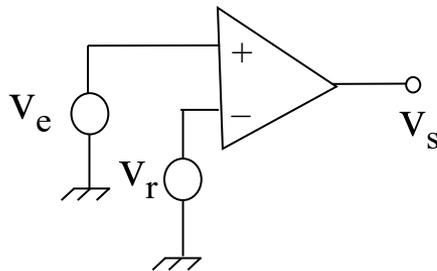
- Un AO sin realimentación se satura  $\Rightarrow$  circuitos no lineales
- Los circuitos no lineales tienen muchas aplicaciones en procesamiento de señal.



$$v_e \geq 0 \Rightarrow V_0 = +V_{cc}$$

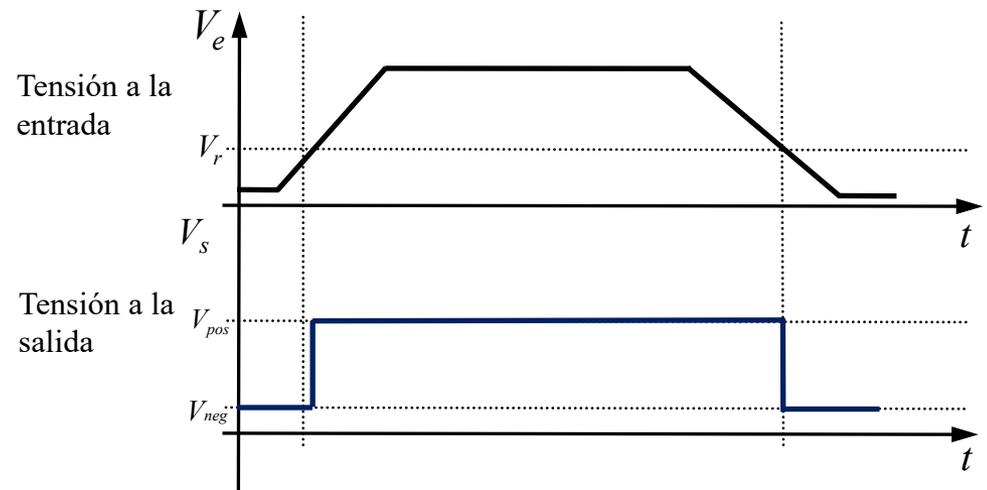
$$v_e \leq 0 \Rightarrow V_0 = -V_{cc}$$

### Comparador en Lazo Abierto y Detector de Polaridad



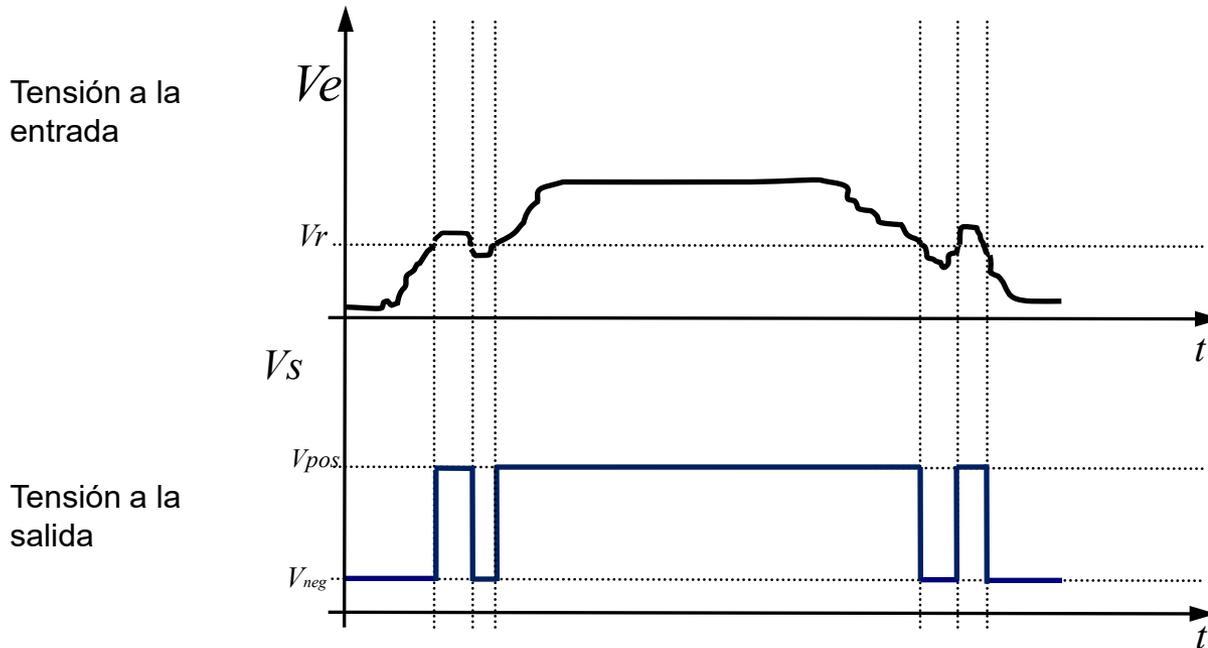
$$\text{Si } v_e > v_r \Rightarrow (v_e - v_r) > 0 \Rightarrow v_0 = +V_{cc}$$

$$\text{Si } v_e < v_r \Rightarrow (v_e - v_r) < 0 \Rightarrow v_0 = -V_{cc}$$



## Montajes no lineales con AO. Comparador lazo abierto.

Si  $V_e$  fluctúa en torno a  $V_{ref}$ , a la salida se producen fluctuaciones

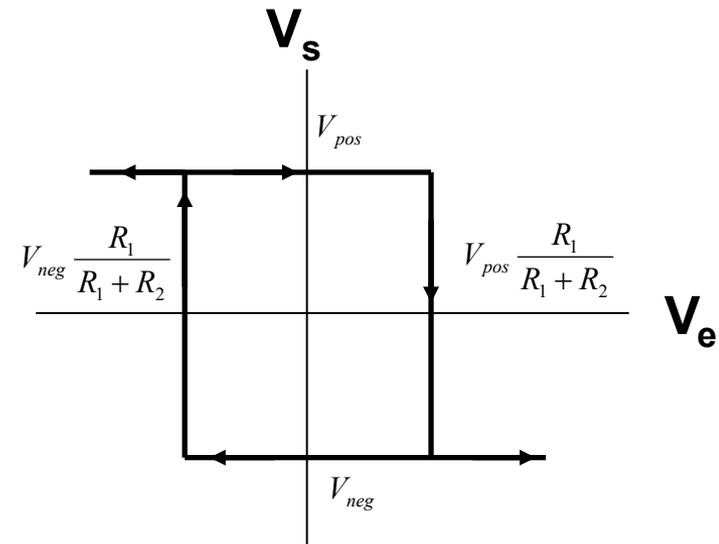
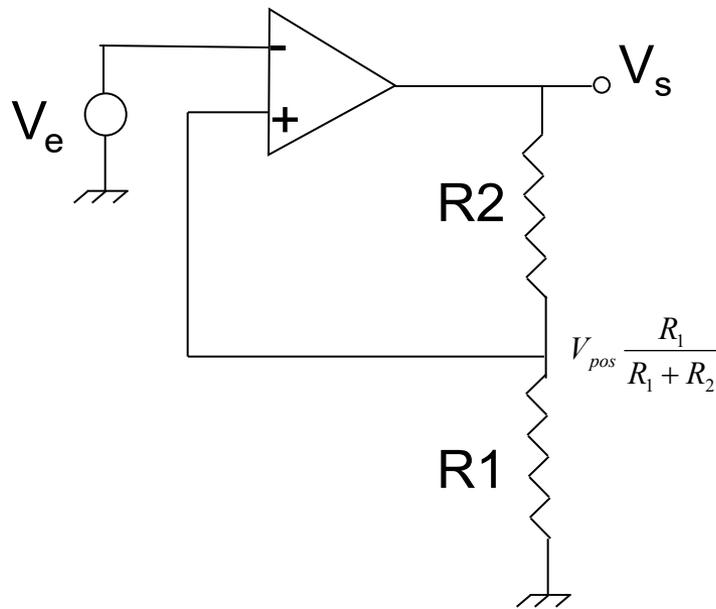


¿Cómo lo evitamos?

# Montajes no lineales con AO. Trigger Schmitt

## Disparador Schmitt (Schmitt Trigger). Comparador con histéresis

Función de transferencia con histéresis



# Montajes no lineales con AO. Trigger Schmitt

## Disparador Schmitt. Comparador con histéresis.

Para  $V_e = 0 \Rightarrow V_s$  puede ser  $V_{pos}$  o  $V_{neg}$ :

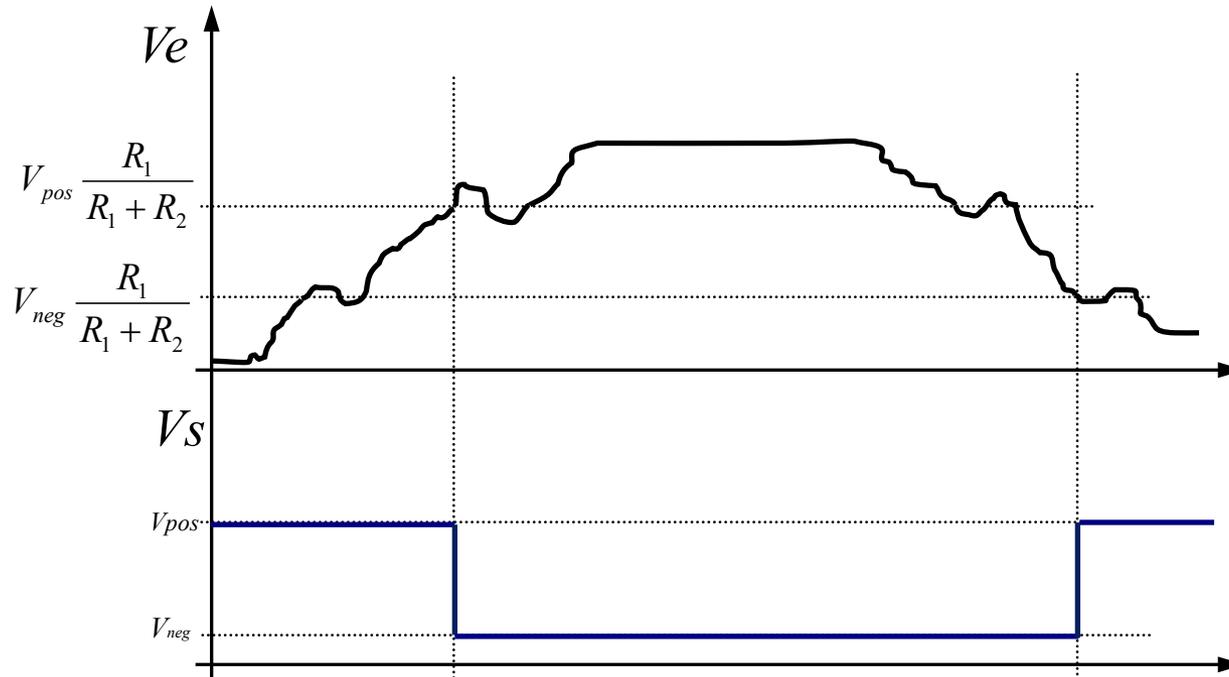
$$v_+ = \frac{v_s \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Si } v_s = V_{pos} \Rightarrow v_+ = \frac{V_{pos} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow (v_+ - v_-) > 0 \Rightarrow v_s = V_{pos}$$

$$\text{Si } v_e > v_+ \Rightarrow (v_+ - v_-) < 0 \Rightarrow v_s = V_{neg} \Rightarrow v_+ = \frac{V_{neg} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$V_s$  conmuta a  $V_{pos}$  si  $V_e$  se hace más negativa que  $v_+$ , por tanto si  $V_e < \frac{V_{neg} \cdot R_1}{R_1 + R_2}$

# Montajes no lineales con AO. Trigger Schmitt



Sin fluctuaciones de la salida. Comparador con histéresis.

## Tema 3. Diodo y rectificación

## Índice

La unión p-n. El diodo de unión

Principio básico de operación. Característica I-V

Modelos circuitales del diodo

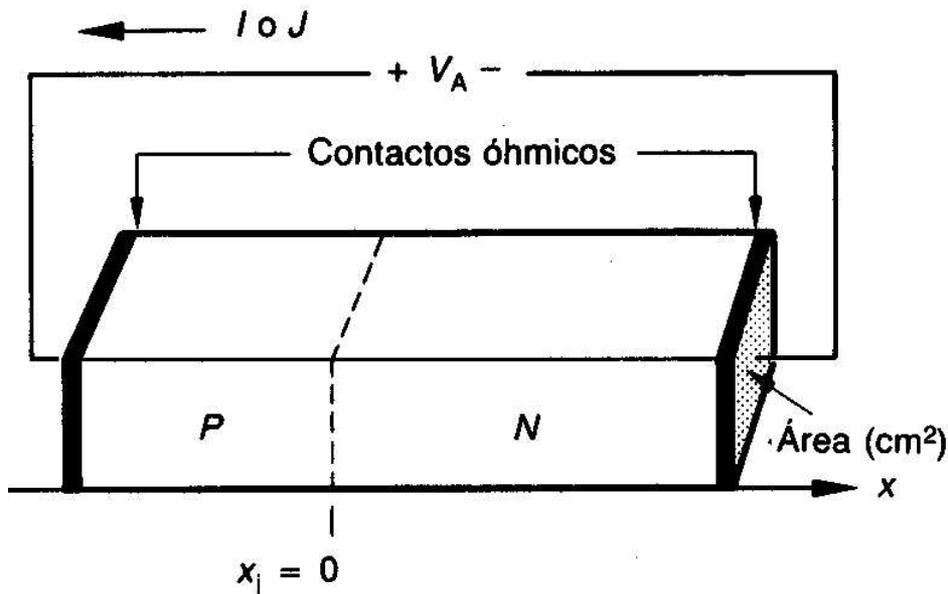
Circuitos básicos con diodos. Rectificación.

El diodo Zener. Otros tipos de diodos

- Microelectrónica. Jacob Millman, Arvin Grabel. McGraw Hill.
- Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos. Mark N. Horenstein. Ed. Prentice Hall
- The Art of Electronics. Paul Horowitz. Cambridge University Press.

# El Diodo de Unión

- ✓ Cuando un semiconductor **dopado tipo P** y un semiconductor **dopado tipo N** se ponen en contacto, se forma una unión P-N.
- ✓ Si realizamos un “buen” contacto eléctrico (denominado contacto óhmico) en cada zona, tenemos un dispositivo electrónico llamado **diodo de unión**.

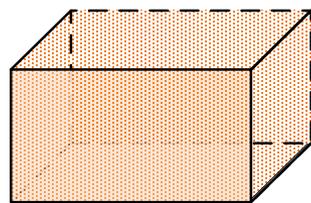


- $V_A$  o  $V_D$ : tensión aplicada al diodo (V)
- $I_D$ : corriente del diodo (A)
- $J_D$ : densidad de corriente,  $I/\text{Área}$  (A/cm<sup>2</sup>)
- $x_j$ : posición de la unión (m)

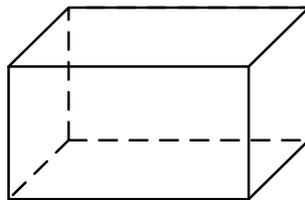
# El Diodo. Unión P-N. Semiconductores

## Unión P-N sin polarización externa

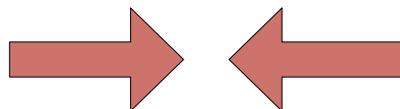
- Al formar la unión P-N, dado que la zona dopada tipo N posee menos huecos que la zona tipo P, **los electrones libres de la zona N SE DIFUNDEN** hacia la zona P, ocupando **los huecos libres existentes en la zona P**.



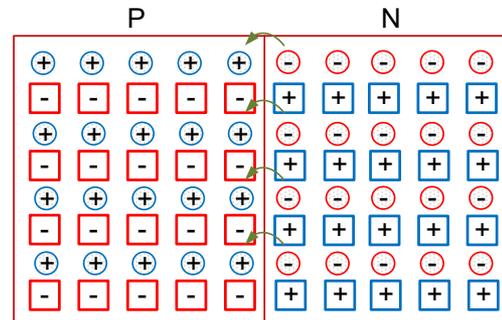
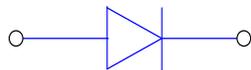
Si dopado p



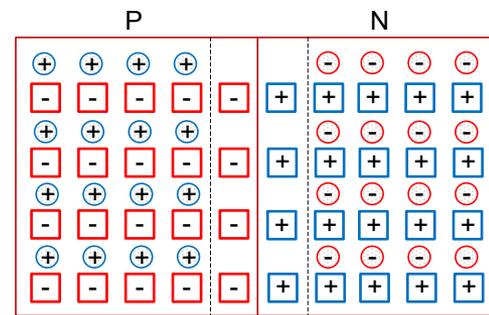
Si dopado n



Se unen



- ⊖ Electrones libres del átomo pentavalente en la capa de conducción
- ⊕ Hueco libre del átomo trivalente en la capa de valencia



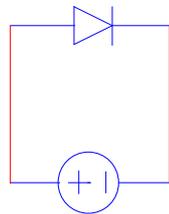
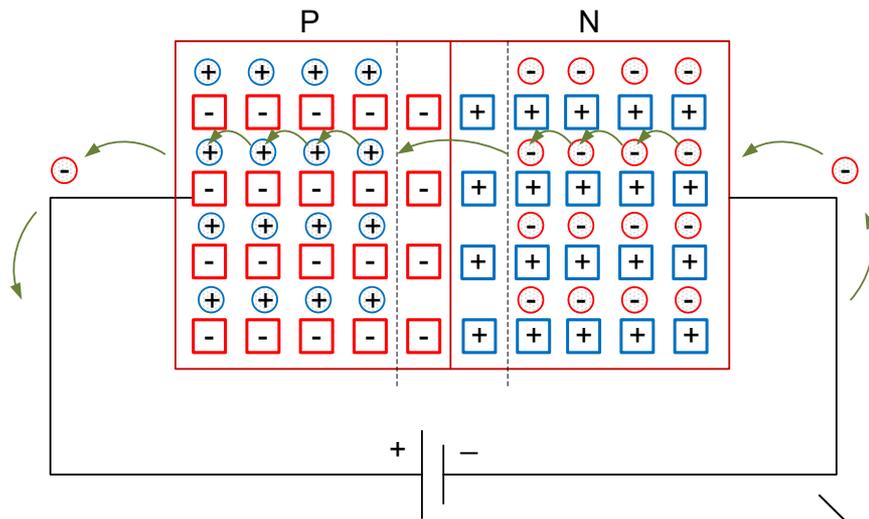
Región de carga espacial o agotamiento

- En las proximidades de la unión p-n **sólo quedan átomos de IMPUREZAS cargadas** (ya que dichos átomos NO son móviles), creando la denominada **Zona de Carga Espacial**

# El Diodo. Unión P-N. Semiconductores

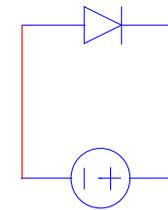
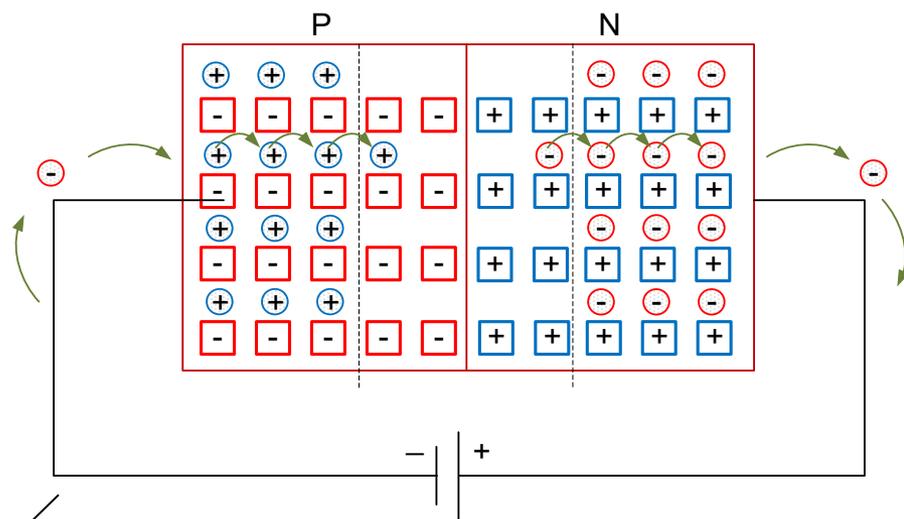
## Unión P-N con polarización externa

Polarización directa



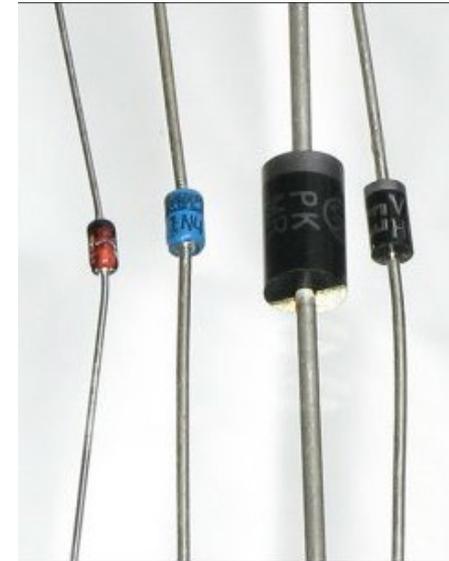
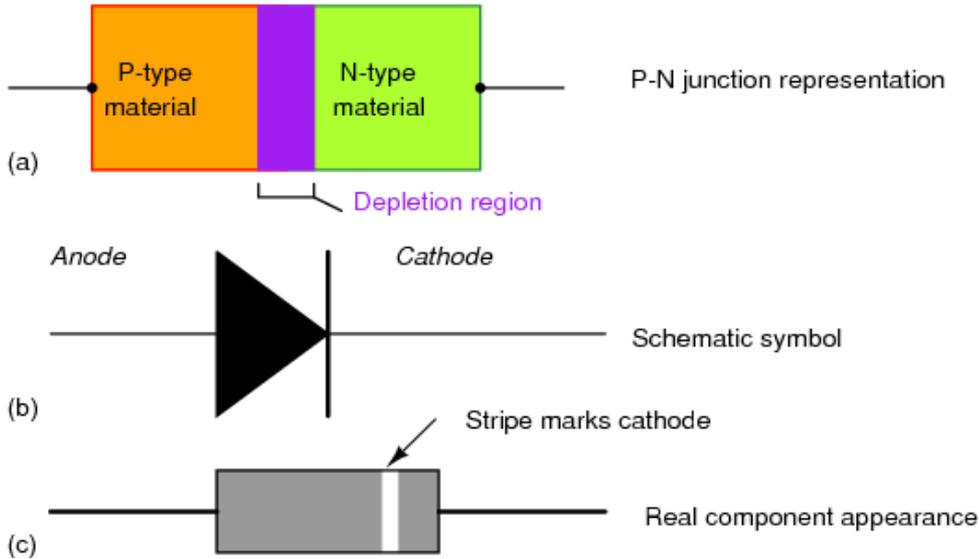
Corrientes de arrastre

Polarización inversa



$$I_D \approx 0$$

# Símbolo circuital del diodo. Encapsulados



# Característica I-V de la unión PN

$$i_D = I_S (e^{e \cdot V_D / \eta k T} - 1) = I_S (e^{V_D / \eta V_T} - 1)$$

$V_D$  voltaje aplicado al diodo

$i_D$  corriente del diodo

$I_S$  corriente inversa de saturación =

f(T, concentración de portadores, área de unión...)

