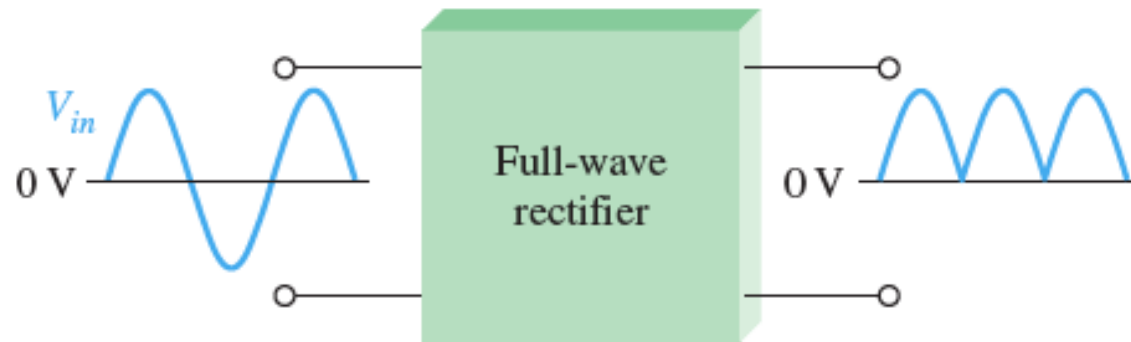
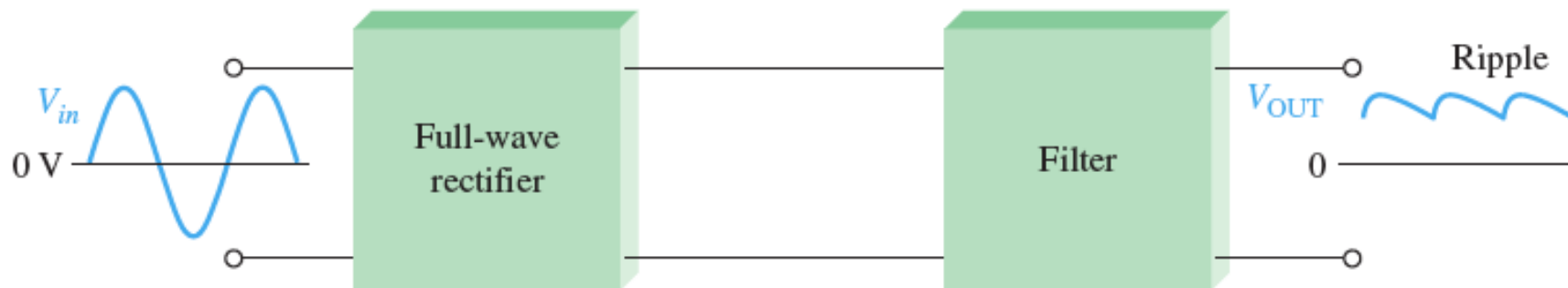


# PRINCIPIOS DE REGULACIÓN FUENTES DE VOLTAJE DE REGULADAS

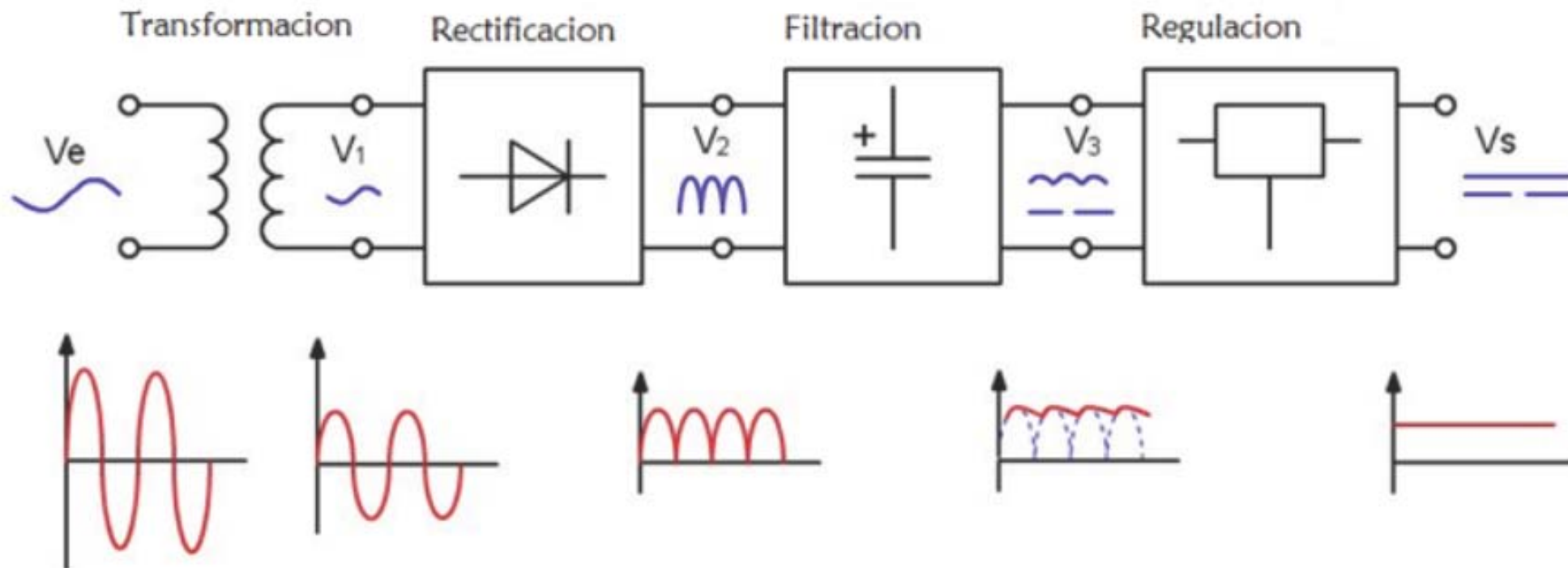
## Circuito Rectificador



## Circuito Rectificador con filtro



# PRINCIPIOS DE REGULACIÓN FUENTE REGULADA



El porcentaje de Regulación es una figura de mérito que se utiliza para evaluar el desempeño del regulador. Se definen los parámetros Regulación de Carga y Regulación de Línea

# PARÁMETROS DE LAS FUENTES DE VOLTAJE DC REGULADAS

## Regulación de Carga

Es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida ante las variaciones de la carga conectada a ella, es decir, ante las variaciones de la cantidad de corriente que debe proporcionarle al circuito que está alimentando.

$$R_C = \frac{V_{O_{Imax}} - V_{O_{SC}}}{V_{O_{Imax}}} \times 100\%$$

$V_{O_{Imax}}$  = Voltaje de salida a plena carga (corriente máxima) con voltaje de entrada máximo.