$10^{-8}$ - $10^{-14}$ : dispositivos discretos de Si;

$10^{-16}$ : en un diodo de C.I.

$\eta$  coeficiente de emisión

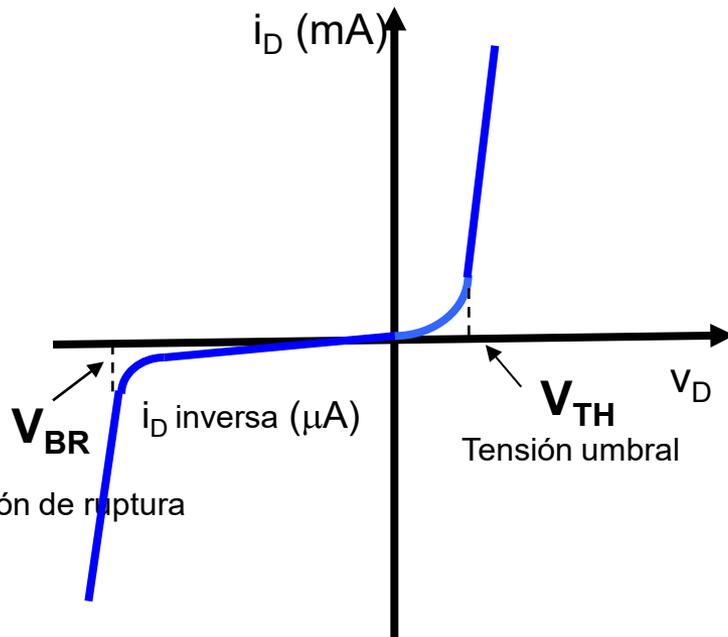
1 (C.I o diodos discretos que operan con más de 10mA)

2 (diodos discretos de Si que operan hasta 10mA)

$V_T = kT/q$  ( $V_T$  tensión térmica, **25,9 mV a 300K**: K cte de Boltzmann, T temperatura, q carga del electrón)

$V_{TH}$  voltaje umbral (**0,6 - 0,8V** para diodos de Si; **0,2 - 0,3V** para diodos de Ge; **0,9 - 1,1V** en GaAs)

$V_{BR}$  voltaje o tensión de ruptura (breakdown), a la que aparece una corriente muy elevada en polarización inversa (**-50V** para diodos convencionales de Si).



# Modelos circuitales del diodo

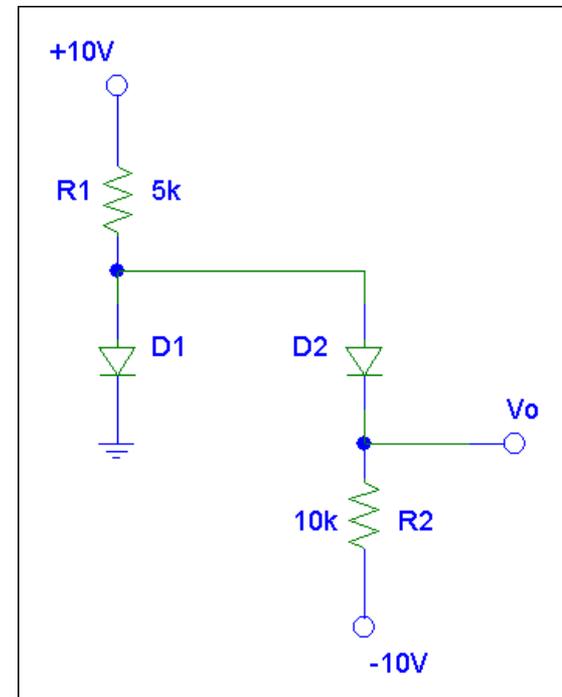
- Cuando se construyen circuitos complejos con diodos, **el cálculo de las tensiones y corrientes en el circuito utilizando la característica I-V del diodo anterior** sólo se puede realizar de manera **numérica** (simulación mediante computador, herramientas de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales...)

$$i_D = I_S (e^{eV_D/\eta kT} - 1) = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1)$$



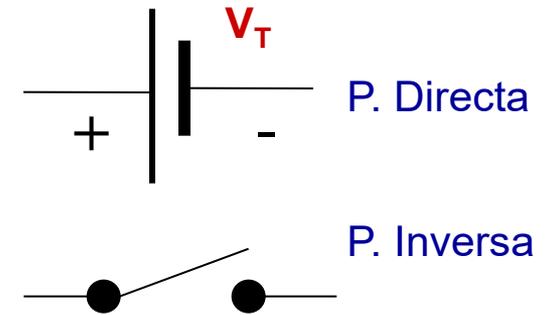
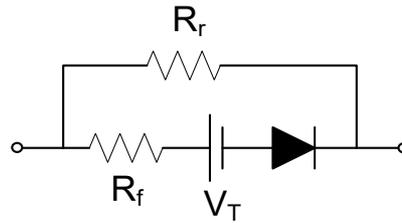
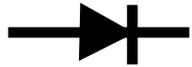
$$V_D = \eta V_T \ln\left(\frac{i_D}{I_S} + 1\right)$$

- Por ello, se recurre a **modelos simplificados (llamados modelos circuitales)** del diodo que permitan el análisis y resolución de circuitos de una manera aproximada.



# Modelos circuitales del diodo

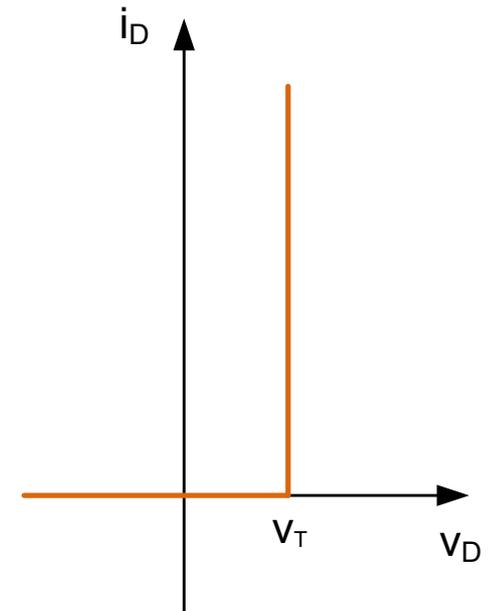
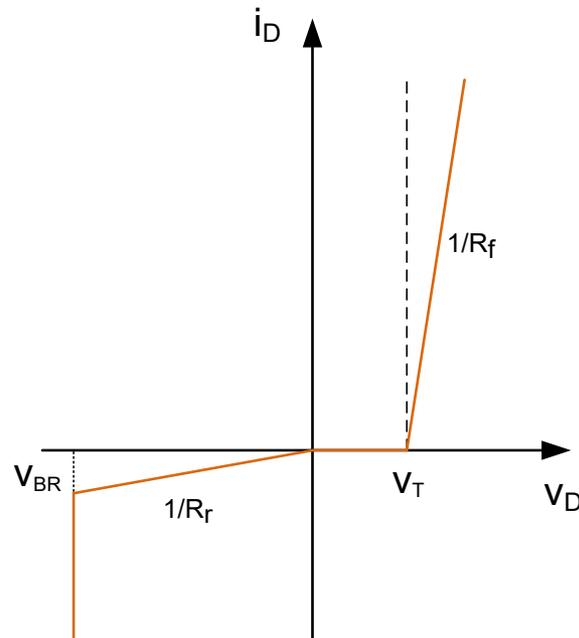
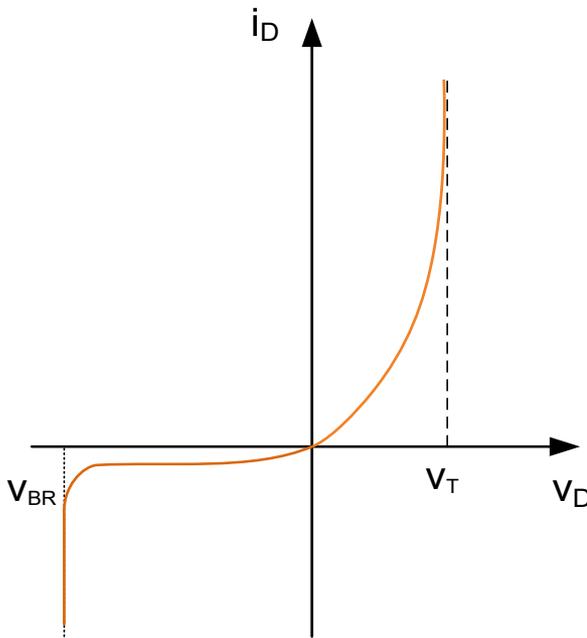
Modelo



Curva I-V real

Curva I-V aproximada

Curva I-V ideal



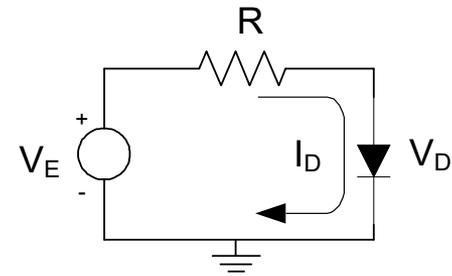
## ¿Cómo analizar circuitos con diodos?

1. No se puede aplicar superposición con elementos no lineales (diodo).
2. No se puede aplicar Thèvenin en un circuito con elementos no lineales.
3. Existen diferentes formas para resolver circuitos con diodos:
  - i. Desconectar el elemento no lineal (diodo) y aplicar Thevenin/Norton del resto del circuito.
  - ii. Resolución gráfica: Superponer la característica I-V del diodo a la recta de carga del circuito.
  - iii. Suponiendo el estado de cada diodo y aplicando las leyes de Kirchhoff. Verificar si hay contradicciones.

## Recta de carga

- Vamos a analizar el circuito más sencillo: una resistencia  $R$ , un diodo y una fuente de tensión continua  $V_{DD}$ . *¿Cuánto vale la corriente del circuito y las tensiones en cada elemento?*

Ambos elementos están en serie, luego la corriente ( $I$ ) del circuito es la misma en el diodo y en la resistencia:  $I = I_R = I_D$ .



- ✓ Si aplicamos la ley de mallas de Kirchhoff, sustituimos en ella la ley de Ohm (tensión en la resistencia) y despejamos el valor de la corriente:

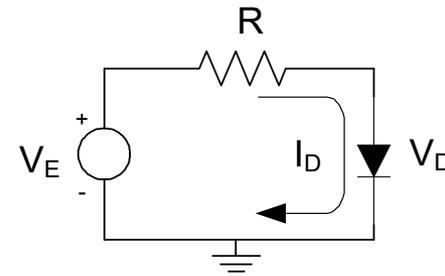
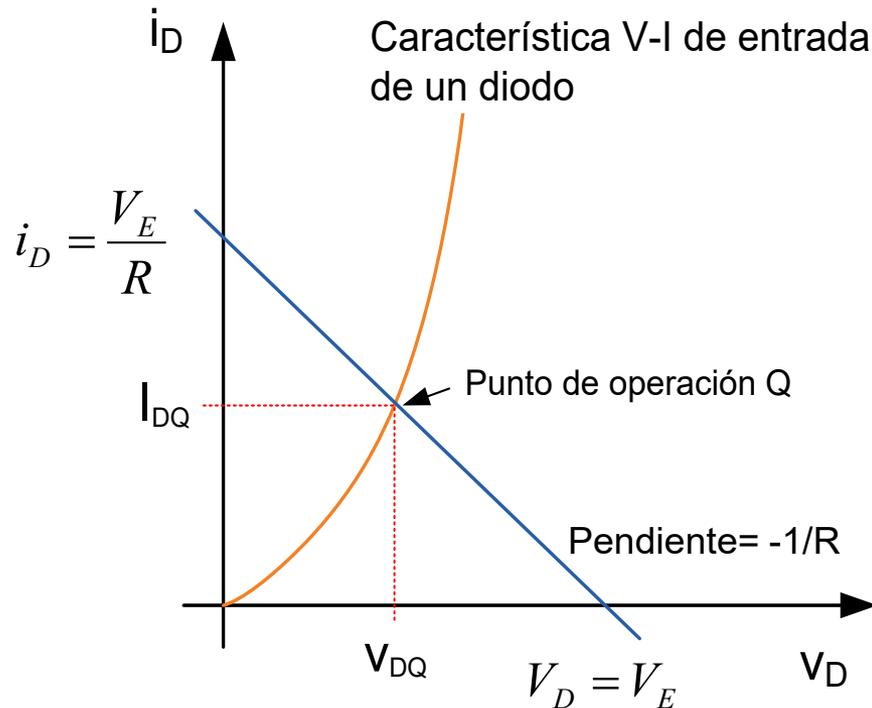
$$V_E = V_R + V_D = I_D \cdot R + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_E - V_D}{R}$$

A esta ecuación se le denomina **RECTA DE CARGA**

- ✓ La **recta de carga del circuito lineal** determina todos los puntos de operación permitidos de dicho dispositivo en el circuito en que se halla.

# Punto de trabajo (Q) del diodo

**Punto de trabajo Q = (V<sub>DQ</sub>, I<sub>DQ</sub>):** es la intersección de la recta de carga con la curva característica del componente



$$V_E = i_D \cdot R + V_D \quad \Rightarrow \quad \frac{V_E - V_D}{R} = I_D;$$

- La recta de carga se dibuja hallando los cortes con los ejes:

$$V_D = 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = \frac{V_E}{R}$$

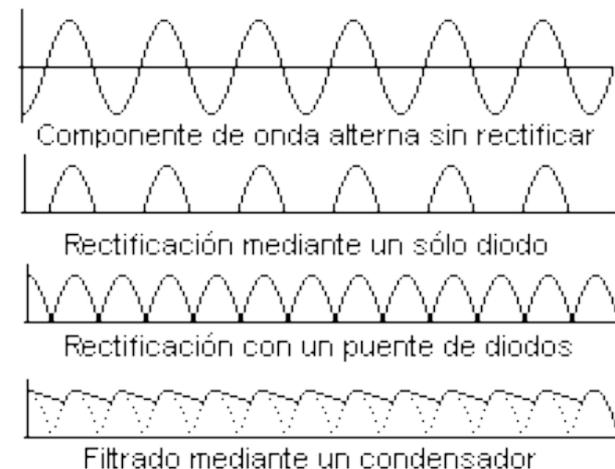
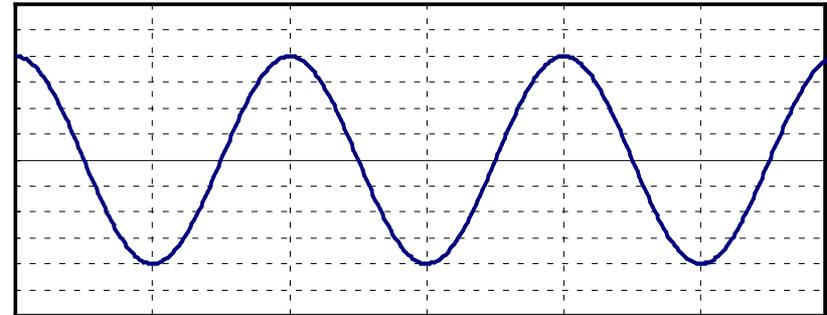
$$i_D = 0 \quad \Rightarrow \quad V_D = V_E$$

## ¿Cómo analizar circuitos suponiendo el estado de los diodos?

1. Suponer razonadamente el estado de cada diodo (**directa o inversa**).
2. Dibujar el esquema del circuito sustituyendo los diodos por el modelo circuital elegido en función de su estado:
  - i. **Diodos en directa (conducción)  $\Rightarrow$  modelo circuital.**
  - ii. **Diodos en inversa (corte)  $\Rightarrow$  interruptor abierto.**
3. Determinar las corrientes y tensiones en todo el circuito mediante las leyes de Kirchhoff.
4. Comprobar si existen contradicciones con las suposiciones hechas para cada diodo. Habrá contradicción si:
  - i. **Por el cortocircuito pasa una corriente negativa**
  - ii. **En el circuito abierto aparece una tensión positiva.**
5. Si hay alguna contradicción modificar las hipótesis del punto 1. Si no hay contradicciones, los valores de tensión y corriente calculados se aproximarán bastante a los reales.

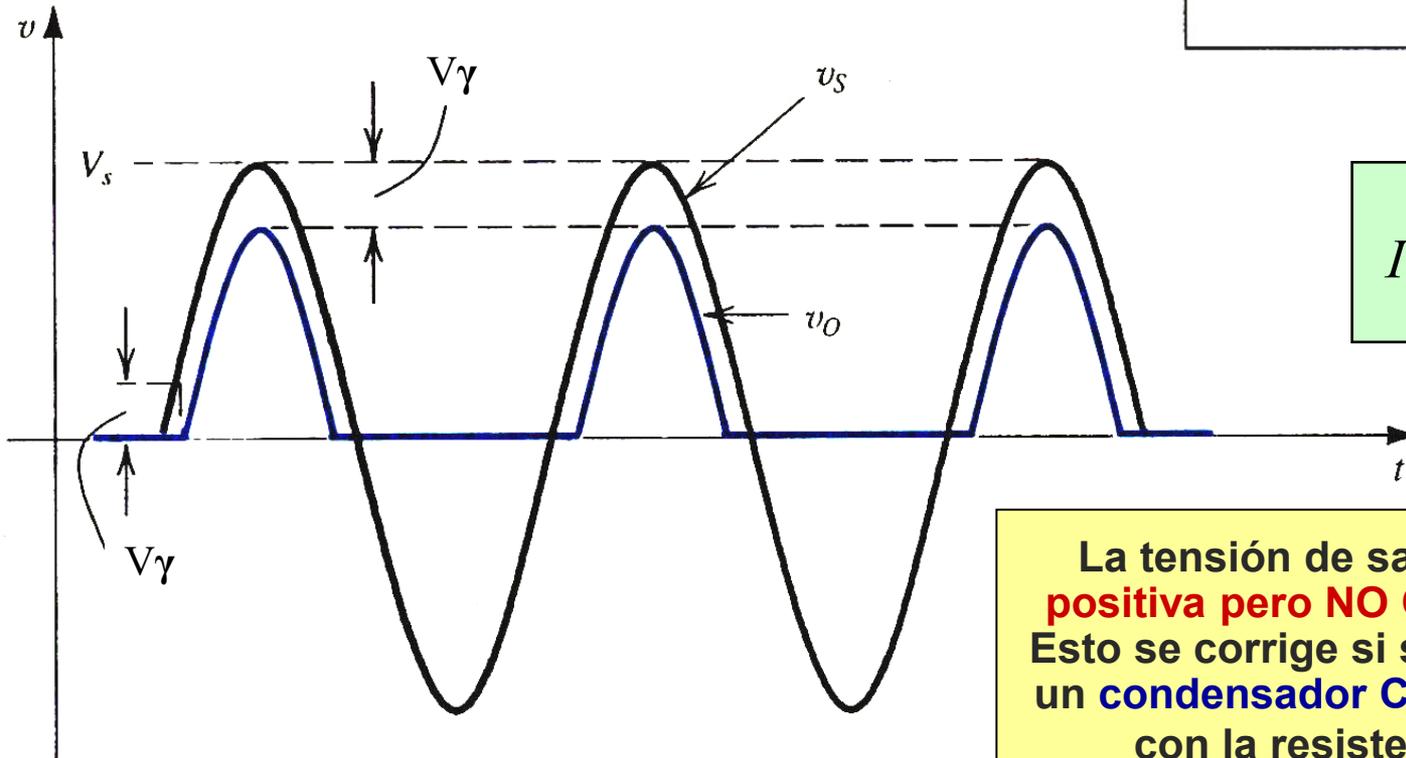
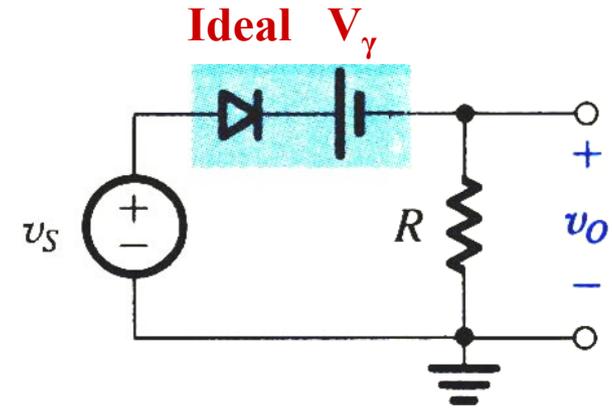
# Circuitos con diodos: Rectificadores

- Un **circuito rectificador ideal** convierte una **tensión alterna** (generalmente sinusoidal) en una **tensión continua**.
- En la práctica, los rectificadores **no son circuitos ideales**, por lo que la tensión continua de salida suele presentar **pequeñas variaciones y no ser perfectamente continua**.
- Los circuitos rectificadores más utilizados son **circuitos con diodos**, entre los que destacan:
  - Rectificador de **media onda**
  - Rectificador de **onda completa con puente de diodos**



# Rectificador de media onda

- El diodo del circuito conducirá sólo si la tensión  $v_s$  supera el voltaje de codo. Por ello  $v_0 = v_s - V_\gamma$  (semiciclos positivos, cuando  $v_s > V_\gamma$ ), y  $v_0 = 0$  (semiciclos negativos, cuando  $v_s < V_\gamma$ ):

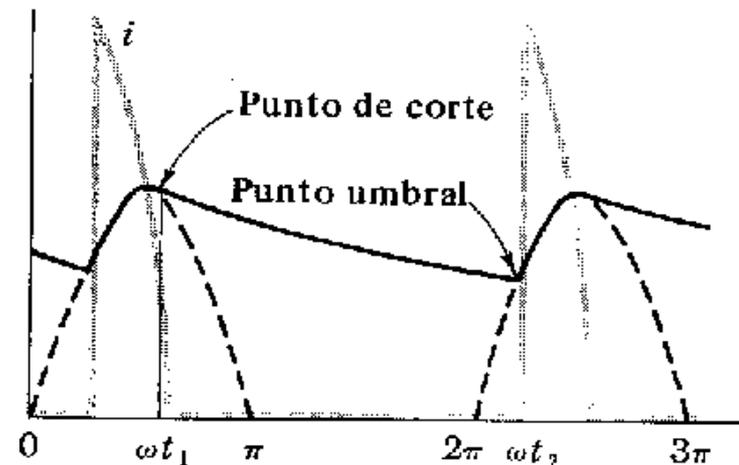
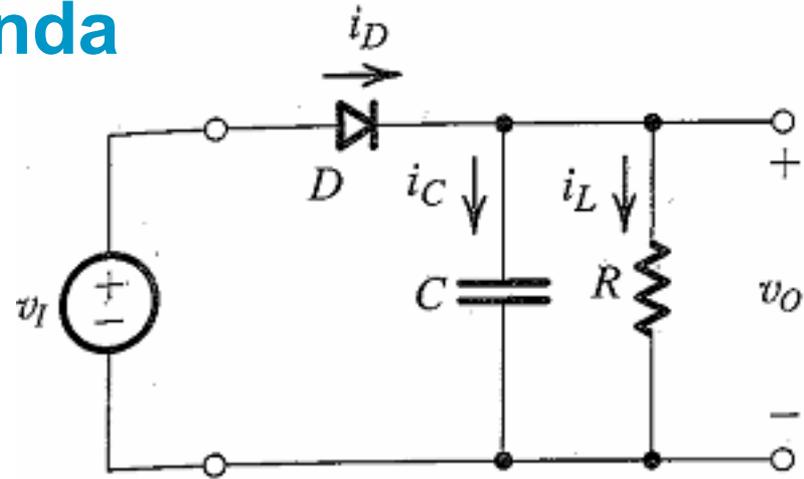


$$I = \frac{v_s - V_\gamma}{R}$$

La tensión de salida  $v_0$  es **positiva pero NO CONTINUA**. Esto se corrige si se introduce un **condensador C** en paralelo con la resistencia R.

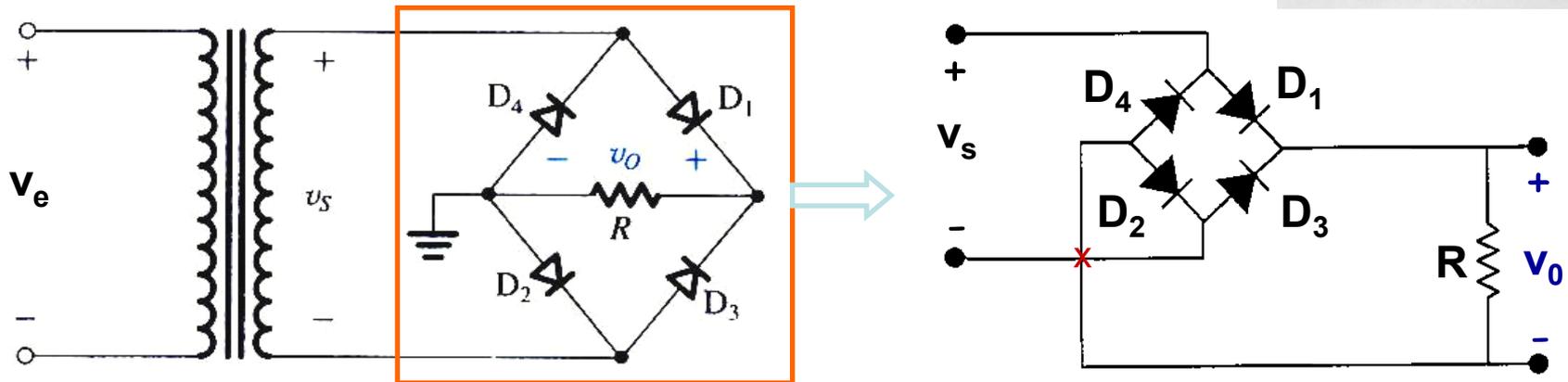
# Rectificador de media onda

- Cuando el diodo conduce, el condensador **almacena carga eléctrica**.
- Cuando el diodo se corta (interruptor abierto), el condensador se **descarga poco a poco** a través de la resistencia  $R$ .
- En el siguiente ciclo el diodo **vuelve a conducir** y el condensador **recupera la carga** perdida mientras el diodo estaba en corte.
- Si la capacidad del condensador  $C$ , la resistencia  $R$  o ambos son de valor elevado, la tensión de salida apenas disminuye en el tiempo.
- Por ello, para reducir el **rizado** de la tensión de salida, en la práctica se utilizan **valores elevados de  $C$** .



# Rectificador de onda completa con puente

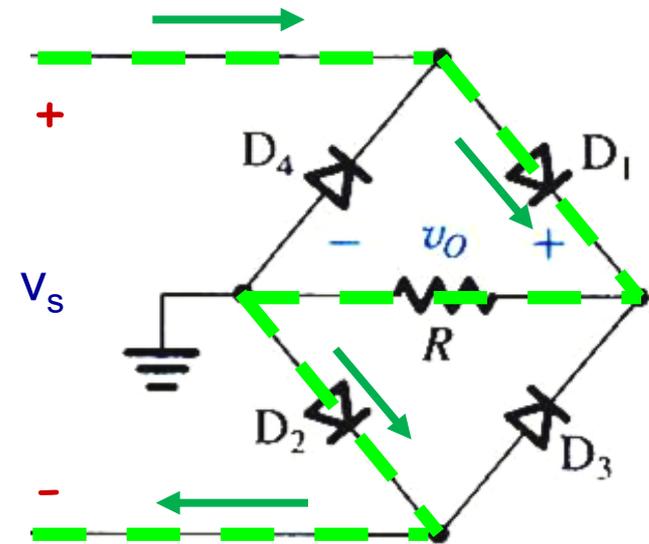
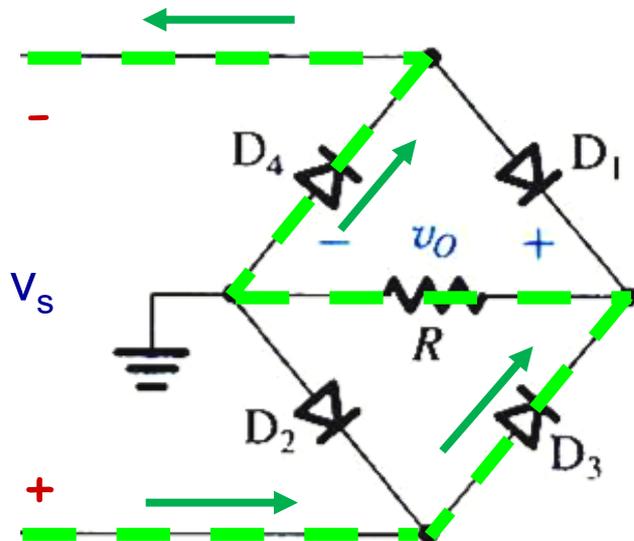
- El **circuito rectificador de media onda** es el más sencillo, pero **no se aprovecha el semiciclo negativo** de la tensión alterna sinusoidal. Para transformar a tensión continua **ambos ciclos de la tensión alterna sinusoidal de entrada**, se utilizan **circuitos rectificadores de onda completa**.
- Uno de los circuitos más utilizados consta de cuatro diodos y se conoce como **PUENTE de diodos**. Disponible comercialmente.



- ✓ En el puente de diodos, siempre hay **DOS diodos que conducen simultáneamente**: en el semiciclo **positivo** de  $v_s$  conducen  $D_1$  y  $D_2$ , en el semiciclo **negativo** lo hacen  $D_3$  y  $D_4$

# Rectificador de onda completa con puente

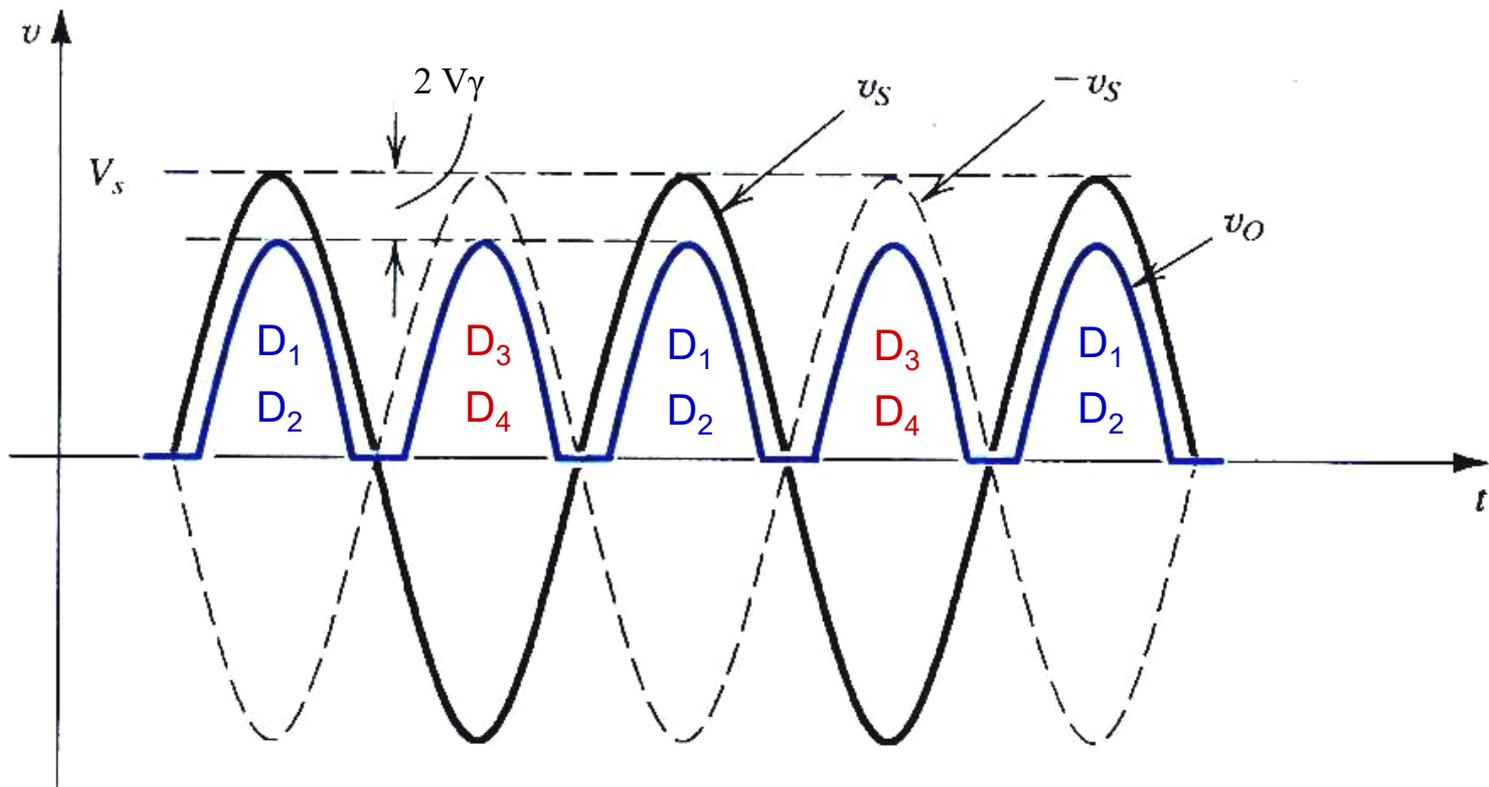
- En el **semiciclo positivo** de  $v_s$ :
  - La corriente pasa por  $D_1$ , luego por la resistencia  $R$  y por último por  $D_2$ .
  - $D_3$  y  $D_4$  se encuentran en inversa (corte).



- En el **semiciclo negativo** de  $v_s$ :
  - La corriente pasa por  $D_3$ , luego por la resistencia  $R$  y por último por  $D_4$ .
  - $D_1$  y  $D_2$  se encuentran en inversa (corte).

# Rectificador de onda completa con puente

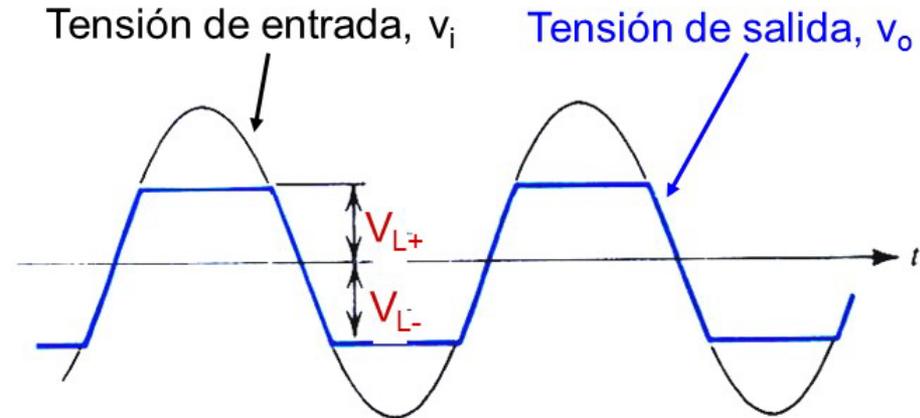
- Dado que siempre hay **dos diodos conduciendo**, la tensión de salida del transformador debe superar el doble de la tensión de codo para que exista conducción:



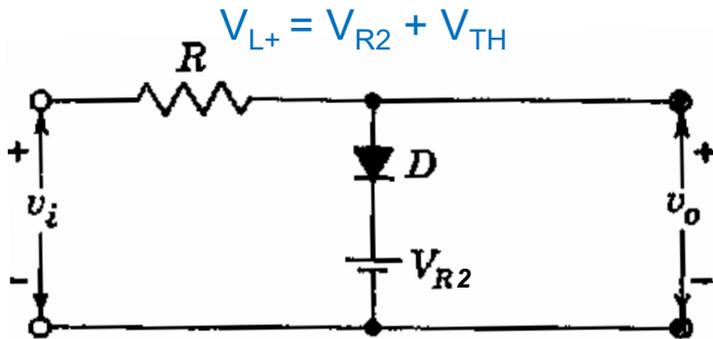
- ✓ Como en los circuitos rectificadores anteriores, un **condensador C conectado en paralelo con la resistencia R** permite reducir el rizado de la tensión de salida  $v_o$ .

# Circuito recortador o limitador

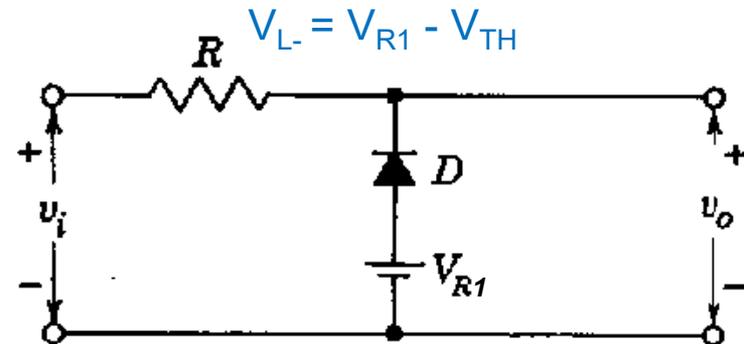
- ✓ Un **circuito recortador** (limitador, o selector) de tensión permite **eliminar** en la tensión de salida  $v_o$  una parte de la tensión de entrada  $v_i$  que supere un cierto intervalo de voltaje.



Recortador a un nivel superior

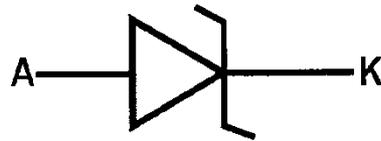
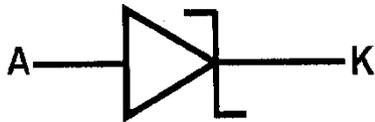


Recortador a un nivel inferior



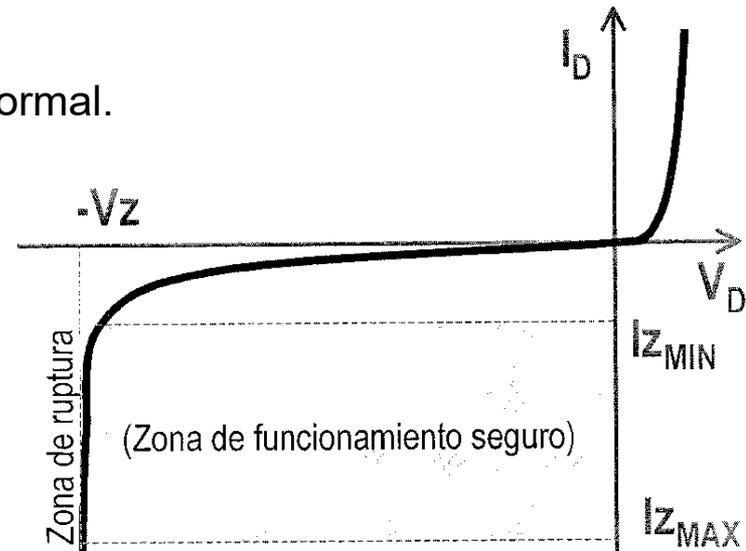
## Otros diodos: el diodo Zener

- Los **símbolos circuitales** del diodo Zener son los siguientes:



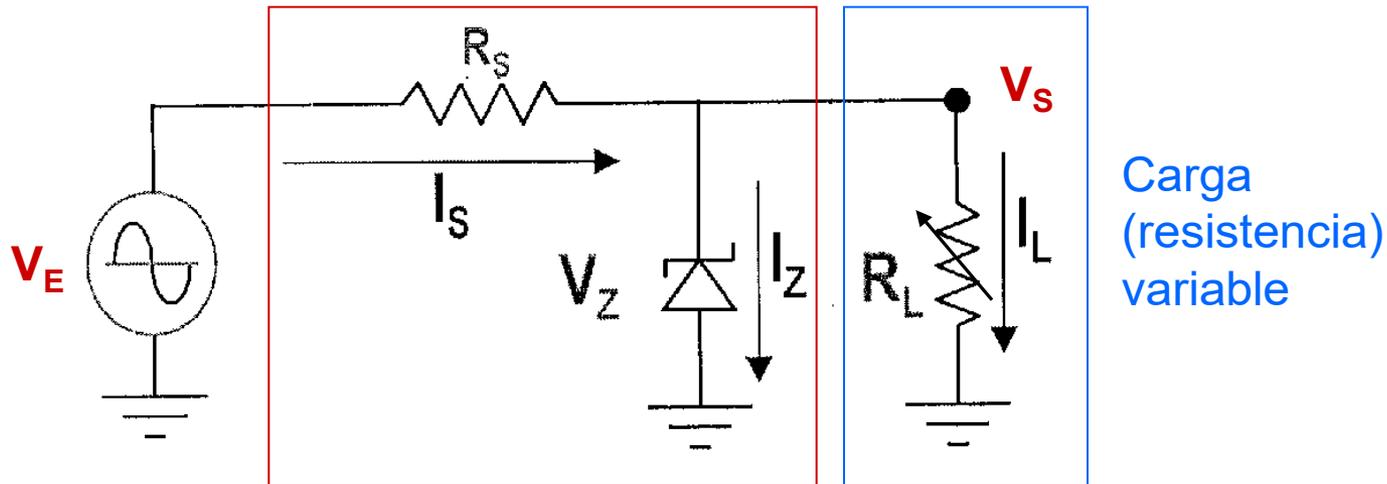
- ✓ La curva característica del diodo Zener es la siguiente:

- En directa funciona como un diodo normal.
- $V_z$  es la **tensión Zener**.
- $I_{z_{MIN}}$  es la **corriente mínima** necesaria para entrar en la zona de ruptura Zener.
- $I_{z_{MAX}}$  es la **mayor corriente en ruptura soportada** (dada por la potencia máxima)



# Circuito regulador de tensión con diodo Zener

- ✓ La aplicación más importante de los diodos Zener tiene que ver con circuitos donde se necesite una tensión **muy constante y estable**: **circuitos reguladores de tensión**.

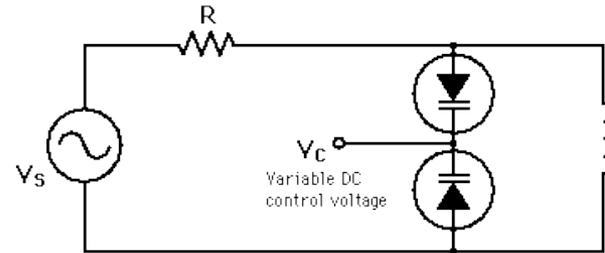


Circuito regulador Zener

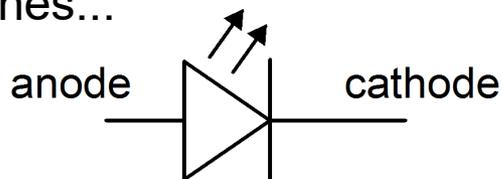
- Si en el circuito anterior se hace circular por el diodo Zener una corriente en inversa entre  $I_{Z_{MIN}}$  e  $I_{Z_{MAX}}$ , la tensión de salida  $V_S$  será fija y de valor  $V_Z$ . De esta manera, aunque varíe el valor de la resistencia  $R_L$ , ésta siempre estará sometida a la misma tensión ( $V_S = V_Z$ )

## Otros diodos

**Diodo varicap o varactor:** La unión P-N de un diodo polarizado en inversa se comporta como un **condensador de capacidad variable**: a mayor tensión inversa disminuye la capacidad de la unión. Útil en circuitos de sintonizado RLC, para modificar la frecuencia de resonancia con la tensión aplicada.

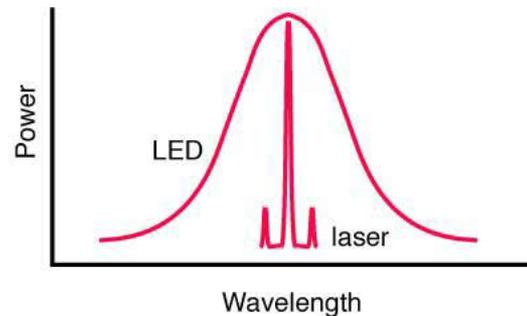
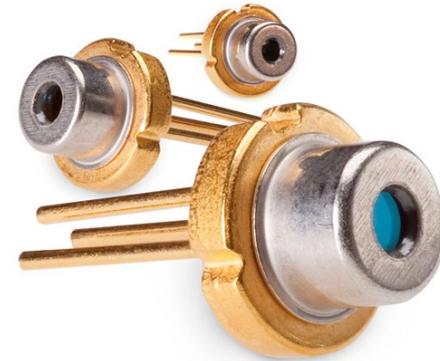
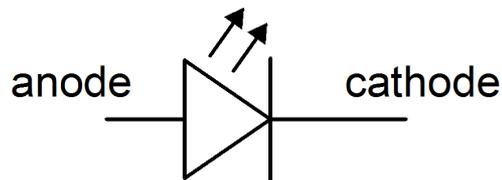


**Diodo LED (*Light Emitting Diode*):** diodo que **emiten luz** al paso de la corriente. Existen LED de distintas longitudes de onda (**desde el infrarrojo al ultravioleta**) en función del semiconductor en el que esté fabricado. Usados en indicadores, pantallas, comunicaciones...