$V_{O_{SC}}$  = Voltaje de salida sin carga (corriente cero) con voltaje de entrada máximo.

Cuanto mejor es la calidad del regulador de la Fuente de Voltaje, menor es la Regulación de Carga.

## Regulación de Línea (Definición 1)

Es una medida de la capacidad de la Fuente de Voltaje DC de mantener constante su voltaje de salida cuando varía el valor del voltaje AC aplicado a la entrada del rectificador.

$$R_L = \frac{V_{O_{V_{I_{max}}}} - V_{O_{V_{I_{min}}}}}{V_{O_{V_{I_{nom}}}}} \times 100\%$$

$V_{O_{V_{I_{max}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es máximo

$V_{O_{V_{I_{min}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es mínimo

$V_{O_{V_{I_{nom}}}}$  = Voltaje de salida a plena carga cuando el voltaje de entrada AC es el nominal

La calidad del Regulador es mejor a menor Regulación de Línea.

## **Regulación de Línea (Definición 2)**

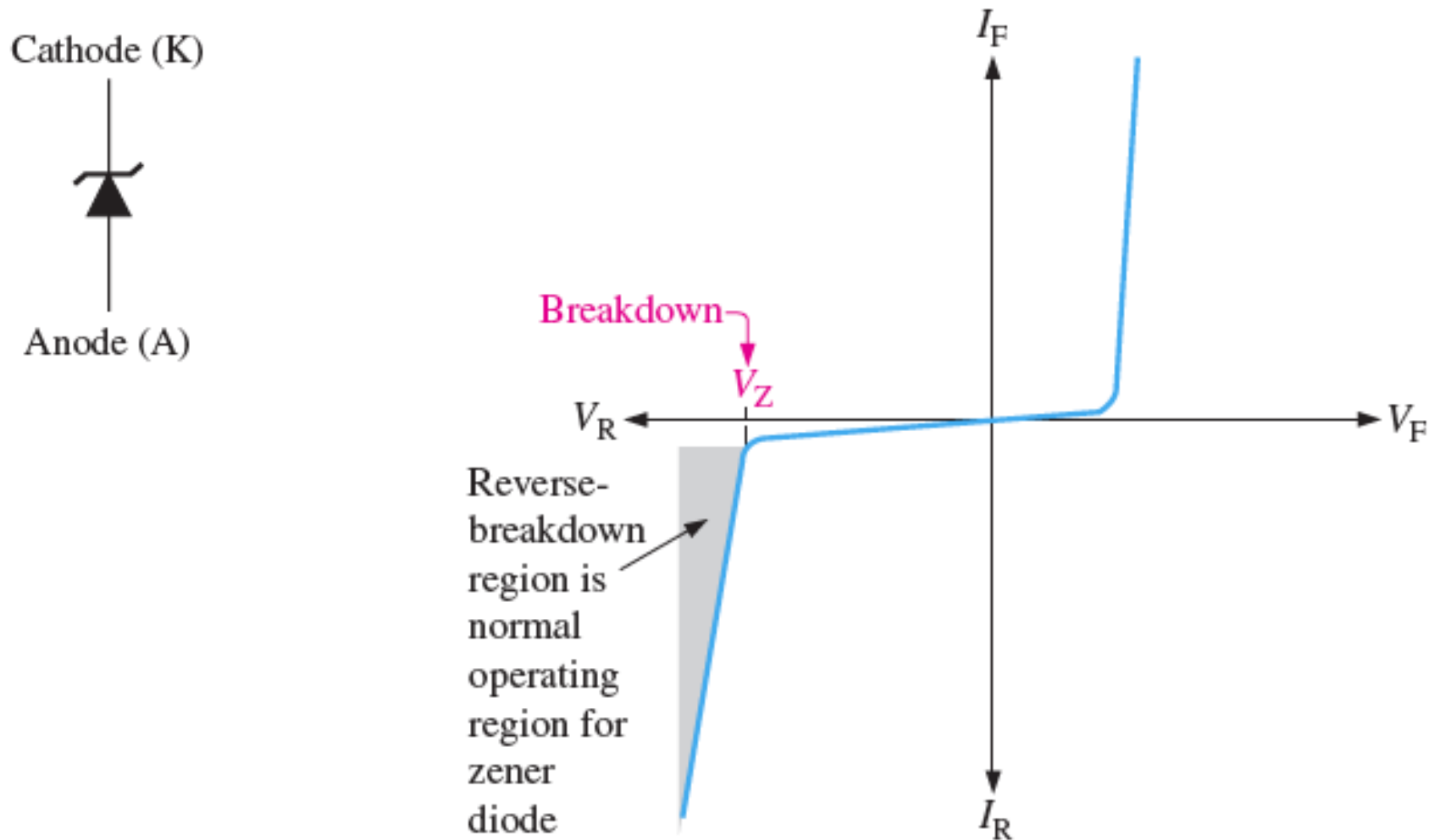
Otros autores definen la Regulación de línea como la variación del voltaje de salida respecto a la variación del voltaje de entrada. Según Floyd:

$$\text{Line regulation} = \left( \frac{\Delta V_{\text{OUT}}}{\Delta V_{\text{IN}}} \right) 100\%$$