## Otros diodos

**Diodo Láser** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la **emisión inducida o estimulada**, para generar un haz de luz coherente espacialmente (haz colimado) y temporalmente (monocromático). Usados en lectores de CD, DVD, comunicaciones ópticas, impresoras láser...

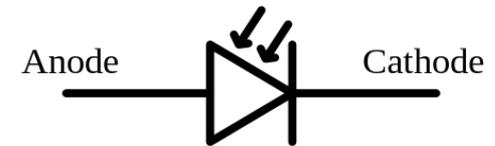


## Otros diodos

**Célula fotovoltaica (célula solar):** Unión p-n que cuando absorbe radiación luminosa produce una tensión y corriente eléctrica (fotocorriente) por **efecto fotovoltaico**. Su objetivo es producir energía eléctrica, luego suelen ser de área elevada.



**Fotodiodo:** Funciona también por efecto fotovoltaico, pero no se utiliza para producir energía eléctrica sino como **sensor de luz**, por lo que suele ser de tamaño más reducido. Se polariza en inversa, produciendo una fotocorriente proporcional a la radiación incidente. Se usa en comunicaciones ópticas.



Los **fototransistores** además **amplifican esa corriente**, ganando sensibilidad.



**Optoacoplador u optoaislador:** La combinación de un diodo LED y un fototransistor en un circuito integrado, que permite **aislar eléctricamente una señal**.

## Tema 4. Transistor

# Índice

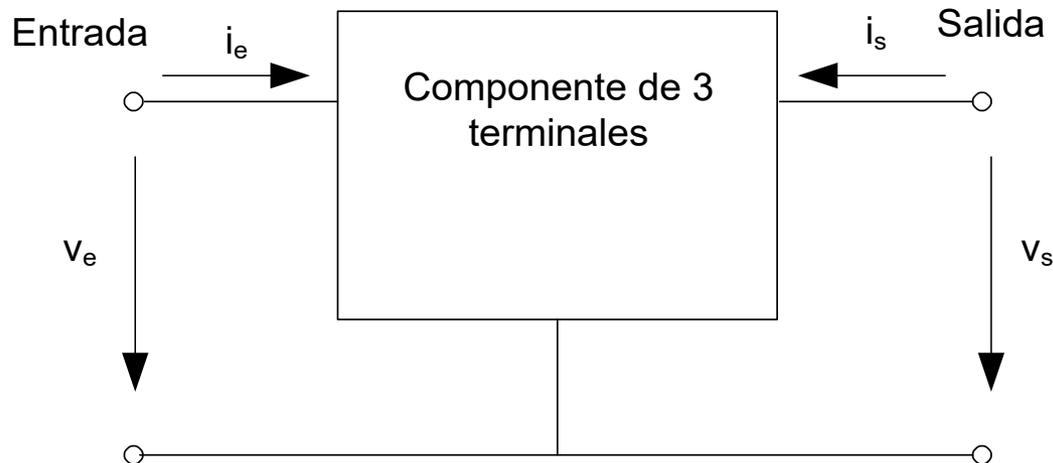
Transistor Bipolar. BJT.

Transistor de efecto campo. FET.

- Electronics. A System Approach. Neil Storey. Pearson- Prentice Hall. 4ª edición.
- Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos. Mark N. Horenstein. Ed. Prentice Hall
- Microelectrónica. Jacob Millman, Arvin Grabel. McGraw Hill.
- The Art of Electronics. Paul Horowitz. Cambridge University Press.

# Transistores

- Es un componente de 3 terminales con 3 pares de posibles curvas características I-V. Dos de ellas son suficientes para definir el componente.
- Esas dos curvas características son la curva I-V de entrada y la curva I-V de salida. La curva característica I-V de salida es un conjunto de curvas en función de uno de los parámetros de entrada.

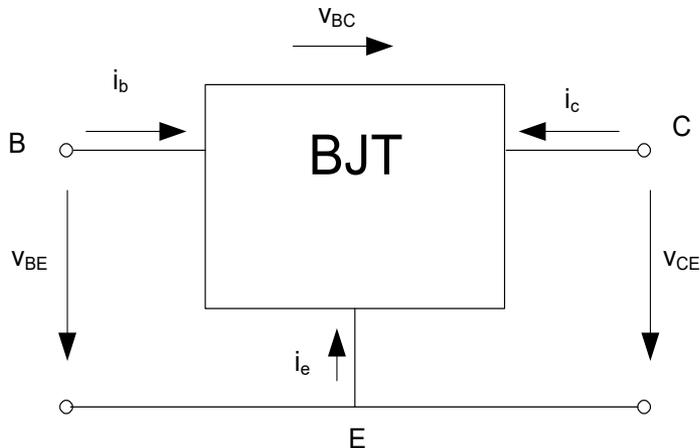


# Transistores

## Componentes de 3 terminales:

**BJT (Transistor Bipolar de Unión):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por corriente (entrada).  
 Ganancia de corriente ( $\beta$  ó  $h_{FE}/h_{fe}$ ).

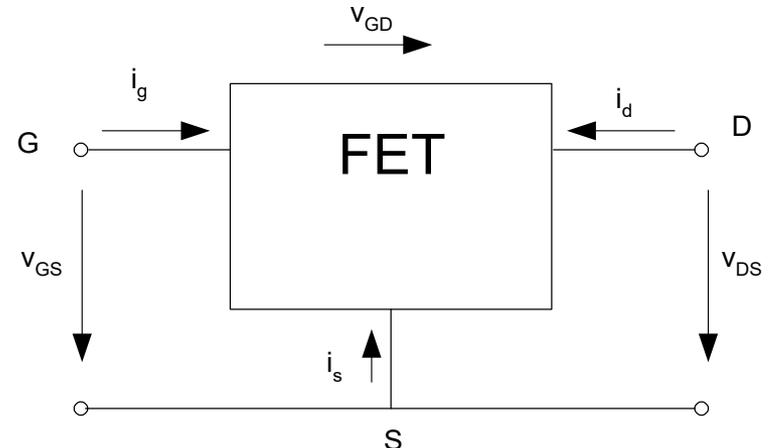
Terminales: Base, Emisor y Colector.



J. Bardeen, W.H. Brattain, y W. Shockley, 1948

**FET (Transistor de Efecto Campo):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por tensión (entrada).  
 Transconductancia ( $g_m$ ).

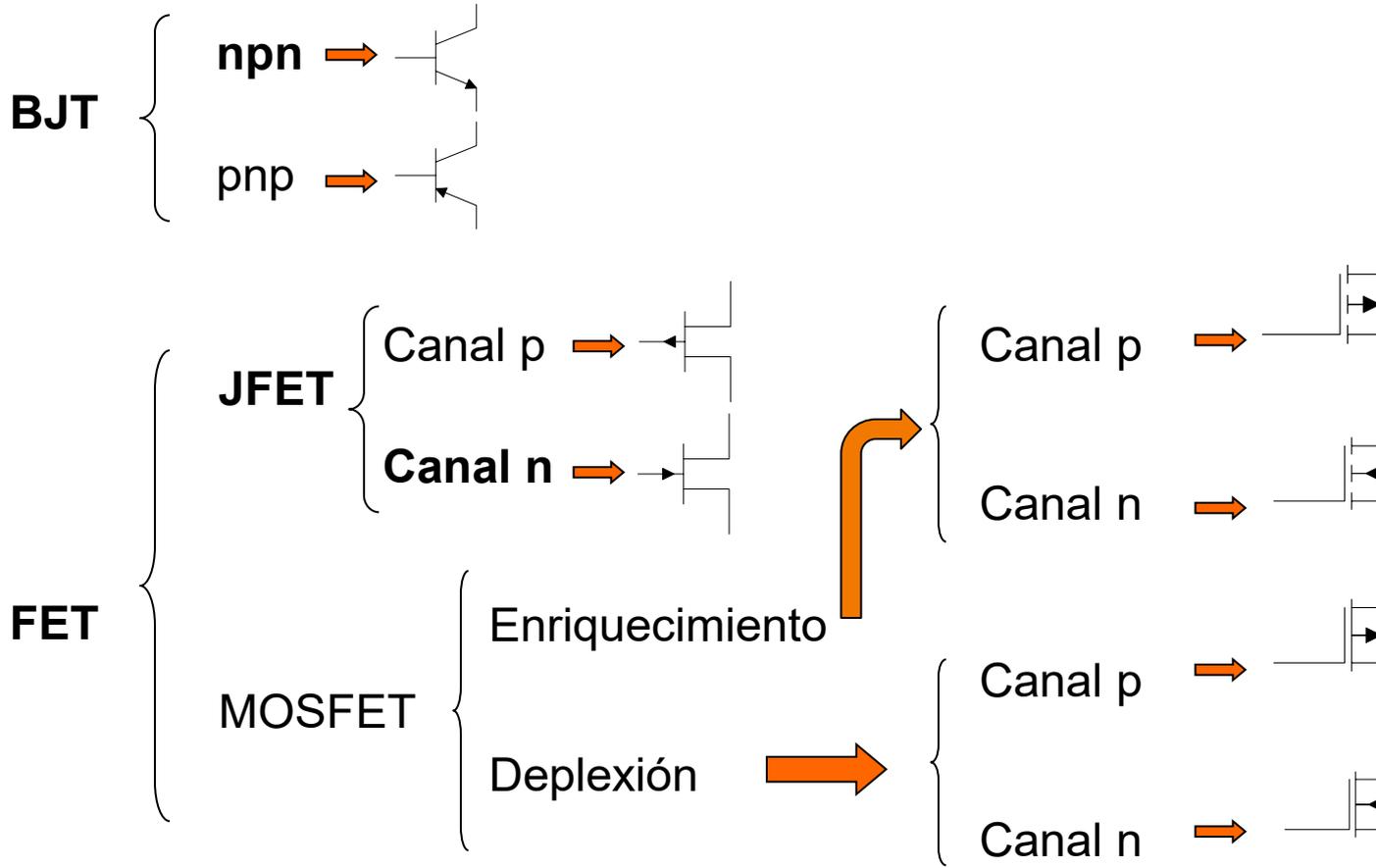
Terminales: Puerta, Drenador y Fuente.



W. Shockley, 1952

# Transistores

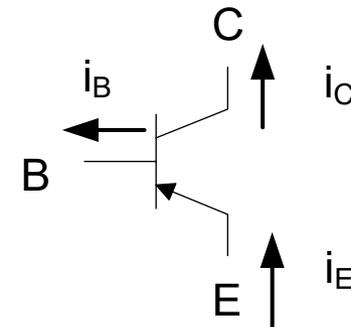
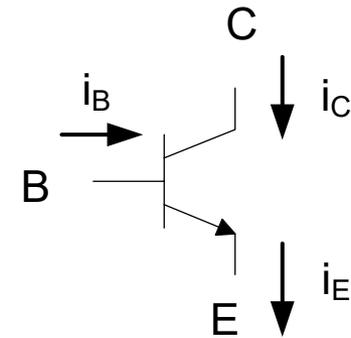
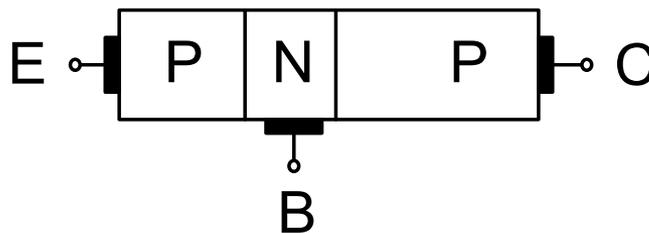
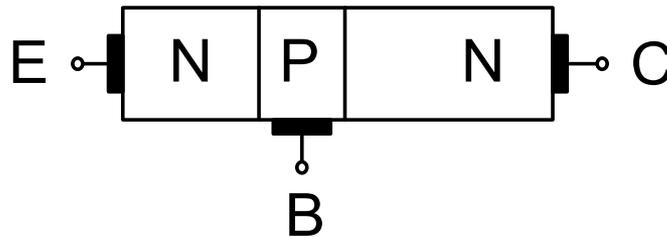
## Clasificación de los componentes de 3 terminales



# Transistor Bipolar. BJT.

## Estructura y símbolo del transistor. npn y pnp

Terminales: Base, Emisor y Colector. Componente asimétrico.



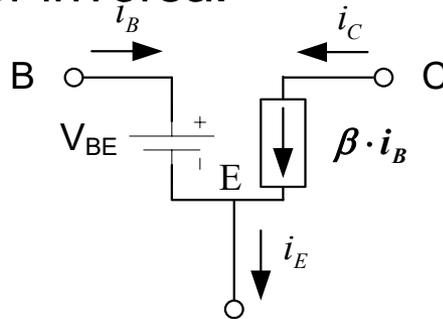
# Transistores bipolares. BJT.

## Zonas de funcionamiento

- Zona Activa:** Unión Base-Emisor polarizada directamente ( $V_{BE} > V_T$ ).  
 Unión Base-Colector inversa.

$$V_{BE} \approx 0,7$$

$$V_{BC} < 0.7$$



$$i_C = \beta \cdot i_B$$

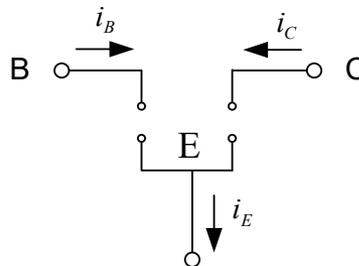
$$i_E = i_C + i_B$$

➔ Amplificación

- Zona de Corte:** Unión Base-Emisor y Base-Colector polarizada inversamente. No hay movimiento de electrones (sólo minoritarios)

$$V_{BE} < 0,7$$

$$V_{BC} < 0.7$$



$$i_C = 0$$

$$i_E = 0$$

➔ Interruptor abierto

# Transistores bipolares. BJT.

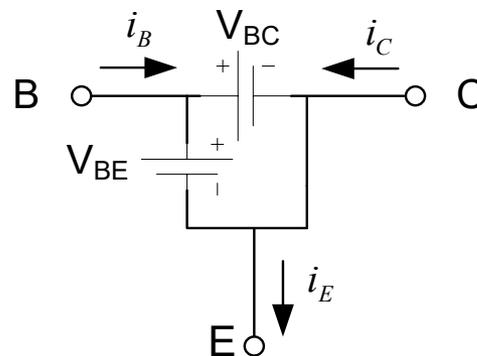
## Zonas de funcionamiento

✓ **Zona Saturación:** Unión Base-Emisor polarizada directamente ( $V_{BE} > V_T$ ). Unión Base-Colector polarizada directamente. La corriente de colector  $i_c$  depende del circuito externo.

$$V_{BE} > 0,7$$

$$V_{BC} > 0.7$$

$$V_{CE} \approx 0.2$$



$$I_C < \beta I_B$$

$$I_E \approx I_C \Rightarrow \text{Interruptor cerrado}$$

✓ **Zona de Transistor inverso:** Unión Base-Emisor polarizada inversamente. Base-Colector polarizada directamente. Es como la zona activa, pero sólo mueve los electrones de fugas, no los mayoritarios. Transistor “muy malo”.

# Transistores bipolares. BJT.

Zonas de funcionamiento. Tabla Resumen.

| Unión BE | Unión BC | Estado     |   |
|----------|----------|------------|---|
| Directa  | Inversa  | Activa     | $i_E = i_B + i_C; V_{BE} = 0,7V; i_C = \beta \cdot i_B$ |
| Directa  | Directa  | Saturación | $i_C < \beta \cdot i_B; V_{CE} \approx 0,2V$            |
| Inversa  | Inversa  | Corte      | $i_B = 0; i_C = 0$                                      |

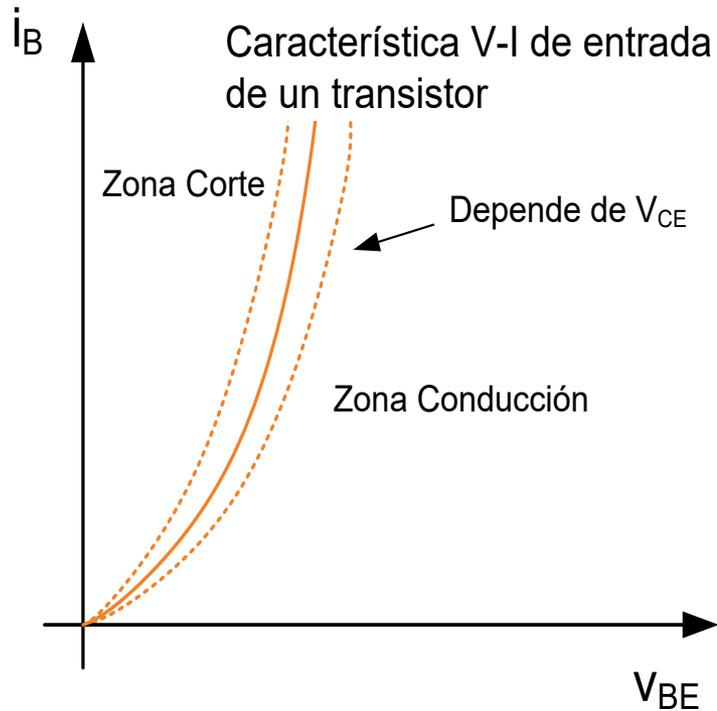
Z. Activa → Amplificación corriente → E. Analógica

Z. Corte - Z. Saturación → E. Digital

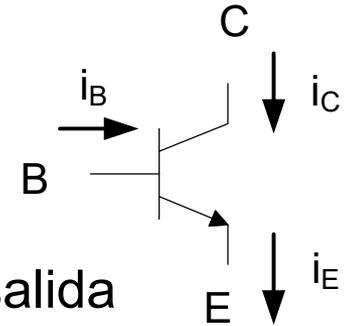
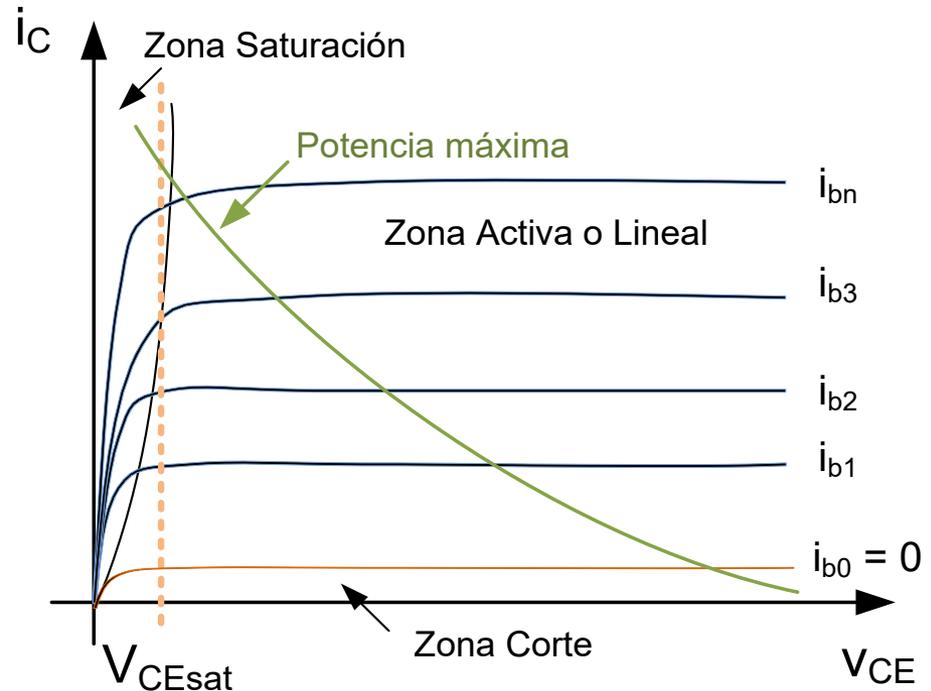
# Transistores bipolares. BJT.