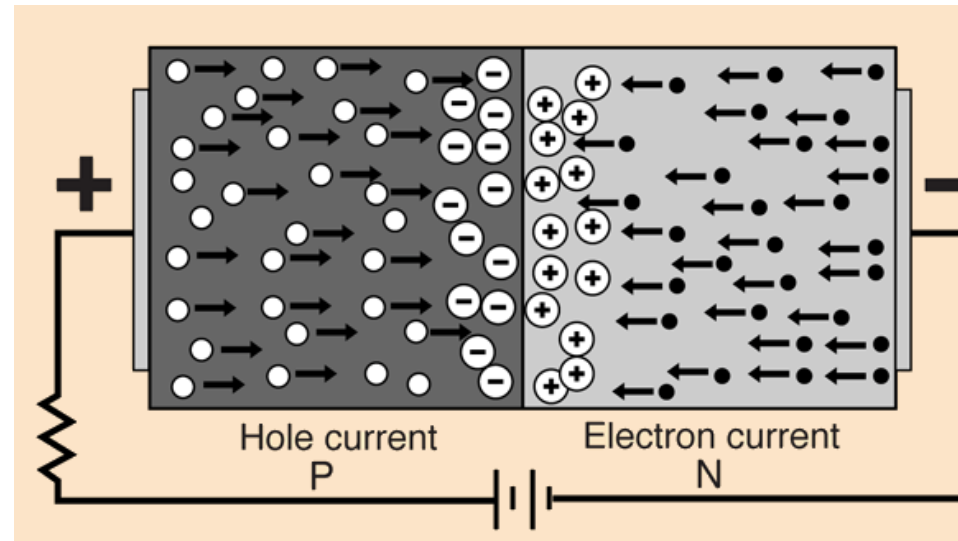
Igualmente, la calidad del Regulador es mejor a menor Regulación de Línea.

## REGULADOR ELEMENTAL: EL DIODO ZENER

El diodo zener es un dispositivo de juntura PN diseñado para operar en la región inversa, en la zona de ruptura.



# LA JUNTURA PN (DIODO) EN POLARIZACIÓN DIRECTA



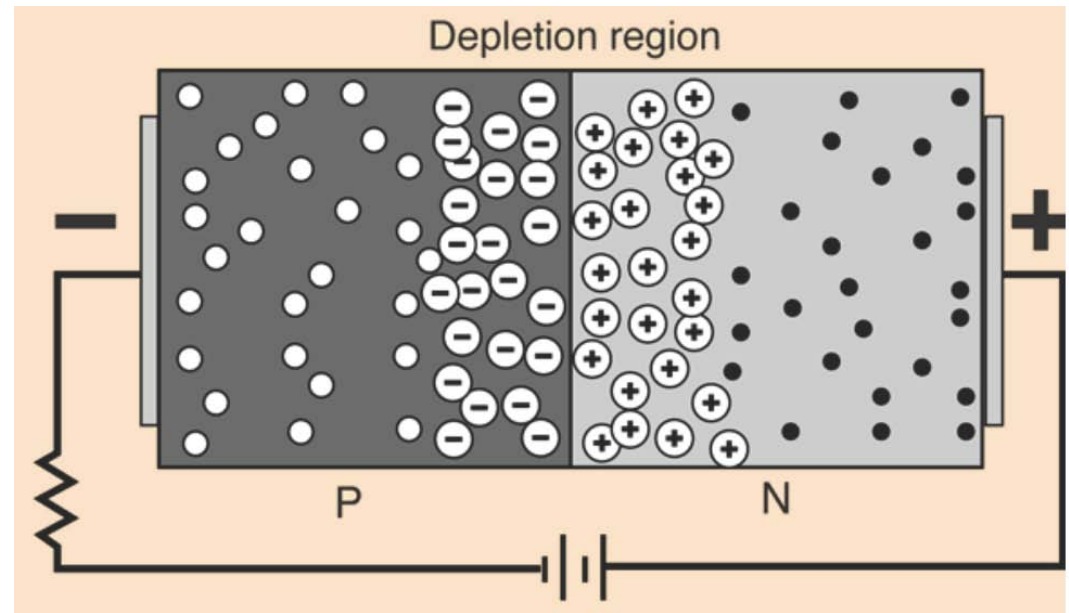
Disminuye la barrera de potencial  $V_0$ , lo cual hace que aumente la corriente de difusión tanto de los huecos como de los electrones, haciendo que circule una corriente  $I$  de la región P a la región N, donde  $I = I_D - I_S$ .

## LA JUNTURA PN (DIODO) EN POLARIZACIÓN INVERSA

\* Se incrementa el voltaje de juntura  $V_0$ , lo cual hace que aumenten los átomos ionizados y aumenta la zona de carga espacial.

\* Inicialmente se produce una corriente inversa debido al número de portadores que abandonan la zona de carga espacial.

\* Una vez en equilibrio, continúa circulando una corriente comparativamente pequeña, denominada corriente inversa del dispositivo.

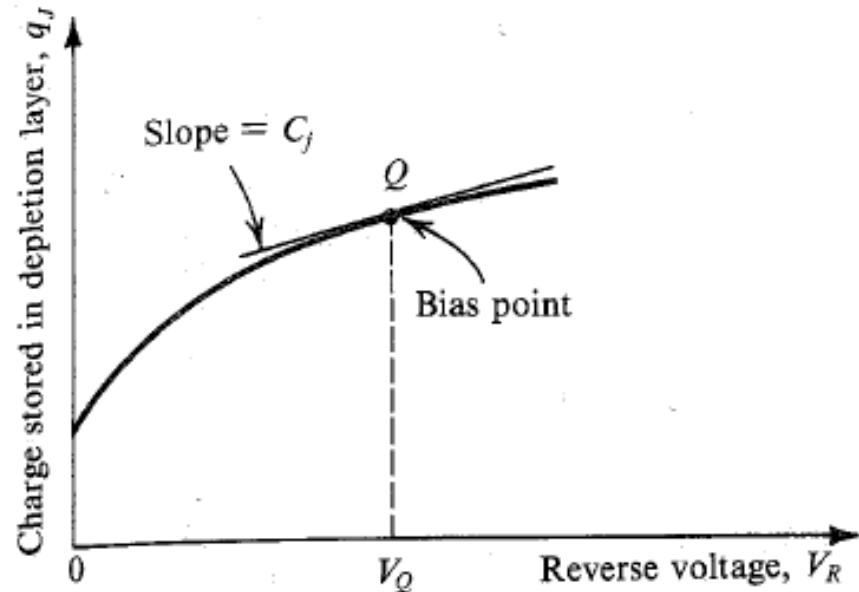




## CAPACITANCIA DE JUNTURA

Al tener dos áreas cargadas, una con voltaje positivo y otra con voltaje negativo, se dispone de un condensador en la zona de carga espacial, cuya capacitancia depende del voltaje inverso aplicado.