## Curvas características

Característica I-V de entrada

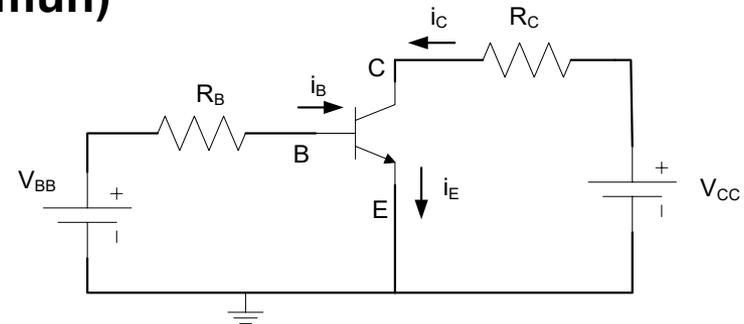
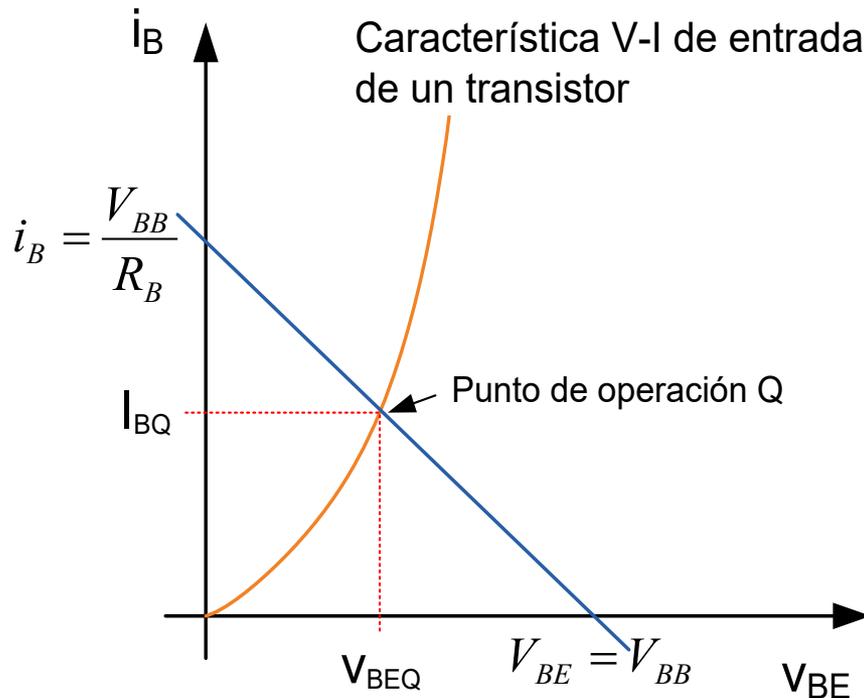


Característica I-V de salida



# Transistores bipolares. BJT.

## Polarización. Análisis en CC. (Emisor Común)



$$V_{BB} = i_B \cdot R_B + V_{BE}$$

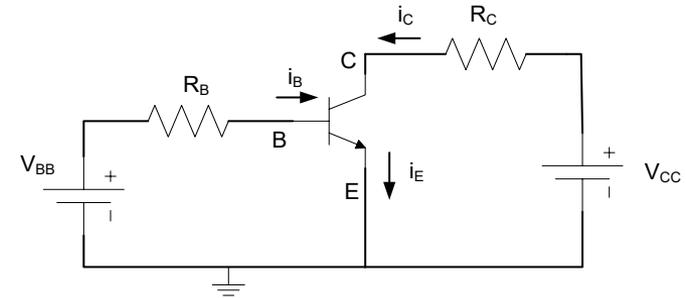
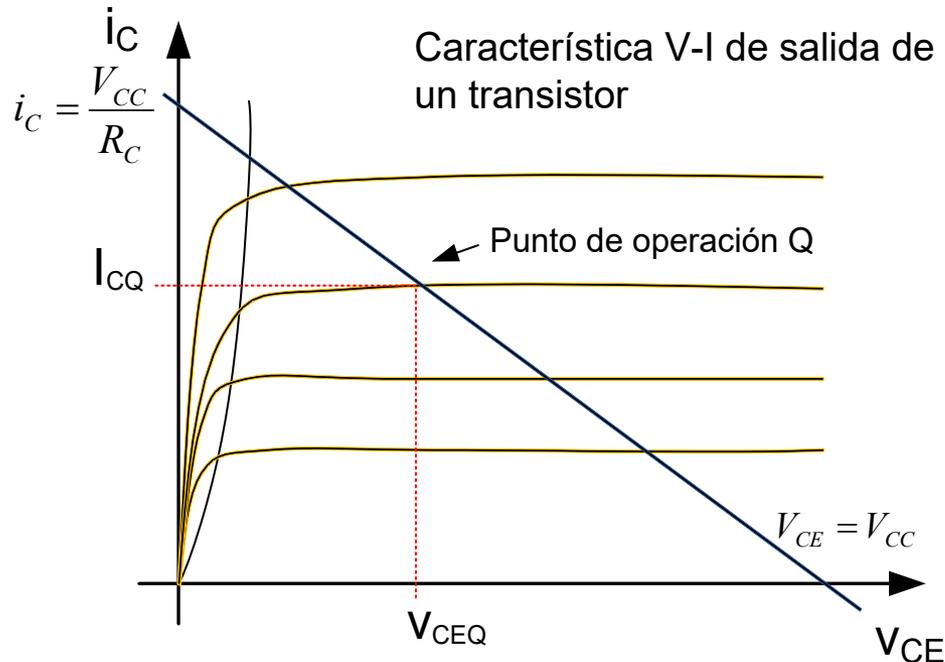
$$V_{BE} = 0 \Rightarrow i_B = \frac{V_{BB}}{R_B}$$

$$i_B = 0 \Rightarrow V_{BE} = V_{BB}$$

- Pto. De Operación. Intersección de la recta de carga con la curva característica de entrada.

# Transistores bipolares. BJT.

## Polarización. Análisis en CC. (Emisor Común)



$$V_{CC} = i_C \cdot R_C + V_{CE}$$

$$V_{CE} = 0 \rightarrow i_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

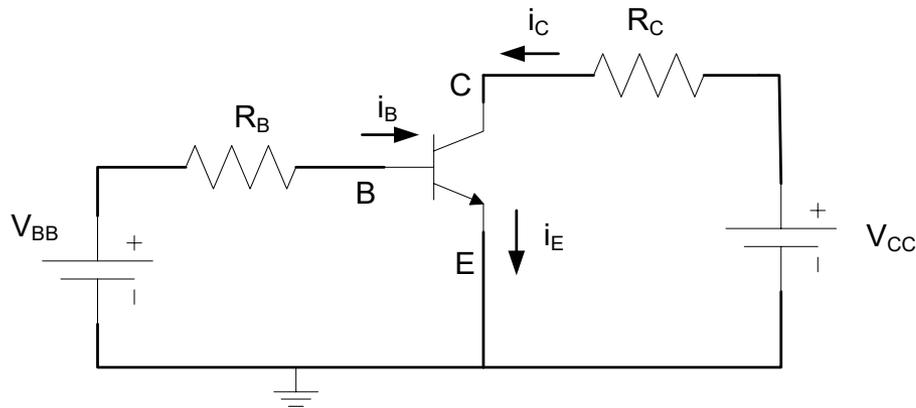
$$i_C = 0 \rightarrow V_{CE} = V_{CC}$$

- Pto. De Operación. Intersección de la recta de carga con la curva del valor de  $i_B$  dado por la característica de entrada.

# Transistores bipolares. BJT.

## Aplicaciones. Interruptor.

- Interruptor: Corte y Saturación. Inversores. Polarización de base.



$i_B = 0$ ;  $\Rightarrow$  Zona de Corte  $\Rightarrow (i_C = 0)$

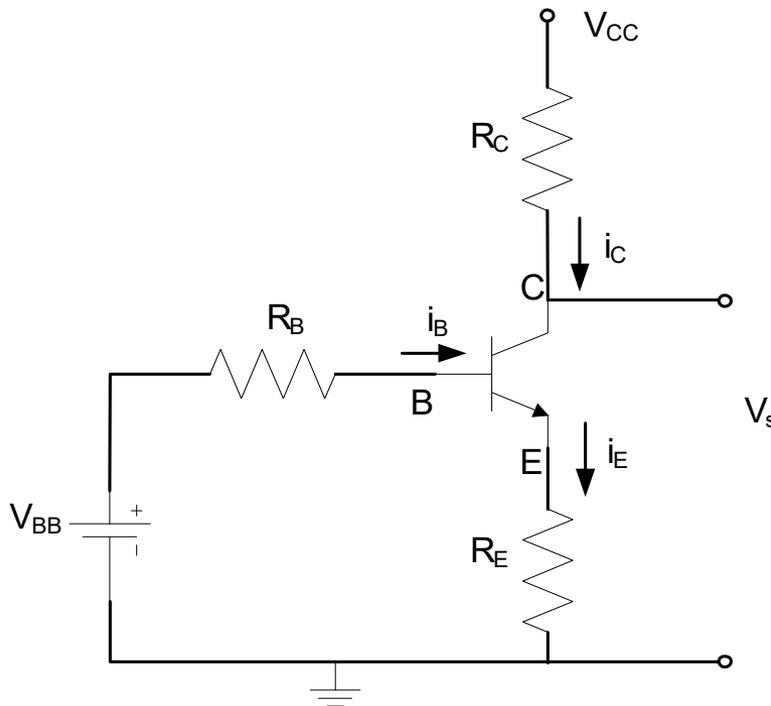
$V_{CE} \approx 0$ ;  $\Rightarrow$  Zona de Saturación  $\Rightarrow$

$$i_C = f(V_{CC}, R_C)$$

# Transistores bipolares. BJT.

## Aplicaciones. Amplificador.

- Emisor Común. Amplificador inversor de tensión. Polarización de emisor.



$$V_{BB} = i_B \cdot R_B + V_{BE} + i_E \cdot R_E$$

$$V_{CC} = i_C \cdot R_C + V_{CE} + i_E \cdot R_E$$

- Ganancia de tensión y corriente  $\beta$
- Alta impedancia de entrada y de salida
- Amplificación de tensión CA

# Transistores bipolares. BJT.

## Transistor BJT real

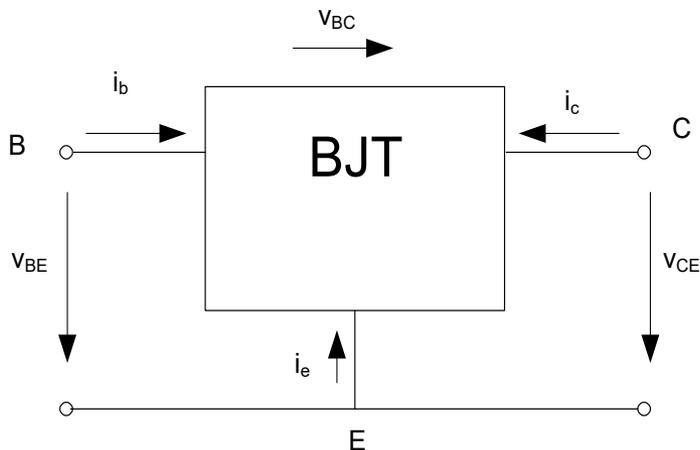
- Sus características varían con la temperatura.
- La  $\beta$  varía mucho de un transistor a otro aún dentro de la misma familia.
- La curva característica de salida no es plana en su Zona Lineal. No es totalmente lineal.
- La tensión máxima que soporta un transistor entre terminales es finita. Por encima de ellas se rompe el componente.
- La máxima corriente viene limitada por la capacidad de disipación de potencia del componente.
- La existencia de capacidades y resistencia parásitas hacen que la velocidad de respuesta del transistor sea limitada.

# Transistores

## Componentes de 3 terminales:

**BJT (Transistor Bipolar de Unión):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por corriente (entrada).  
 Ganancia de corriente ( $\beta$  ó  $h_{FE}/h_{fe}$ ).

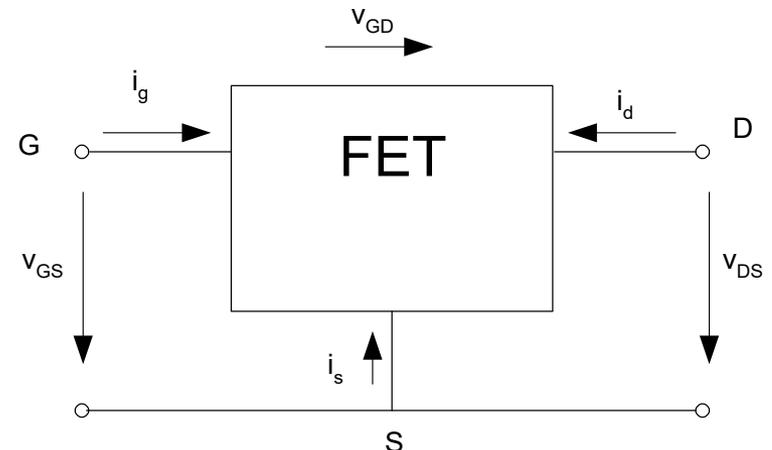
Terminales: Base, Emisor y  
 Colector.



J. Bardeen, W.H. Brattain, y W. Shockley, 1948

**FET (Transistor de Efecto Campo):**  
 Fuente de corriente (salida)  
 controlada por tensión (entrada).  
 Transconductancia ( $g_m$ ).

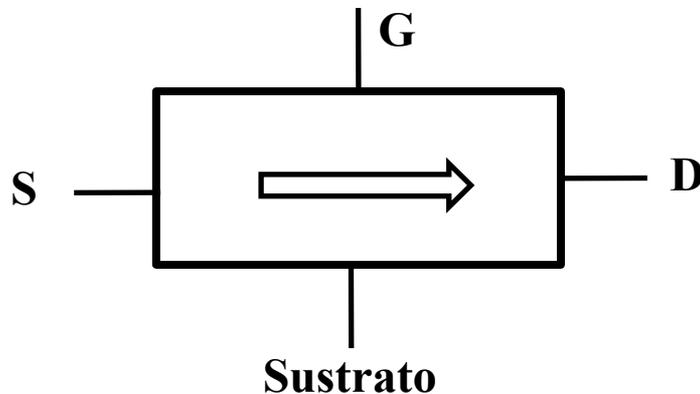
Terminales: Puerta, Drenador y  
 Fuente.



W. Shockley, 1952

# Transistores de efecto campo. Principio de funcionamiento (FET)

Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.



Se emplean en Electrónica Digital ya que alcanzan mayores velocidades de procesamiento.

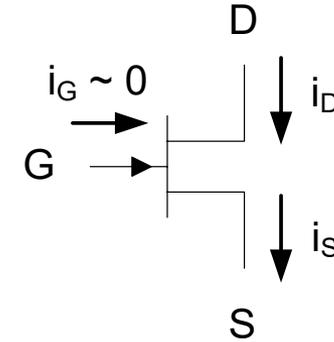
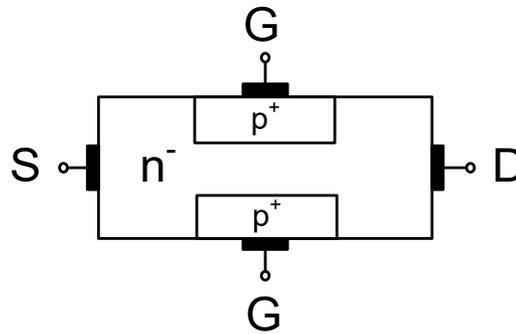
- Una tensión controla el flujo de portadores en un canal de conducción
- El canal de conducción unipolar (monopolar) regulado por la tensión en G.
- El canal puede engrosarse, adelgazarse o incluso desaparecer dependiendo de  $V_{GS}$
- **Resistencia de entrada infinita.**
- Semejanza entre las ecuaciones y curvas características de los FET.

# Transistores de efecto campo. JFET.

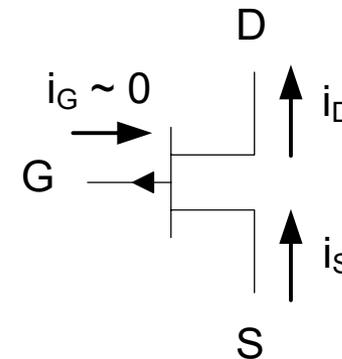
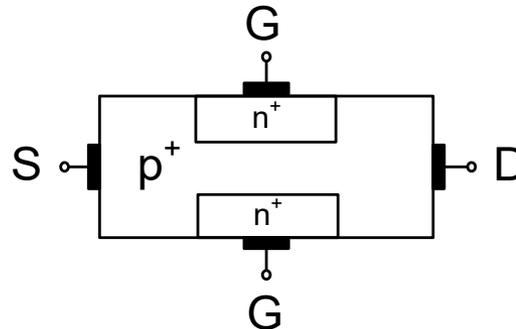
## Estructura y símbolo del transistor. Canal n y Canal p

Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.

Canal n



Canal p

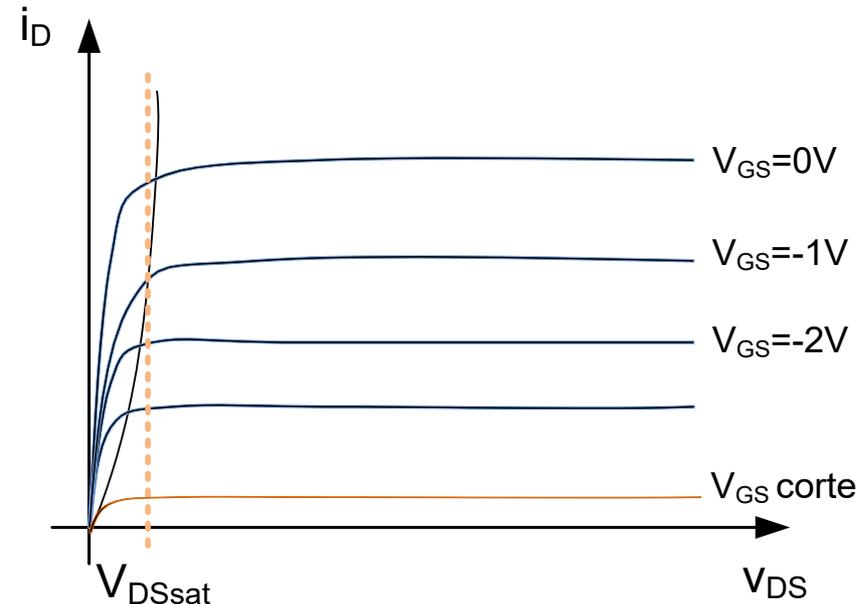
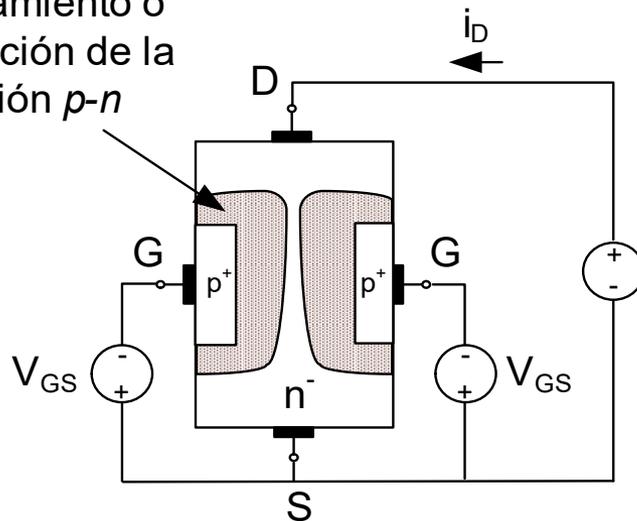


# Transistores de efecto campo. JFET.

## Efecto campo. *Canal n*

Tensión  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$  polarizado en inversa: Polarización p-n inversa y aparece una zona de transición. El canal de conducción se estrecha.  $i_D$  proporcional a  $V_{DS}$  hasta un valor máximo. Comportamiento no lineal.

Zona de agotamiento o transición de la unión p-n

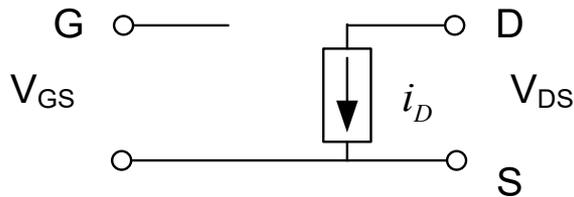
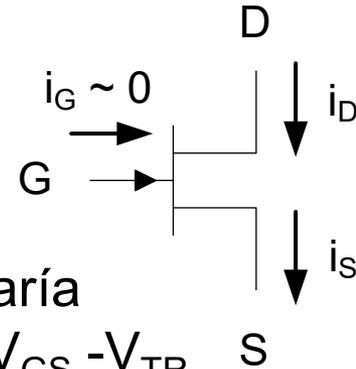


**Canal p: Igual funcionamiento pero cambiando el signo de  $V_{GS}$**

# Transistores de efecto campo. JFET.

## Zonas de funcionamiento

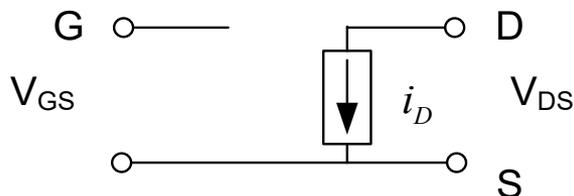
- Zona Lineal:** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$  la  $i_D$  varía linealmente según se incrementa  $V_{DS}$  hasta una  $V_{sat}$ .  $V_{sat} \sim V_{GS} - V_{TR}$



Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $0 < V_{DS} < V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2); \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

- Zona de Saturación:** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$ , si  $V_{DS} > V_{sat}$  la  $i_D$  permanece constante aunque aumente  $V_{DS}$ .



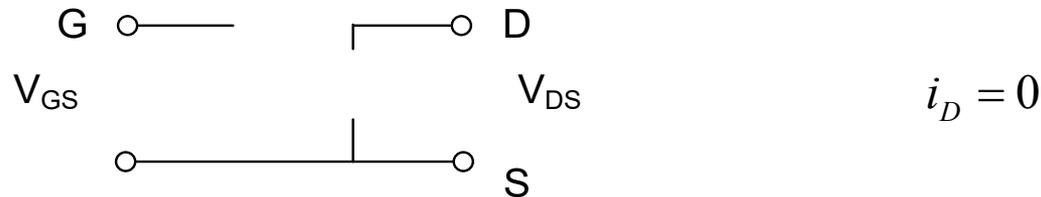
Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $V_{DS} > V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k = \frac{i_{DSS}}{V_{TR}^2}$$

# Transistores de efecto campo. JFET.

## Zonas de funcionamiento

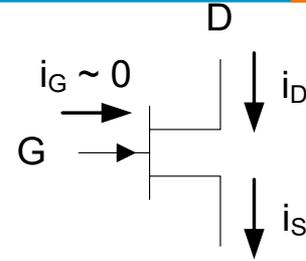
- **Zona de Corte:** Para una determinada tensión  $V_{GS} < V_{TR}$  en canal está estrangulado y no circula la corriente  $i_D$ .



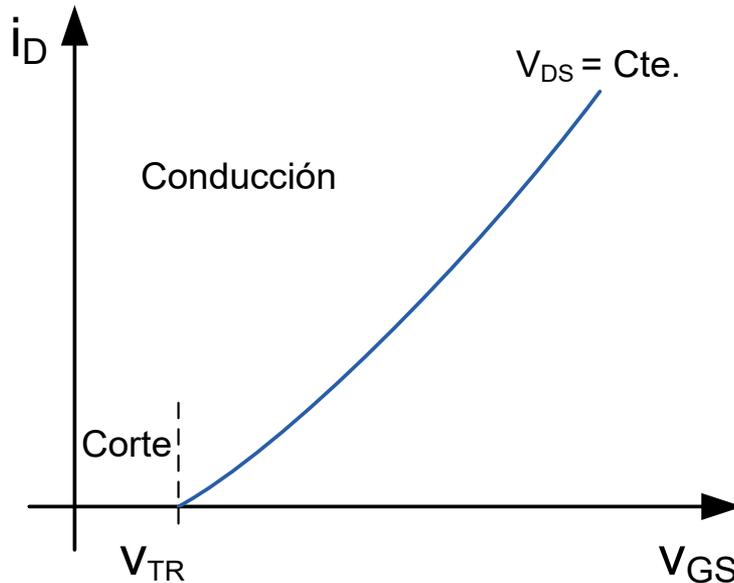
- **Zona de ruptura:** Si estando en la zona de saturación se aumenta mucho  $V_{DS}$  se produce la ruptura del componente.
- **No hay Zona inversa:** El componente es simétrico.

# Transistores de efecto campo. JFET.

## Curvas características



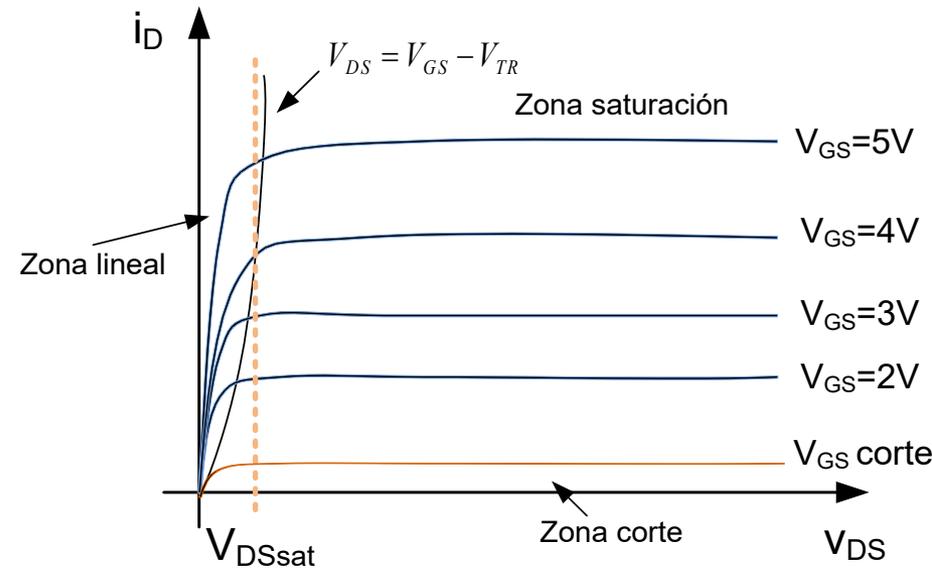
### Característica I-V de entrada



- En la zona de saturación:

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left( \frac{mA}{V^2} \right)$$

### Característica I-V de salida



$V_{GS} > V_{TR}$  → Zona Activa o Saturación

$$(i_D = f(V_{DS}, V_{TR}))$$

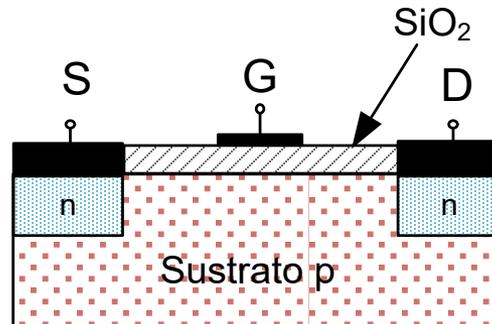
$V_{GS} < V_{TR}$  → Zona de Corte →  $(i_D = 0)$

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

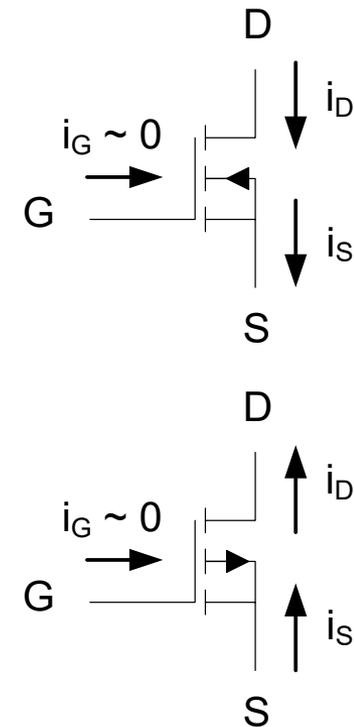
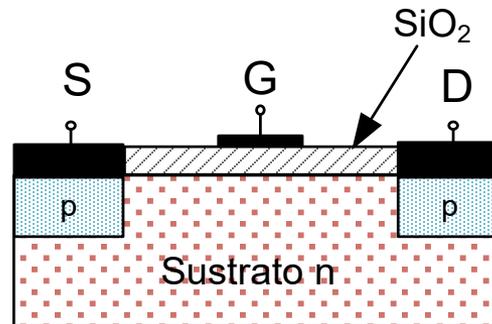
## Estructura y símbolo del MOSFET de enriquecimiento. *Canal n y Canal p*

Terminales: Puerta, Drenador y Fuente. Componente simétrico.

Canal n



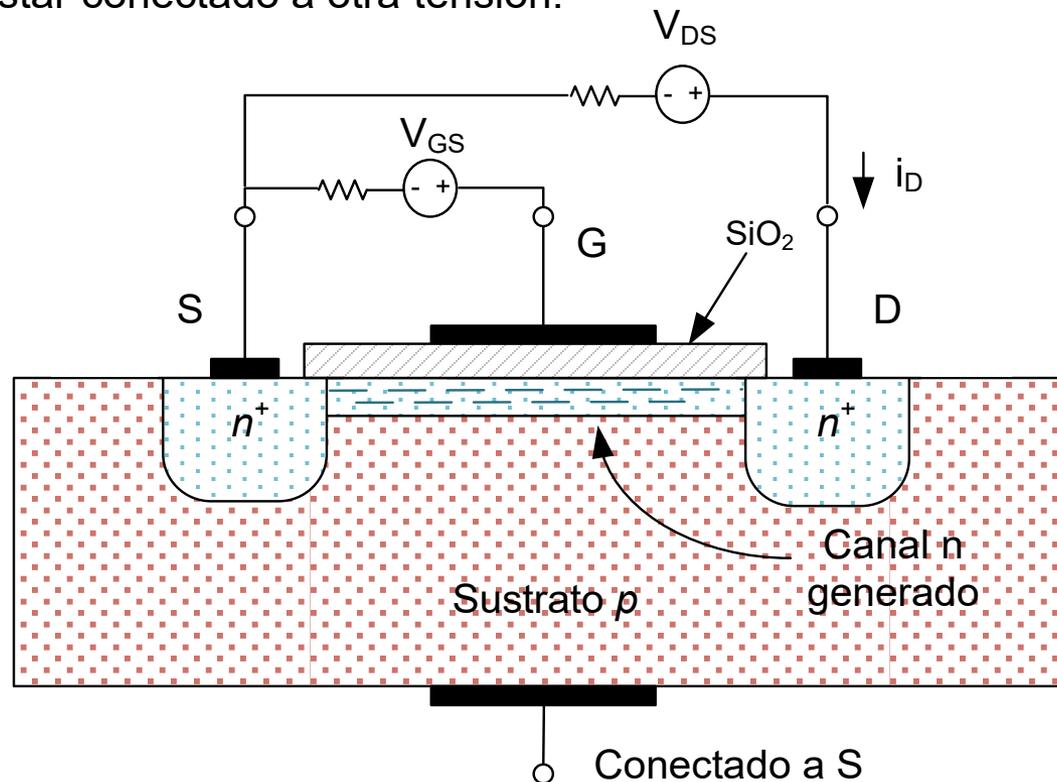
Canal p



# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Funcionamiento. MOSFET de enriquecimiento canal n

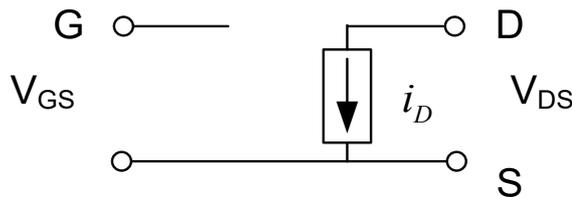
✓ Tensión  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$ : La tensión  $V_{GS}$  atrae electrones del sustrato hacia la capa aislante de  $SiO_2$ , creando un canal. La corriente  $i_D$  comienza a circular cuando la tensión  $V_{DS}$  supera un umbral  $V_{TR}$ . El sustrato p se conecta a la fuente. En transistores usados en C.I. el sustrato puede estar conectado a otra tensión.



# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Zonas de funcionamiento

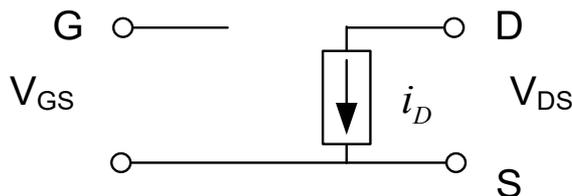
- Zona Lineal:** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$  la  $i_D$  varía linealmente según se incrementa  $V_{DS}$  hasta una  $V_{sat}$ .  $V_{sat} \sim V_{GS} - V_{TR}$



Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $0 < V_{DS} < V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (2(V_{GS} - V_{TR})V_{DS} - V_{DS}^2)$$

- Zona de Saturación:** Para una determinada tensión  $V_{GS} > V_{TR}$ , si  $V_{DS} > V_{sat}$  la  $i_D$  permanece constante aunque aumente  $V_{DS}$ .



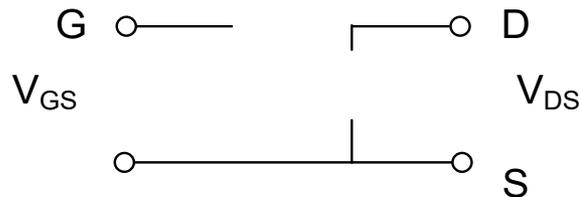
Si  $V_{GS} > V_{TR}$  y  $V_{DS} > V_{sat} (\approx V_{GS} - V_{TR})$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2;$$

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Zonas de funcionamiento

- **Zona de Corte:** Para una determinada tensión  $V_{GS} < V_{TR}$  en canal está estrangulado o no se ha formado y no circula la corriente  $i_D$ .



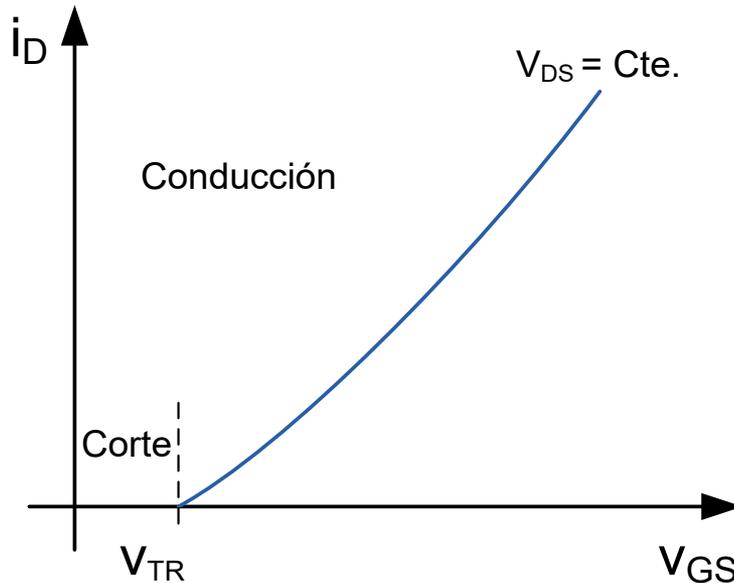
$$i_D = 0$$

- **Zona de ruptura:** Si estando en la zona de saturación se aumenta mucho  $V_{DS}$  se produce la ruptura del componente.

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Curvas características (Enriquecimiento canal n)

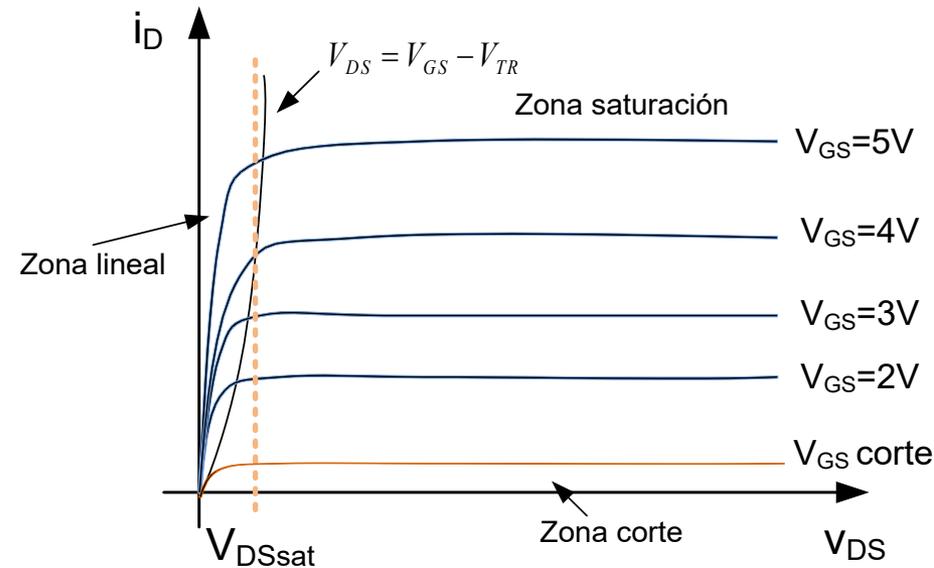
Característica I-V de entrada



- En la zona de saturación:

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left( \frac{mA}{V^2} \right)$$

Característica I-V de salida

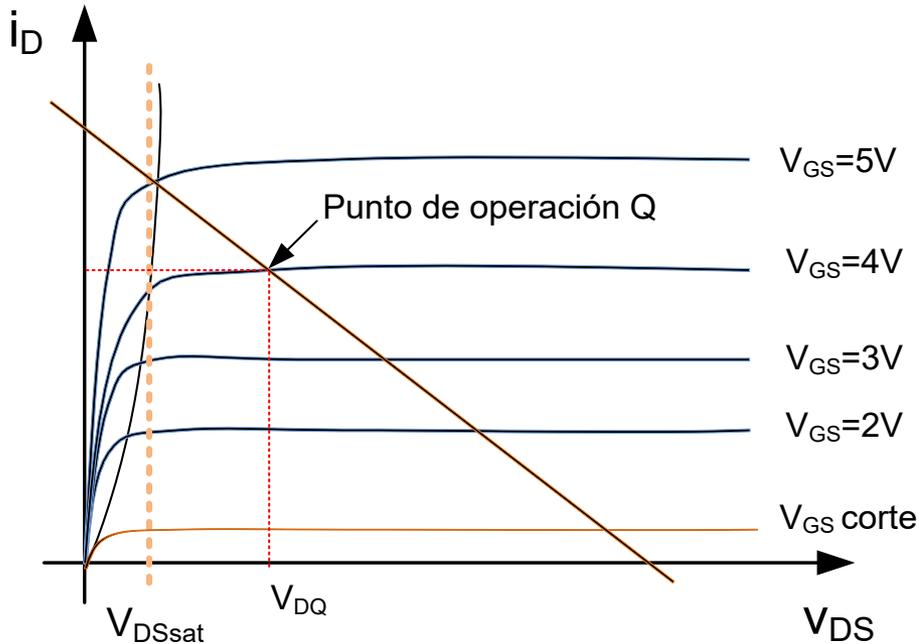


$V_{GS} > V_{TR}$  → Zona Activa o Saturación  
 $(i_D = f(V_{DS}, V_{TR}))$

$V_{GS} < V_{TR}$  → Zona de Corte →  $(i_D = 0)$

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Punto de operación



- Circuito de salida

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

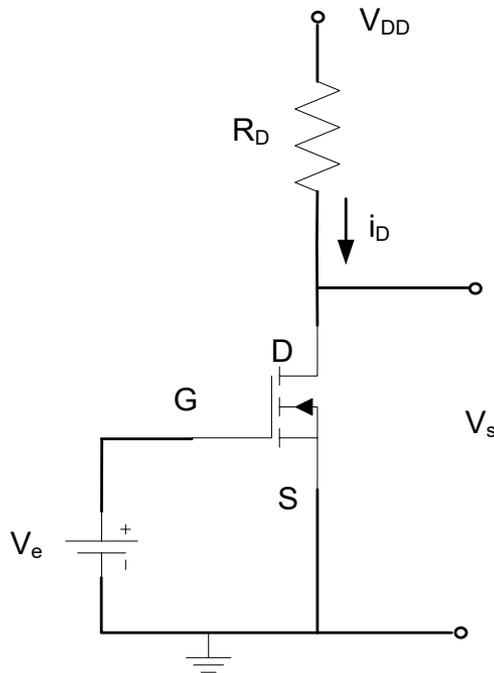
$$V_{DS} = 0 \rightarrow i_D = \frac{V_{DD}}{R_D}$$

$$i_D = 0 \rightarrow V_{DS} = V_{DD}$$

- Pto. De Operación. Intersección de la recta de carga con la curva del valor de  $V_{GS}$  conectado en la entrada.

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Aplicaciones. Amplificador inversor de tensión



- Suponiendo zona de saturación:

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$

$$i_D = k \cdot (V_{GS} - V_{TR})^2; \quad k \left( \frac{mA}{V^2} \right)$$

- Polarización CC (Pto. de operación o trabajo):

$$V_{DD} = i_D \cdot R_D + V_{DS}$$

$$V_s = V_{DS}$$

- Se comprueba la suposición

$$V_{GS} > V_{TR} \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_{TR}$$

# Transistores de efecto campo. MOSFET.

## Aplicaciones

- Interruptores analógicos o digitales.
- Etapas de entrada a amplificadores diferenciales.
- Amplificadores especiales.
- Resistencias controladas por tensión.

# Transistores de efecto campo

## Transistor JFET y MOSFET reales

- Sus características varían con la temperatura.
- La curva característica de salida no es plana en su Zona de Saturación. No es totalmente lineal.
- La tensión máxima que soporta un transistor entre terminales es finita. Por encima de ellas se rompe el componente.
- La máxima corriente viene limitada por la capacidad de disipación de potencia del componente.
- La existencia de capacidades y resistencia parásitas hacen que la velocidad de respuesta del transistor sea limitada.
- Sensibles a descargas electroestáticas.

## Tema 5. Amplificación con transistores

# Índice

Amplificadores. Función de transferencia. Tipos.

Linealizar el amplificador

Modelo equivalente de pequeña señal.

Acoplamiento capacitivo

Método de resolución de circuitos con DC y AC.

Ejemplos de amplificadores de una etapa con BJT.

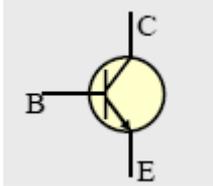
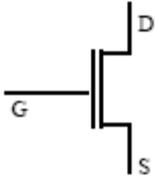
Microelectrónica: circuitos y dispositivos. M. N. Horenstein, Prentice Hall

Circuitos Electrónicos, análisis simulación y diseño. N. Malik, Prentice Hall

The art of electronics, P. Horowitz, Cambridge University Press

## BIBLIOGRAFÍA

## Resumen Transistores ( Repaso)

|   | BJT (bipolar)  | FET (unipolar)  |
|---|--|---|
| <b>Terminales</b>                                   | <b>Emisor (E)</b><br><b>Colector (C)</b><br><b>Base (B)</b>                        | <b>Fuente (S)</b><br><b>Drenador (D)</b><br><b>Puerta (G)</b>                       |
| <b>Símbolo</b>                                      |  |  |
| <b>Puerto de entrada</b><br><b>Puerto de salida</b> | <b>Base-emisor</b><br><b>Colector-emisor</b>                                       | <b>Puerta-fuente</b><br><b>Drenador-fuente</b>                                      |
| <b>Funciona como fuente</b><br><b>de corriente</b>  | <b>Controlada por</b><br><b>corriente</b>  | <b>Controlada por</b><br><b>tensión</b>   |
| <b>Zonas de</b><br><b>funcionamiento</b>            | <b>Corte</b><br><b>Saturación</b><br><b>Activa</b>                                 | <b>Corte</b><br><b>Triodo (lineal)</b><br><b>Saturación</b>                         |

# Amplificadores

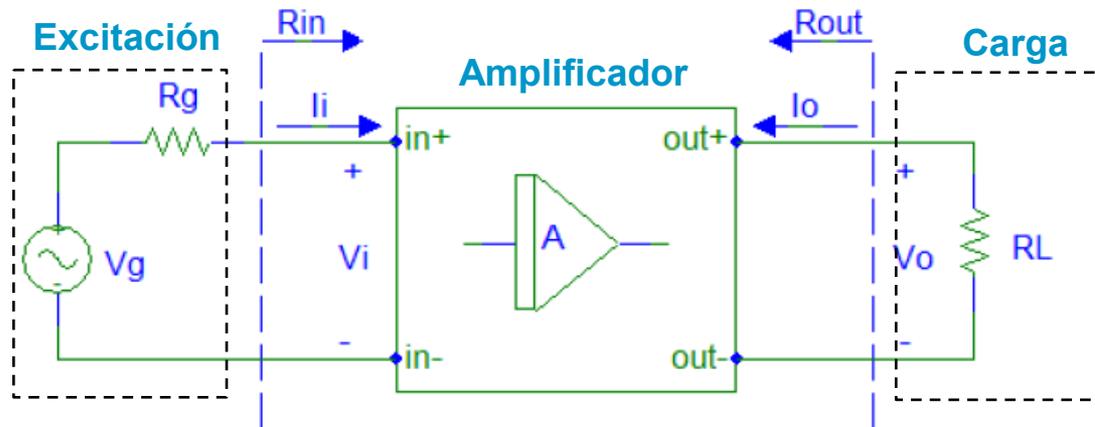
Los transductores proporcionan señales débiles, con poca energía, que necesitan ser amplificadas. El bloque funcional que cumple esta tarea es el amplificador de señal.

Para que la información no cambie, el amplificador debe ser lineal: la salida ha de ser una réplica exacta de la entrada. Sin **distorsión** (cambios en la forma de onda)

$$v_0(t) = Av_i(t)$$

Siendo  $v_0$  la señal de salida y  $v_i$  la señal de entrada.  $A$  es la ganancia del amplificador

# Parámetros característicos de amplificadores



Ganancia en tensión,  $A_v$  y  $G$      $A_v = v_o / v_i$      $G = v_o / v_g$     en dBs     $20 \log |A_v|$

Ganancia en corriente,  $A_i$      $A_i = i_o / i_i$

Resistencia de entrada,  $Z_{in}$      $Z_{in} = v_i / i_i$

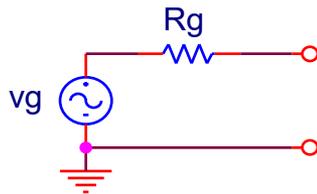
Resistencia de salida,  $Z_{out}$      $Z_{out} = v_o / i_o$

Ganancia en potencia     $A_p = \frac{p_o}{p_i} = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = A_v A_i$     en dBs     $10 \log |A_p|$

## Amplificación

La **excitación** puede ser:

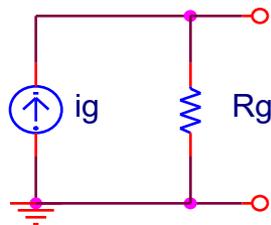
En **tensión**: equivalente Thévenin de la fuente de excitación



Circuito equivalente de un  
generador de tensión.