Aunque la función no es lineal, puede trabajarse con valores de carga directamente proporcionales al voltaje de juntura si se consideran variaciones de voltaje pequeñas alrededor del punto Q.



## **REGIÓN DE RUPTURA (BREAKDOWN) EL DIODO ZENER**

\*Si se sigue aplicando voltaje negativo a la juntura PN se entra en la región de conducción inversa, o ruptura, o breakdown.

\***No todos los tipos de diodos pueden operar en esa zona.** Puede ser destructivo si se sobrepasa la capacidad de disipación máxima de la juntura.

\* Los diodos que presentan esta característica se denominan **diodos zener.**

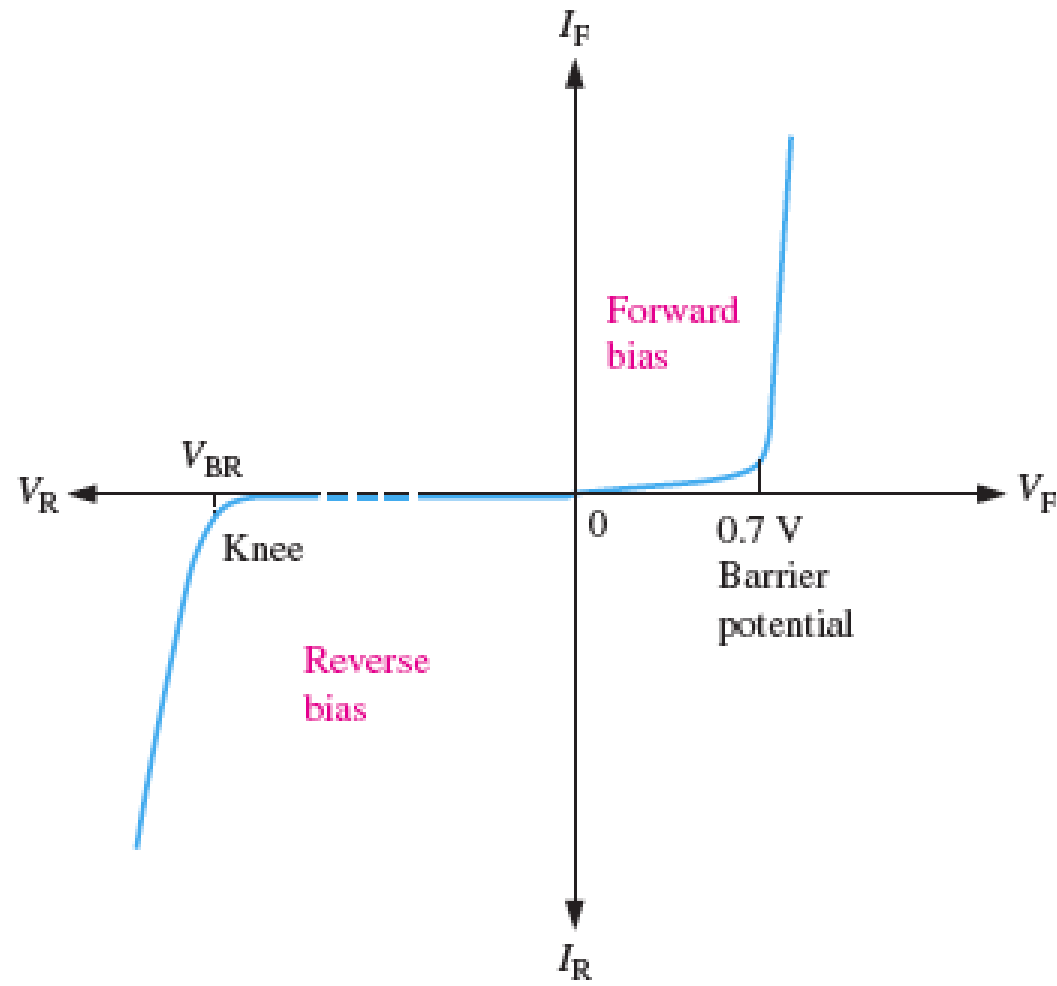
\* La ruptura se puede deber al **efecto avalancha o al efecto zener.**

**\*El efecto avalancha** ocurre cuando el voltaje inverso aplicado introduce suficiente energía para que **los portadores choquen con los iones**, rompiendo un enlace covalente, lo cual genera un hueco y un electrón que se mueven en direcciones opuestas, produciendo a su vez nuevos huecos y electrones, lo cual da origen a una corriente externa con muy poco cambio en el voltaje de juntura.

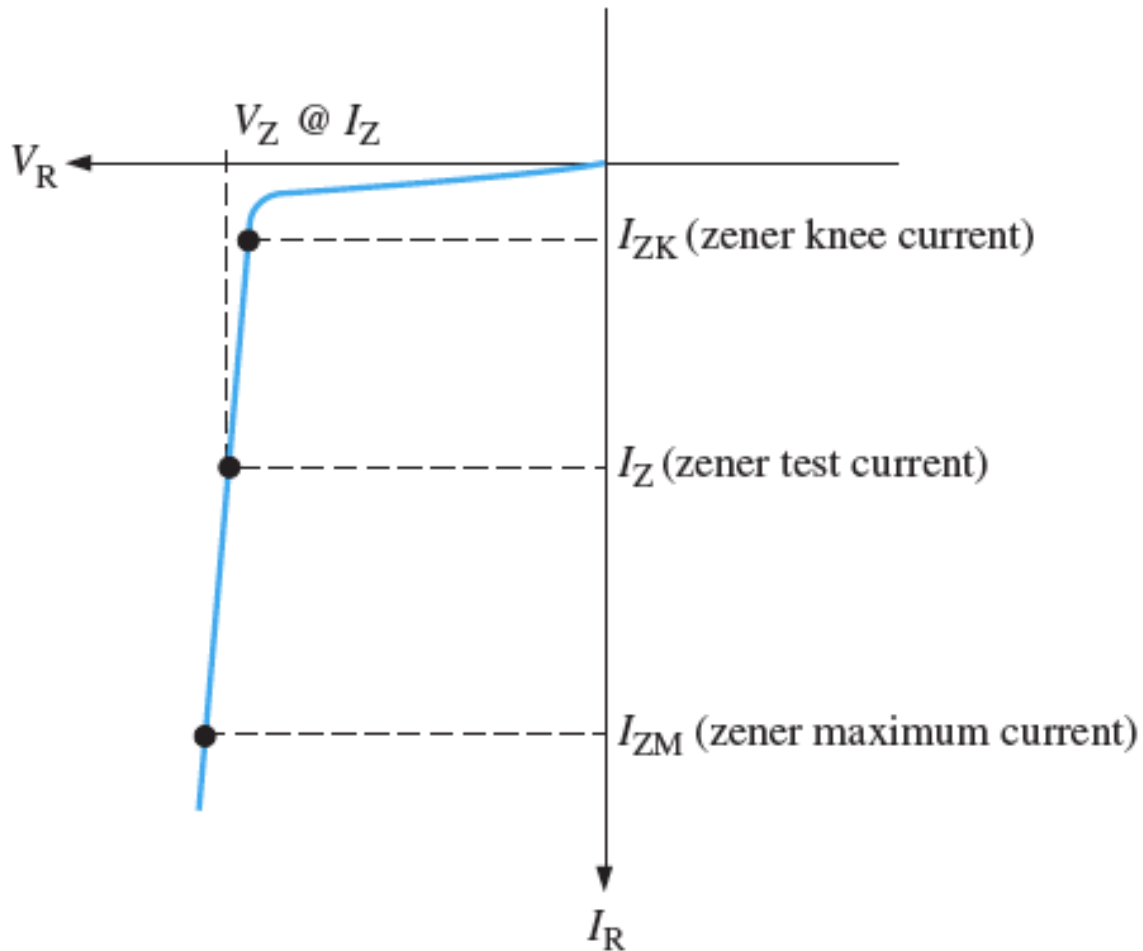
**\*El efecto zener** ocurre cuando el campo es mucho mas intenso y la energía introducida es tan elevada que los **enlaces covalentes se rompen** sin que haya colisión. El incremento del voltaje de juntura es muy reducido.

- \* Dispositivos con voltajes de ruptura menores a 5V: zener
- \* Dispositivos con voltajes de ruptura mayores a 8V: avalancha
- \* Dispositivos con voltajes de ruptura entre 5 y 8V: ambos