$R_g$  típica  $50\Omega$

En **corriente**: equivalente Norton de la fuente de excitación



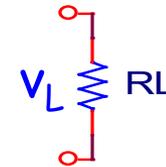
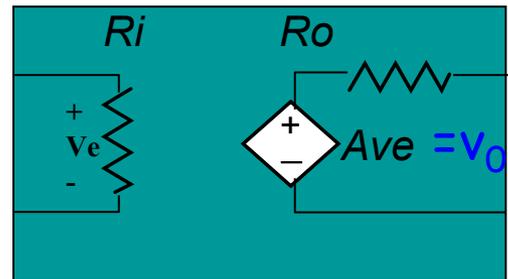
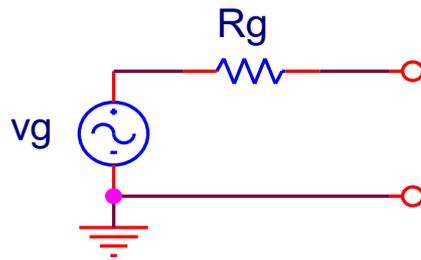
Circuito equivalente de un  
generador de corriente.

$R_g$  típica  $M\Omega$

# Amplificación

## Sistema Completo

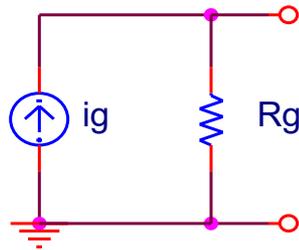
### Tensión



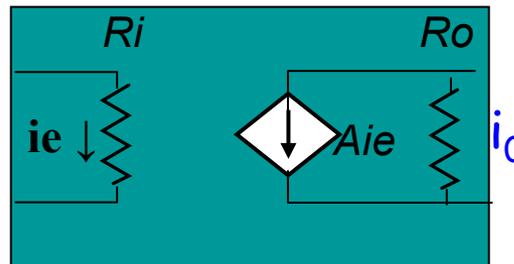
$$A_v = \frac{V_o}{V_e}$$

### Corriente

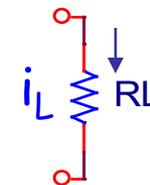
#### Excitación



#### Amplificador



#### Carga

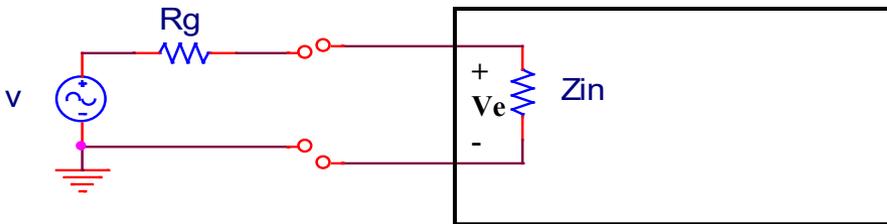
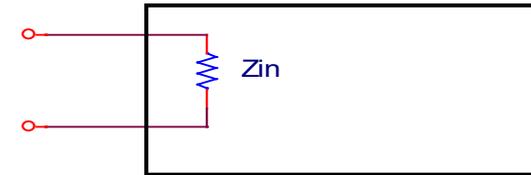


$$A_I = \frac{I_o}{I_e}$$

# Amplificación

Característica de entrada del amplificador: **impedancia de entrada,  $Z_{in}$**

## Excitación en Tensión

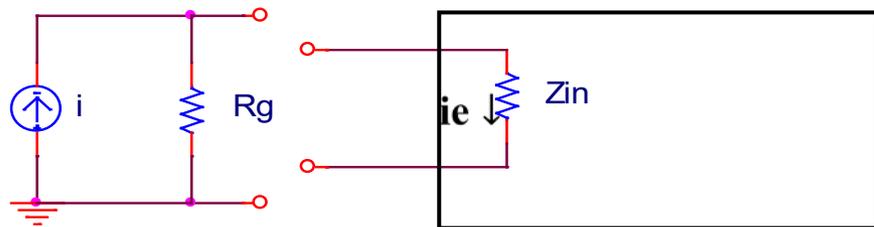


Interesa  $Z_{in} \gg R_g \approx 50\Omega$

Caso ideal  $Z_{in} = \infty$

$$v_e = v \frac{Z_{in}}{Z_{in} + R_g} \leq v$$

## Excitación en Corriente



Interesa  $Z_{in} \ll R_g \approx M\Omega$

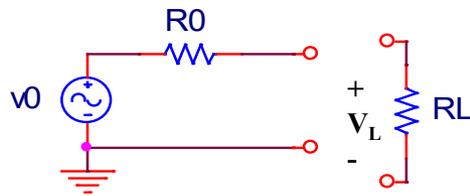
Caso ideal  $Z_{in} = 0$

$$i_e = i \frac{R_g}{Z_{in} + R_g} \leq i$$

# Amplificación

Característica de salida del amplificador: **impedancia de salida,  $Z_0$**

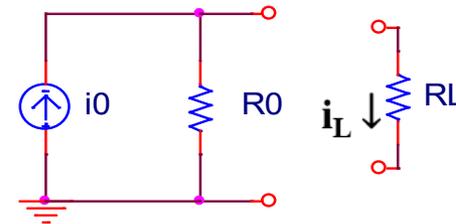
## Generador de tensión



$$v_L = v_0 \frac{R_L}{R_0 + R_L} \leq v_0$$

Interesa  $R_0 \ll R_L$   
 Caso ideal  $R_0 = 0$

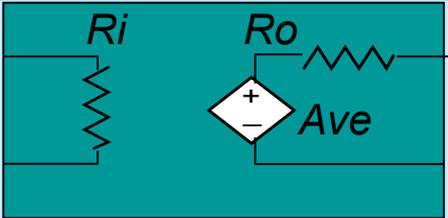
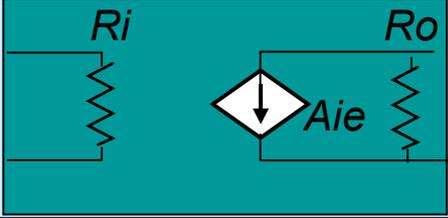
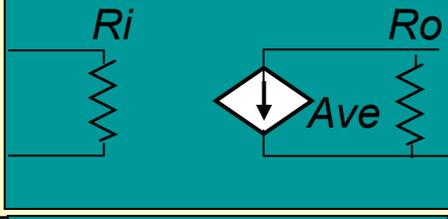
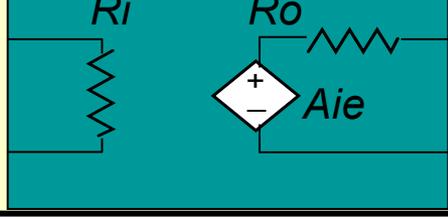
## Generador de corriente



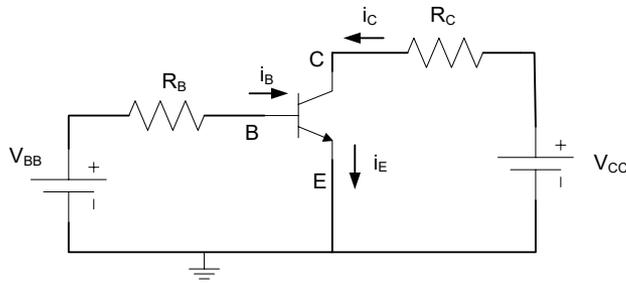
$$i_L = i_0 \frac{R_0}{R_0 + R_L} \leq i_0$$

Interesa  $R_0 \gg R_L$   
 Caso ideal  $R_0 = \infty$

## Tipos Amplificadores

|                    | Entrada | Salida | [A]         | Ri       | Ro       | Modelo  |
|--------------------|---------|--------|-------------|----------|----------|---|
| Tensión            | V       | V      | $A_V = V/V$ | $\infty$ | 0        |    |
| Corriente          | I       | I      | $A_I = I/I$ | 0        | $\infty$ |    |
| Trans-conductancia | V       | I      | $A_G = I/V$ | $\infty$ | $\infty$ |   |
| Trans-impedancia   | I       | V      | $A_Z = V/I$ | 0        | 0        |  |

# Polarización del transistor (recordatorio)



- Circuito de entrada

$$V_{BB} = i_B \cdot R_B + V_{BE}$$

$$V_{BE} = 0,7 \rightarrow i_B = \frac{V_{BB} - 0,7}{R_B}$$

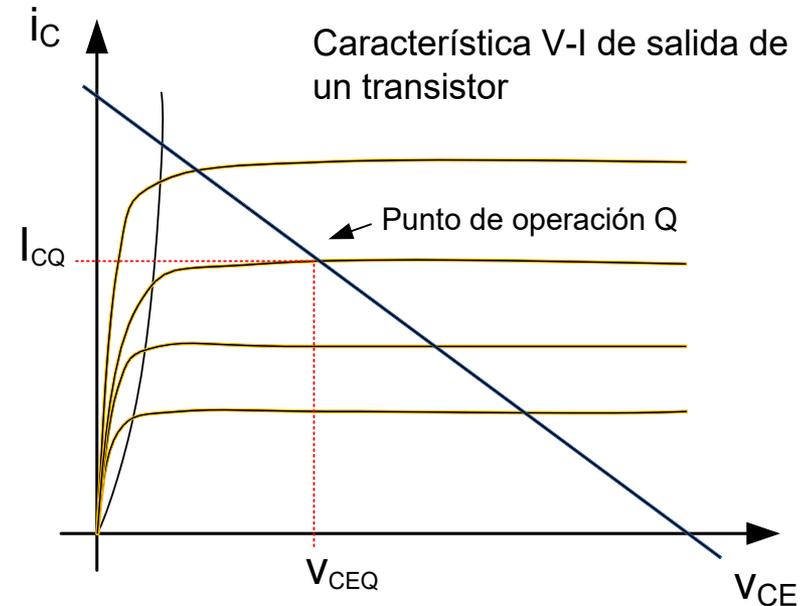
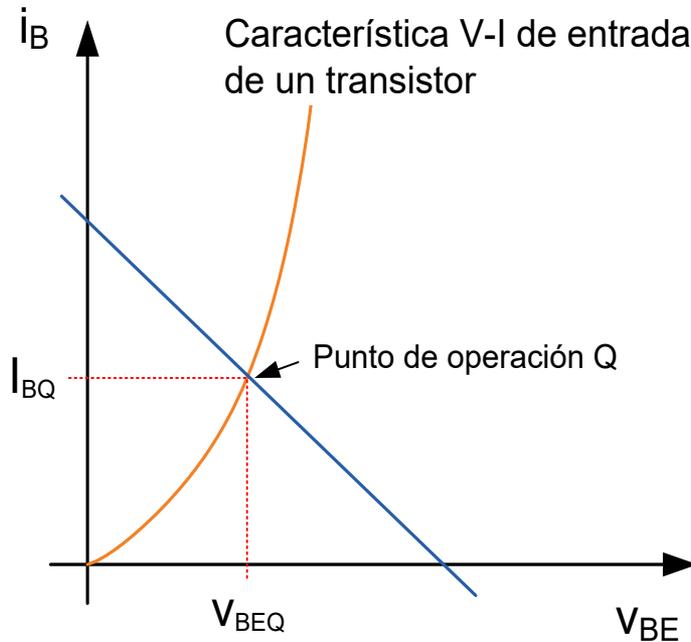
$$i_B = 0 \rightarrow V_{BE} = V_{BB}$$

- Circuito de salida

$$V_{CC} = i_C \cdot R_C + V_{CE}$$

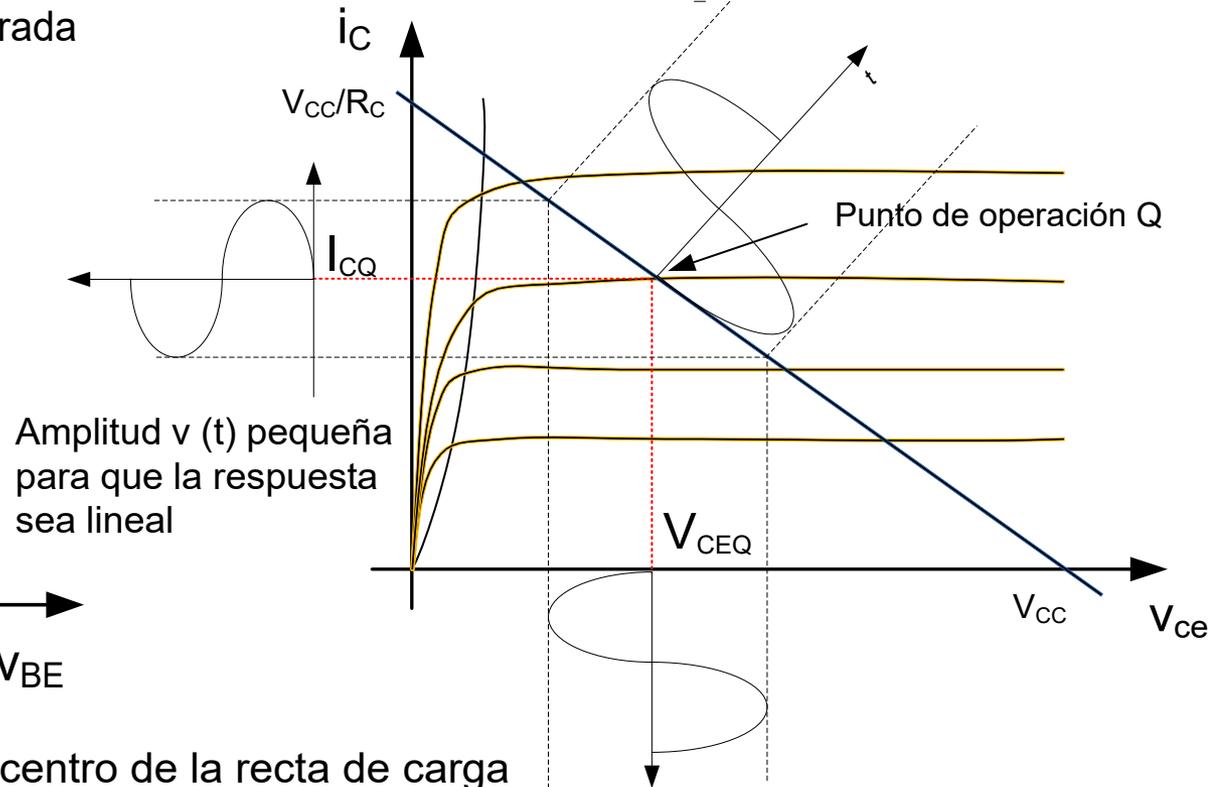
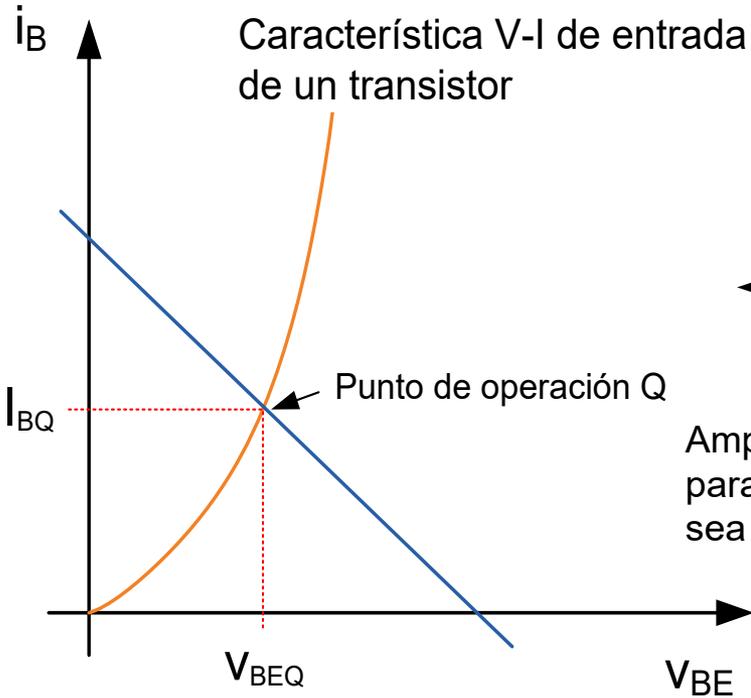
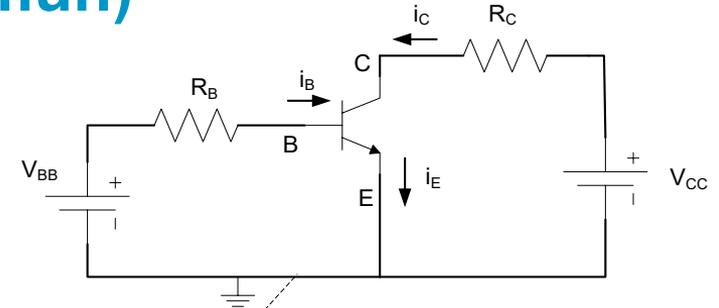
$$V_{CE} = 0 \rightarrow i_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$i_C = 0 \rightarrow V_{CC} = V_{CE}$$



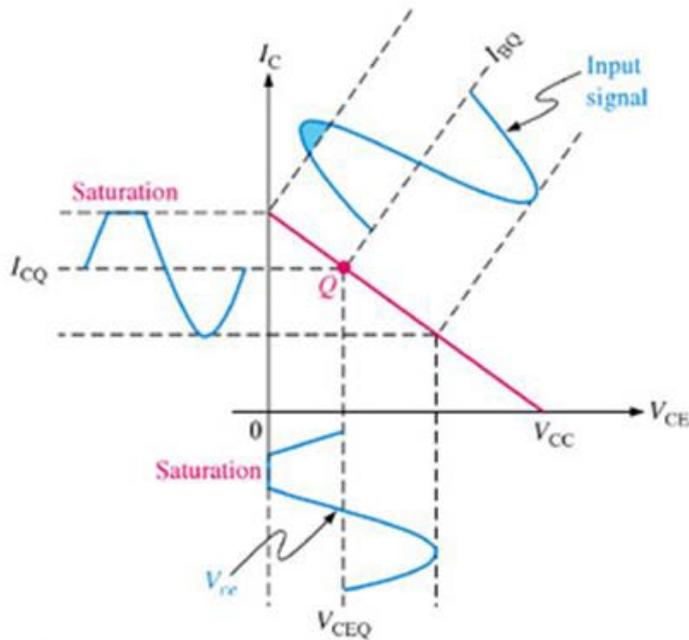
# Amplificador Inversor (emisor común)

Recta de carga dinámica

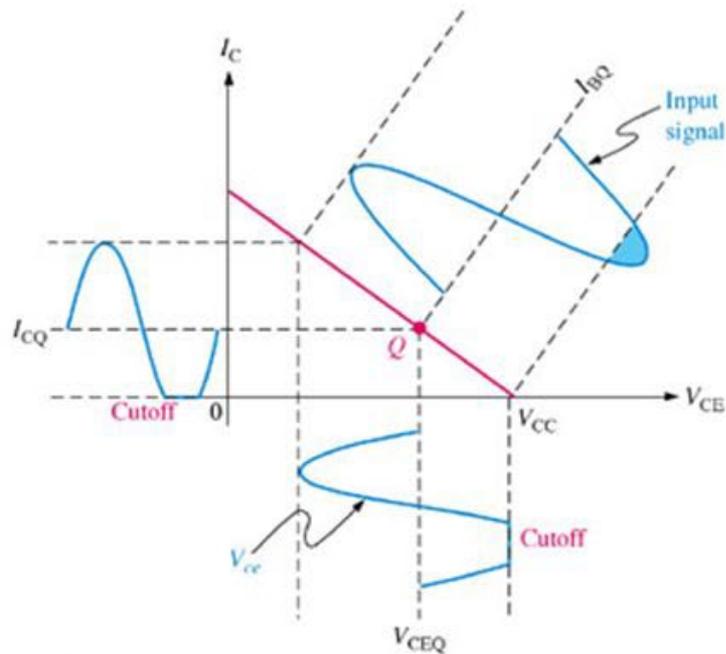


Punto de trabajo en el centro de la recta de carga

## Distorsión de la forma de onda



(a) Transistor is driven into saturation because the Q-point is too close to saturation for the given input signal.



(b) Transistor is driven into cutoff because the Q-point is too close to cutoff for the given input signal.

Graphical load line illustration of a transistor being driven into

- ▶ **saturation and/or cutoff**

## El Amplificador no lineal

Linealizar un amplificador no lineal:

Polarizar el circuito para que opere en un punto adecuado Q (mitad de la recta de carga).

Superponer una señal pequeña que varíe con el tiempo,  $v_i(t)$

Señal  $v_i(t)$  es suficientemente pequeña para que la respuesta del amplificador sea lineal aproximadamente.

$V_i$  voltaje de polarización (DC)

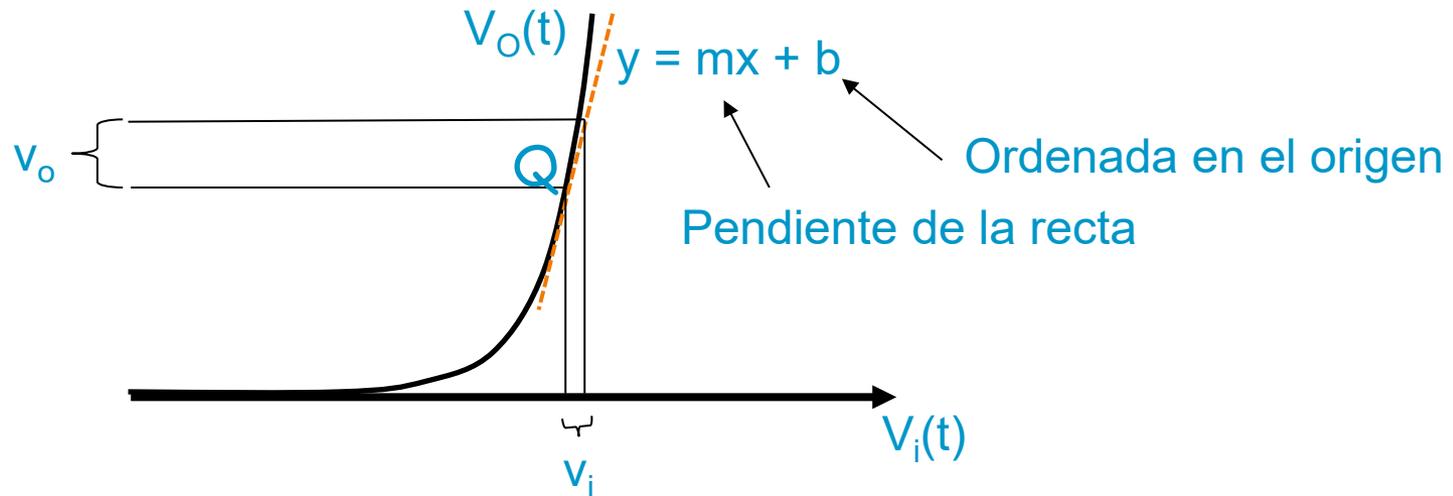
$v_i(t)$  voltaje de pequeña señal (AC)

Entrada:  $V_i + v_i(t)$  (voltaje total DC+AC)

Salida:  $V_o + v_o(t)$

$v_o(t) = A v_i(t)$ , siendo A la pendiente de la tangente a la Característica de Transferencia en el punto de trabajo (Q).