# RELACIÓN CORRIENTE-VOLTAJE DE LA JUNTURA PN PARA DIODOS ZENER



# CARACTERÍSTICAS DE RUPTURA (BREAKDOWN)

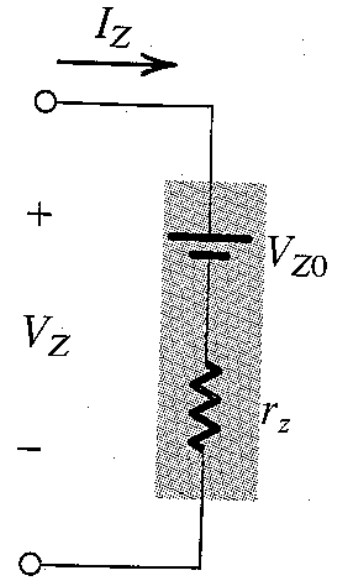
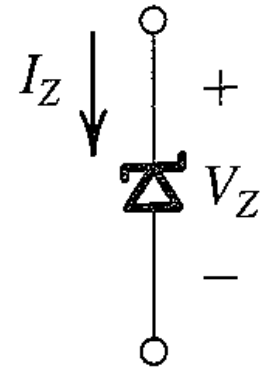
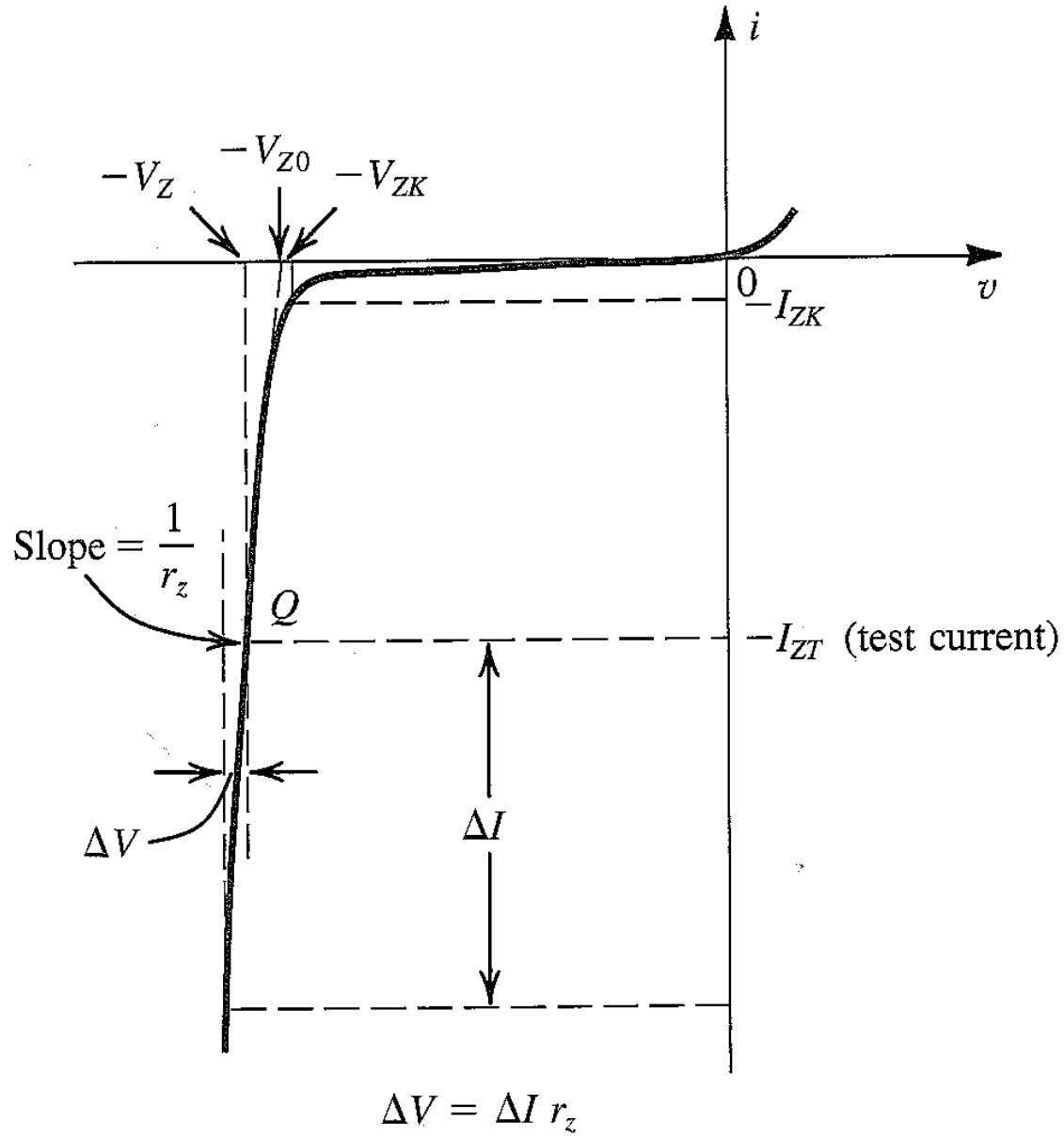


Corriente de rodilla  $I_{ZK}$   
(knee current)

Corriente de prueba:  
El zener se especifica  
con  $V_Z @ I_Z$

Corriente máxima  $I_{ZM}$

# EL DIODO ZENER



## PARAMETROS DEL DIODO ZENER

$V_{Z0}$ : Fuente de voltaje en el modelo del zener.

$V_{ZK} - I_{ZK}$  : El fabricante especifica un valor de voltaje del zener identificado como el voltaje de rodilla para una corriente dada.

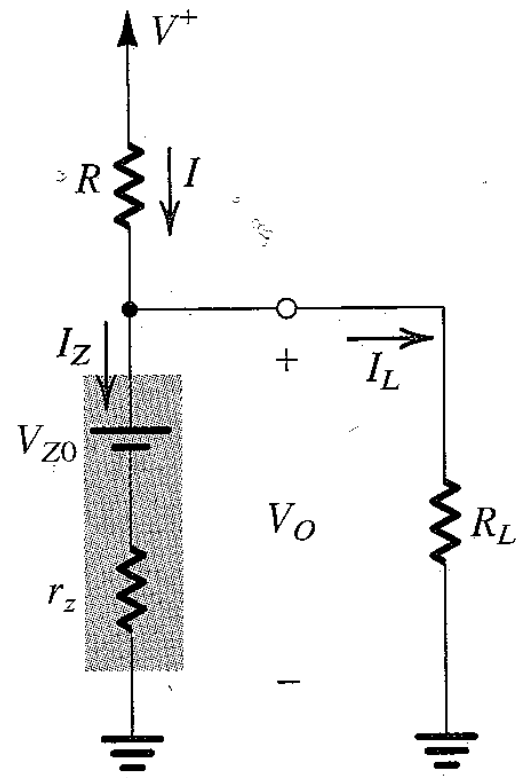
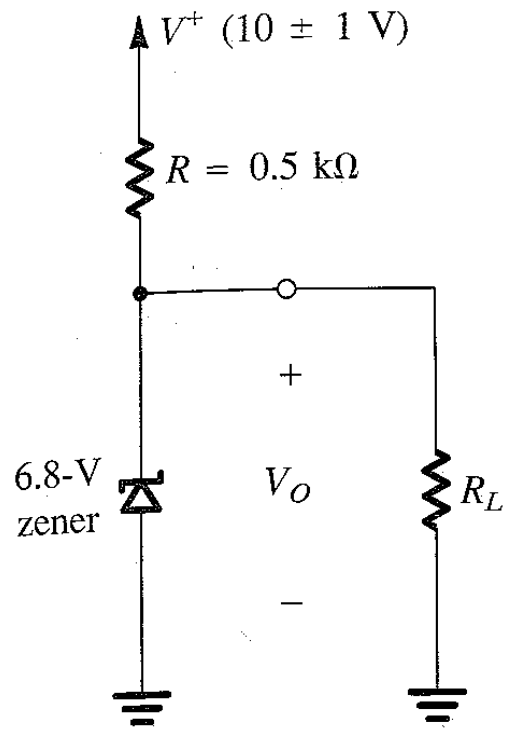
$V_Z - I_{ZT}$  : El fabricante especifica un voltaje de zener donde el dispositivo ya está operativo en la región de zener para una corriente dada  $I_{ZT}$ . Los valores  $V_Z - I_{ZT}$  definen el punto Q en la gráfica.

$r_z$ : Resistencia dinámica o resistencia incremental del zener en el punto de operación Q. Se cumple que  $\Delta V = r_z \Delta I$

$P_z \text{ max}$  : El fabricante especifica la potencia máxima que determina la corriente máxima que puede circular por el dispositivo.

Si  $V_{Z0}$  es el punto en el cual la línea recta definida por  $1/r_z$  intersecta el eje horizontal, el zener se puede modelar con una fuente de voltaje  $V_{Z0}$  en serie con una resistencia  $r_z$ .  $V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$ .

# REGULACIÓN CON EL DIODO ZENER



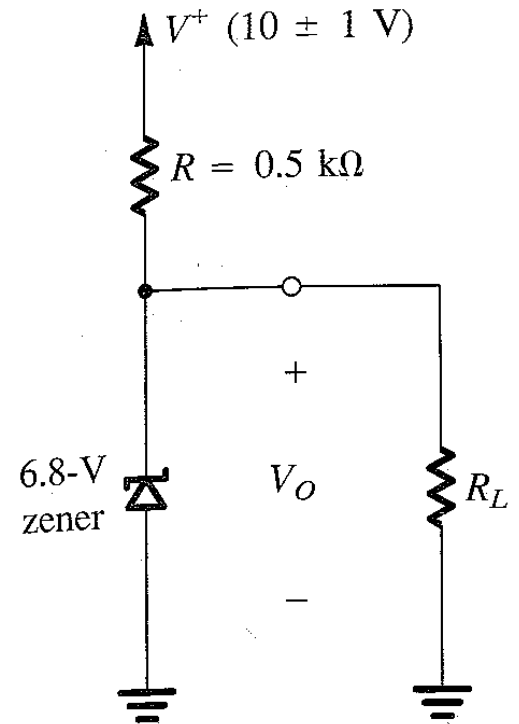
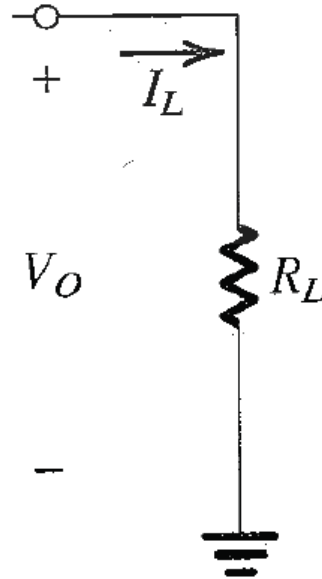
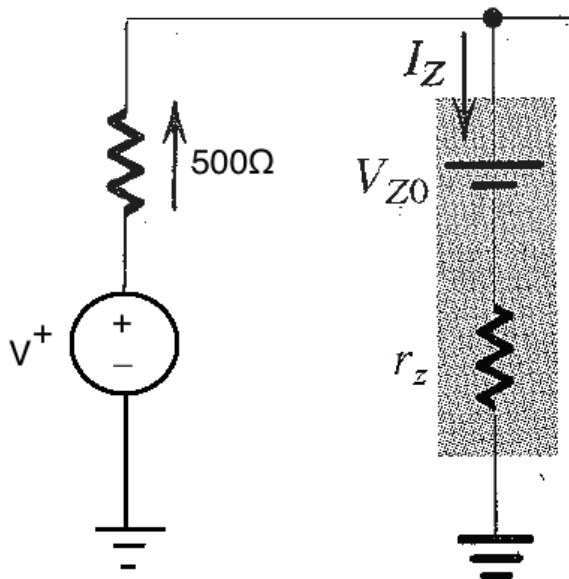


## EJERCICIO 1: REGULACIÓN CON EL DIODO ZENER

En el circuito, las especificaciones del zener son:

$V_Z = 6,8V$  a  $I_Z = 5 \text{ mA}$ ;  $r_Z = 20\Omega$ ;  $I_{ZK} = 0,2 \text{ mA}$

- Calcule  $V_0$  sin carga y con  $V^+ = 10 \text{ V}$
- Determine el cambio en  $V_0$  cuando  $V^+ = \pm 1V$
- Determine el cambio en  $V_0$  cuando  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$