## Aproximación de los modelos lineales



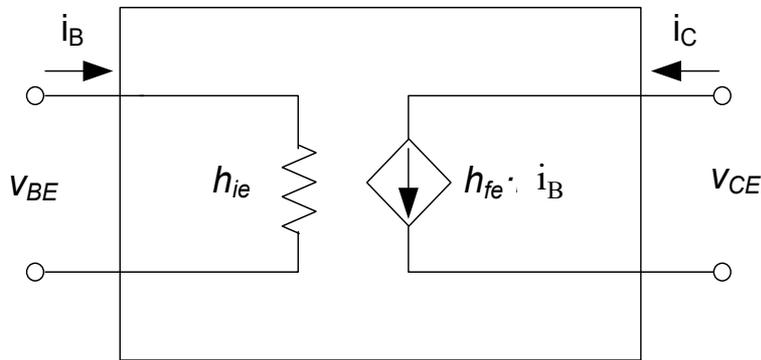
Alrededor del punto  $Q$  se puede aproximar la característica del dispositivo a la recta tangente a dicha característica

El modelo lineal de este dispositivo en el punto  $Q$  será la recta  $v_o = m v_i + b$

En el régimen de **pequeña señal** (amplitud AC “pocos mV”) cualquier dispositivo no lineal (diodo, transistor) se comporta de forma lineal.

## Modelo equivalente de pequeña señal del BJT

En pequeña señal y a frecuencias medias, el modelo simplificado del BJT es:



$$v_{BE} = h_{ie} i_B$$

$$i_C = h_{fe} i_B$$

$$h_{ie} = \frac{V_t}{I_B} = \frac{0.026}{I_B}$$

depende del punto de polarización!

$$I_B = I_0 \exp(V_{BE}/V_t)$$

$$\frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} = \frac{I_B}{V_t} = \frac{1}{h_{ie}}$$

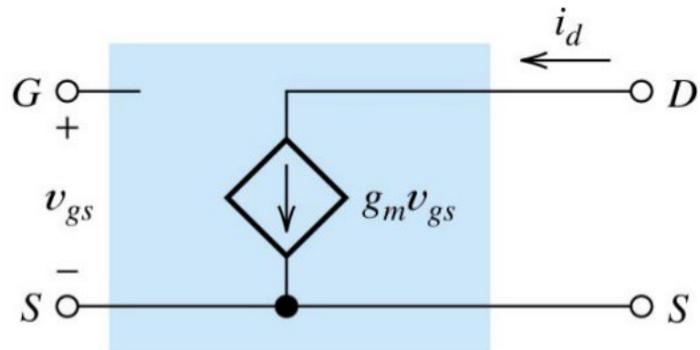
$$\frac{\partial V_{BE}}{\partial I_B} = \frac{V_t}{I_B} = h_{ie} = r_\pi$$

hie: resistencia de entrada

hfe: ganancia de corriente en AC

## Modelo equivalente de pequeña señal del FET

En pequeña señal y a frecuencias medias, el modelo simplificado del FET es:



$$I_D = k(V_{GS} - V_t)^2$$

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = 2\sqrt{kI_D} = g_m$$

resistencia de entrada infinita

$g_m$  ganancia de transconductancia en AC

$g_m$  depende del punto de polarización!

## Modelos equivalentes de pequeña señal

Estudian el comportamiento del transistor alrededor del punto de trabajo.

Son válidos para la zona de corriente constante (en la curva característica de salida del transistor)

### Metodología:

Se anulan las fuentes constantes (DC) del circuito

Se reemplaza cada componente por un equivalente lineal que modele la respuesta a pequeñas perturbaciones (modelo en pequeña señal).

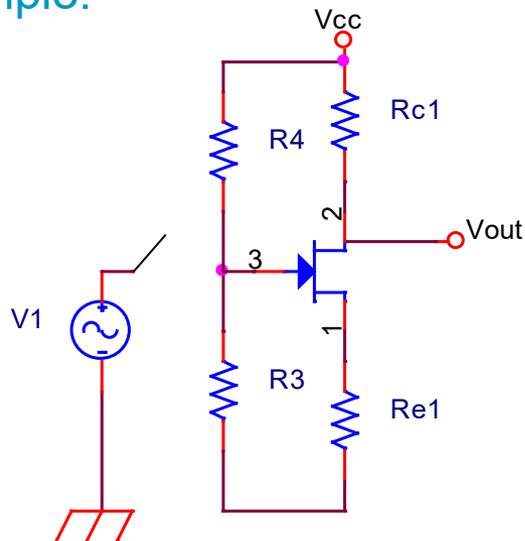
## Acoplamiento capacitivo

¿Cómo separar el circuito de polarización del transistor de la señal que queremos amplificar? ¿Cómo acoplar pequeña señal sin cambiar Q?

Ppo. de superposición: anular la fuente de pequeña señal para hallar el punto de trabajo del transistor.

Al conectar el generador de señal el pto. de trabajo no debe cambiar.

Ejemplo:

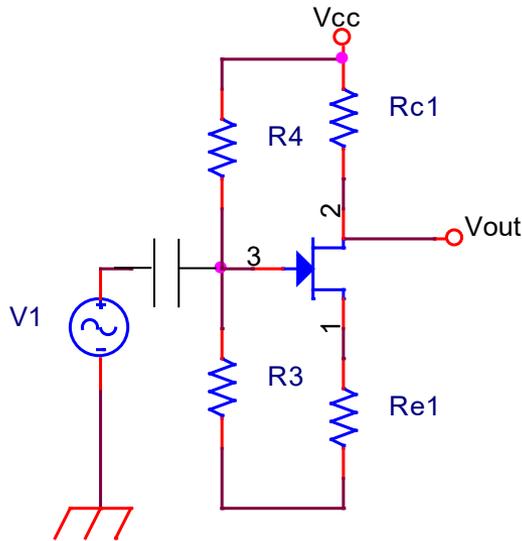


Si interruptor cerrado  $v_G = 0 \rightarrow$  TRT en corte.

Cambia en punto de trabajo!!

## Acoplamiento capacitivo

### Solución: Acoplamiento Capacitivo para conectar pequeña señal



En DC ( $\omega=0$ ) el condensador es un circuito abierto (la alterna no interfiere en Q).  $Z_c=1/j\omega C \Rightarrow Z_c = \infty$

En AC y a frecuencias medias y altas (kHz-MHz) los condensadores se eligen grandes para que sean cortocircuitos.

Si C grande,  $Z_c=1/j\omega C \Rightarrow Z_c = 0 \Rightarrow V_G = V_i$

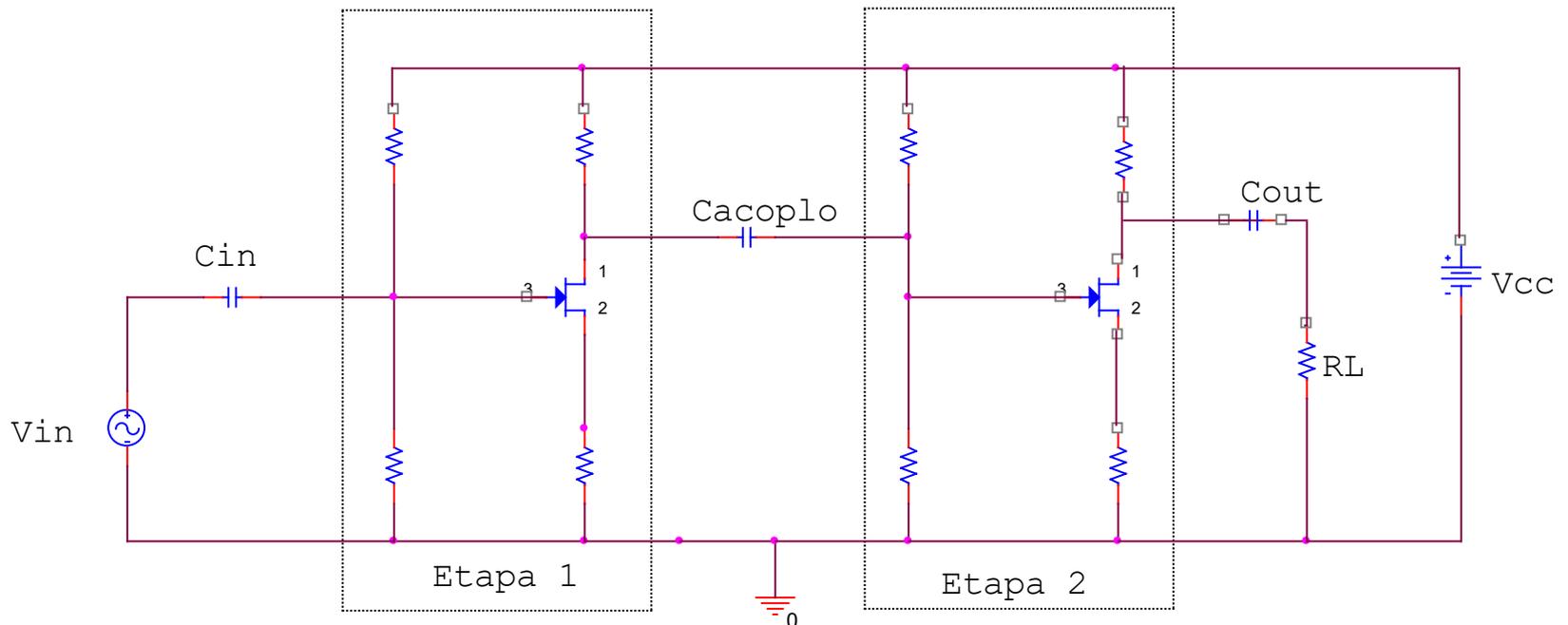
Problema: en baja frecuencia los condensadores no son cortocircuitos y la ganancia disminuye a baja frecuencia!

## Acoplamiento capacitivo

Conectar la resistencia de carga también puede cambiar el punto de trabajo.

Solución: Introducir otro condensador entre la salida y la resistencia de carga.

Conexión entre varias etapas también se realiza mediante condensadores.



## Resumen acoplamiento capacitivo

El punto de trabajo NO puede cambiar al conectar: la señal de alterna, la carga o dos etapas entre sí

Usaremos condensadores para acoplar etapas, la señal de entrada y la resistencia de carga

En el análisis de continua (DC) los condensadores se sustituirán por circuito abierto

En el análisis de alterna (AC) a frecuencias bajas o medias los condensadores se sustituyen por cortocircuito

## Acoplo directo

### ¿Cómo acoplar pequeña señal sin cambiar Q y sin usar condensadores?

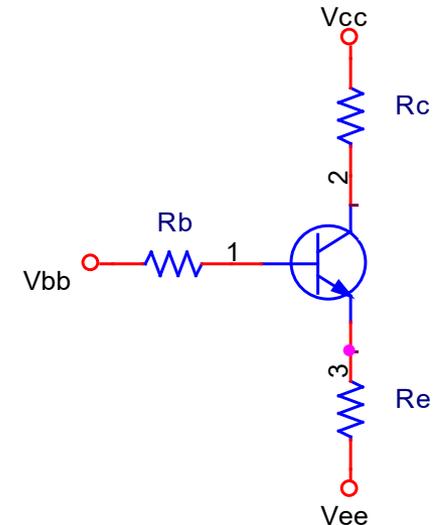
Problema de los condensadores de acoplo. A baja frecuencias disminuye la ganancia.

Diseño cuidadoso del circuito de manera que el punto de operación sea independiente de la tensión de la entrada.

Estrategia usada en circuitos integrados, por ejemplo, A.O.

Se usan alimentaciones simétricas.

Son diseños muy complicados.



## Método de resolución de circuitos

### Análisis de un amplificador con transistores:

Calcular el punto de trabajo (los condensadores externos son c. abiertos en DC).

Dibujar el circuito equivalente de pequeña señal:

- Se anulan las fuentes de continua.

- Se sustituyen los condensadores de acoplo y desacoplo por cortos.

- Se reemplaza el transistor por su modelo de pequeña señal.

Hallar los parámetros de pequeña señal.

Calcular los parámetros del amplificador.

# Cálculo impedancias de entrada y salida

Cálculo  $Z_{in}$  de un amplificador:

- Sustituir a la entrada del amplificador la excitación por una fuente de tensión de prueba ( $v_{test}$ )
- Calcular  $v_{test}/i_{test} = Z_{in}$



Cálculo  $Z_{out}$  de un amplificador:

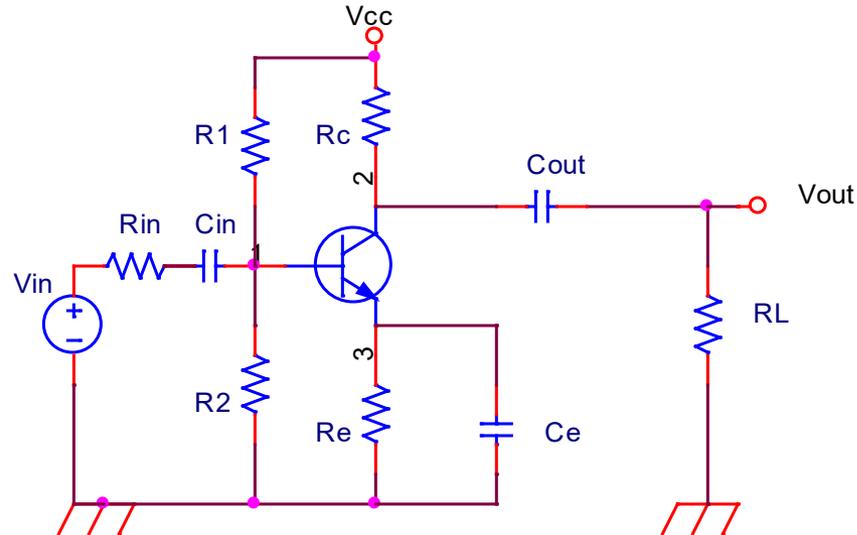
- Anular las fuentes independientes (tensión  $\rightarrow$  c.c., corriente  $\rightarrow$  c.a.)
- Conectar la fuente de prueba a la salida del amplificador ( $v_{test}$ ).
- Calcular  $v_{test}/i_{test} = Z_{out}$



## Amplificadores de una etapa

- Amplificador con BJT en emisor común
- Amplificador con BJT en colector común
- Amplificador con FET en fuente común
- Amplificador con FET en drenador común

## Amplificador con BJT de una etapa. Emisor común



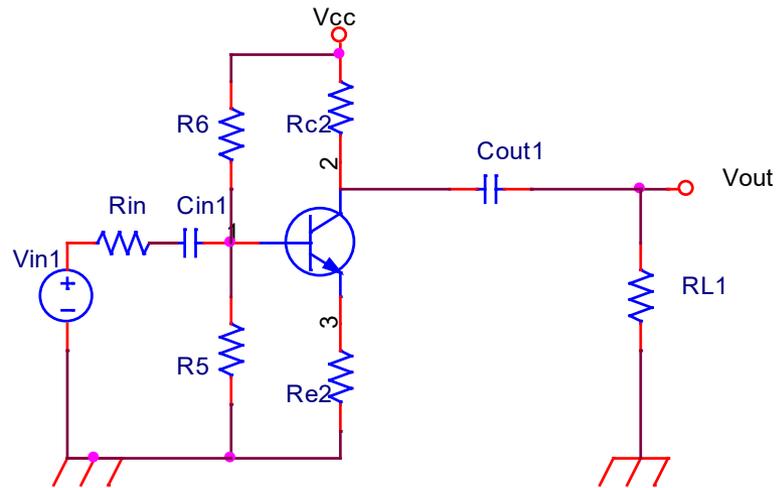
$$A_V = \frac{v_o}{v_b} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$A_I = \frac{i_o}{i_{in}} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{h_{ie} R_p}{h_{ie} + R_p}$$

$$Z_{in} = \frac{R_p h_{ie}}{R_p + h_{ie}}$$

$$Z_{out} = R_C // r_o = R_C \text{ (si se desprecia } r_o \text{)}$$

## Efecto del Condensador de desacoplo



Si no hay CE (o se añade una RE adicional) se obtiene un circuito:

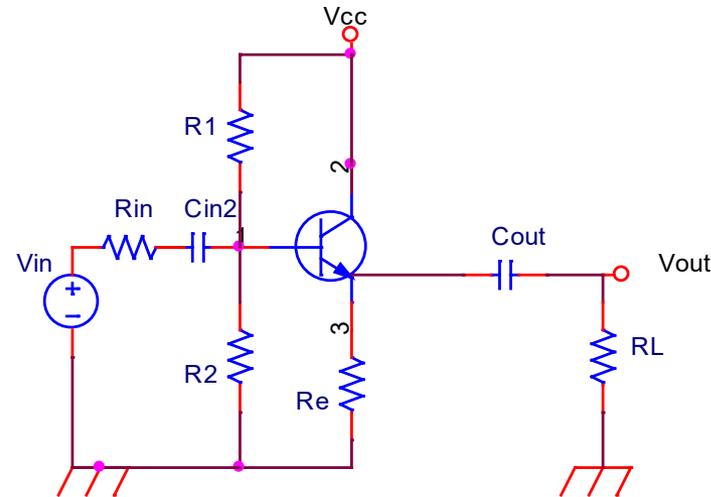
Con menor ganancia

Mayor estabilidad

Mayor ancho de banda

Mayor impedancia de entrada

## Amplificador con BJT de una etapa. Colector común



$$A_V = \frac{v_0}{v_b} = \frac{h_{fe} + 1}{h_{ie} + R_L'(h_{fe} + 1)} R_L'$$

$$A_I = \frac{i_0}{i_{in}} = \frac{R_L' / R_L (h_{fe} + 1) R_p}{R_p + h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_L'}$$

$$Z_{in} = R_p // [h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_L']$$

$$Z_{out} = R_E // \frac{(R_P + h_{ie})}{(h_{fe} + 1)}$$

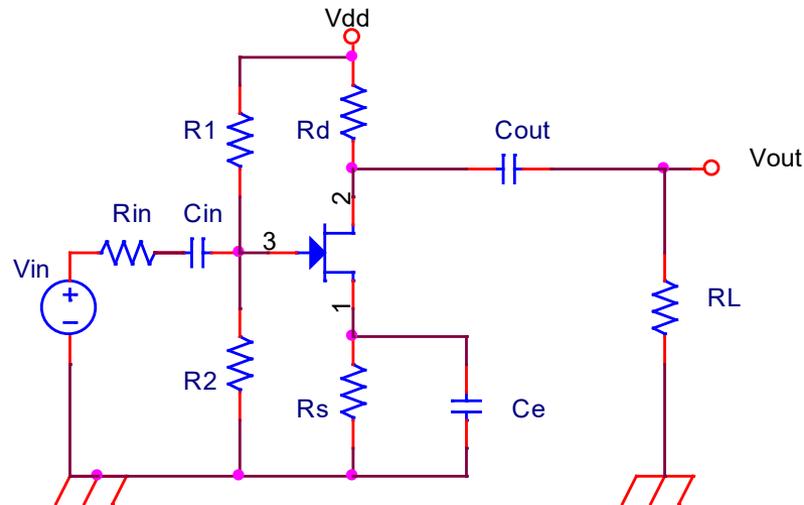
## RESUMEN Amplificadores con BJT

La configuración en Emisor Común es la más adecuada para producir la ganancia requerida en un amplificador.

Incluir una  $R_E$  adicional (sin condensador) provee varias mejoras a costa de reducir la ganancia.

La configuración en Colector Común tiene aplicación como amortiguador del voltaje y amplificador de corriente.

# Amplificador con FET de una etapa. Fuente común



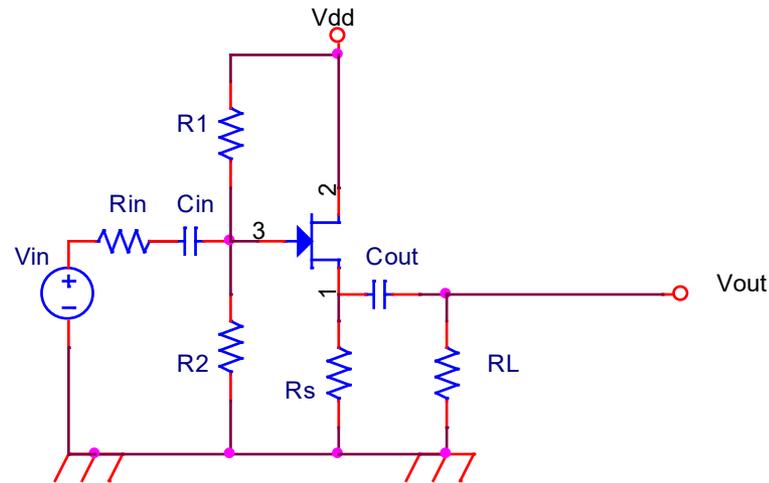
$$A_V = \frac{v_0}{v_g} = -g_m \frac{R_d R_L}{R_d + R_L}$$

$$A_I = \frac{i_0}{i_{in}} = -g_m \frac{R_d R_P}{R_d + R_L}$$

$$Z_{in} = R_p$$

$$Z_{out} = R_d$$

# Amplificador con FET de una etapa. Drenador común



$$A_V = \frac{v_0}{v_g} = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)} \leq 1 (\text{positiva})$$

$$Z_{in} = R_p$$

$$A_I = \frac{i_0}{i_{in}} = A_V \frac{R_p}{R_L}$$

$$Z_{out} = R_s // \frac{1}{g_m}$$

## RESUMEN Amplificadores con FET

La configuración en Fuente Común es la más adecuada para producir la ganancia requerida en un amplificador.

Incluir una  $R_S$  adicional (sin condensador) provee varias mejoras a costa de reducir la ganancia.

La configuración en Drenador Común tiene aplicación como amortiguador del voltaje y amplificador de corriente.

©2023 Autoras Belén Arredondo, Beatriz Romero, Gonzalo del Pozo y Diego Martín

Algunos derechos reservados

Este documento se distribuye bajo la licencia

“Atribución-Compartir Igual 4.0 Internacional” de Creative Commons,  
disponible en <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>

Para cualquier duda o sugerencia de mejora, puedes escribir a [belen.arredondo@urjc.es](mailto:belen.arredondo@urjc.es) y [beatriz.romero@urjc.es](mailto:beatriz.romero@urjc.es)