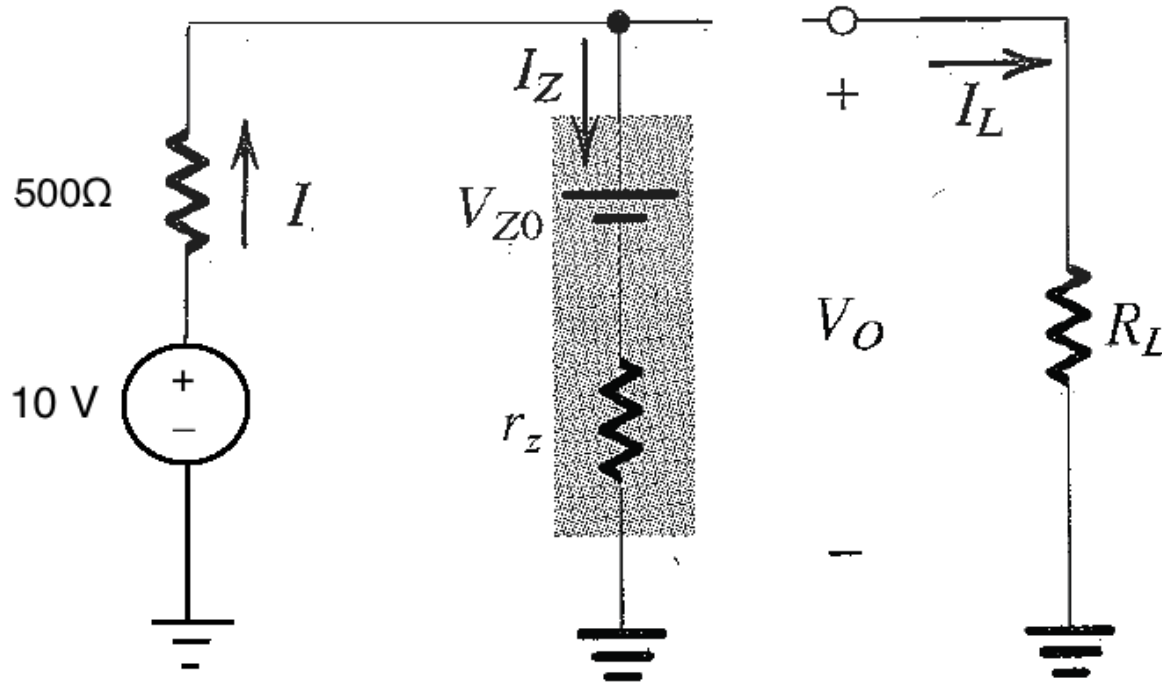


$$V_0 = V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

$$V_{Z0} = V_Z - r_Z I_Z =$$

$$= 6,8V - 0,02k\Omega \times 5mA = 6,7V$$

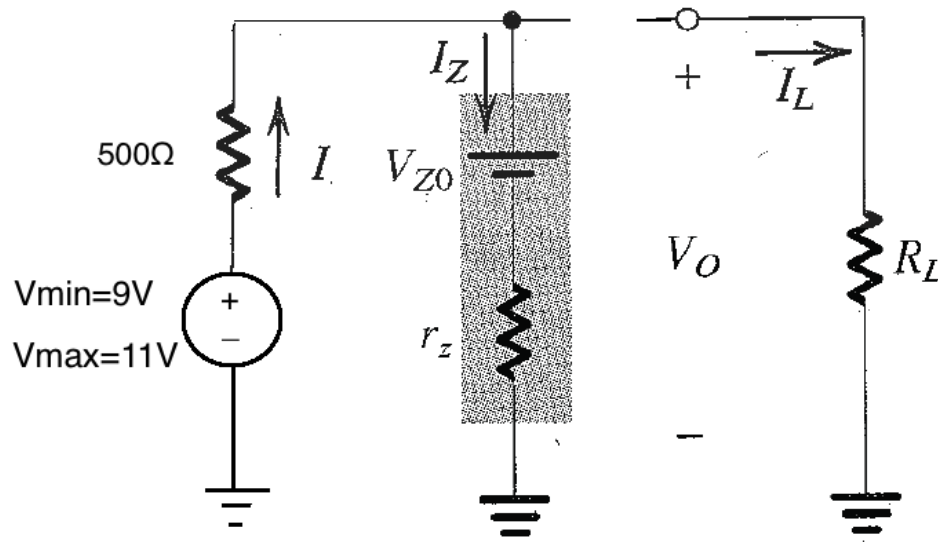
a) Cuando no hay carga y la fuente  $V^+$  es 10V



$$I_z = I = \frac{V^+ - V_{z0}}{R + r_z} = \frac{10V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 6,35mA$$

$$V_z = V_{z0} + r_z I_z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 6,35mA = 6,83V = V_{o10}$$

b) Cuando la fuente  $V^+$  varía  $\pm 1V$ , o sea, entre 9V y 11V



Cuando la fuente es igual a 9V:

$$I_Z = I = \frac{V^+ - V_{ZO}}{R + r_z} = \frac{9V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 4,42mA$$

$$V_Z = V_{ZO} + r_z I_Z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 4,42mA = 6,79V = V_O$$

Cuando la fuente es igual a 11V:

$$I_z = I = \frac{V^+ - V_{z0}}{R + r_z} = \frac{11V - 6,7V}{0,5k\Omega + 0,02k\Omega} = 8,27mA$$

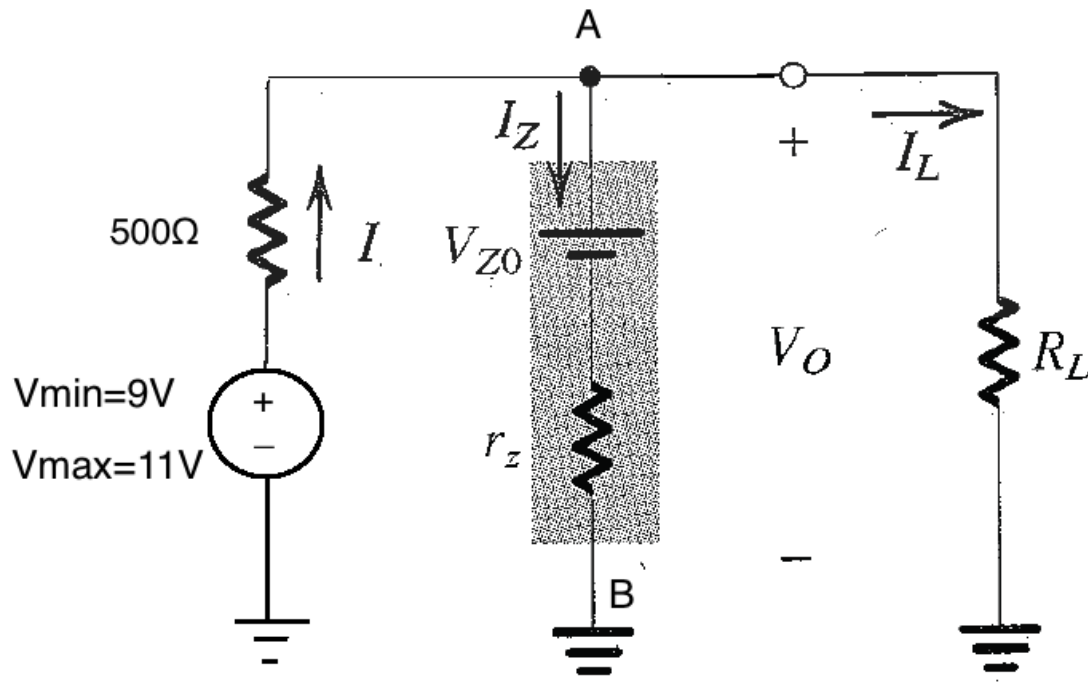
$$V_z = V_{z0} + r_z I_z = 6,7V + 0,02k\Omega \times 8,27mA = 6,87V = V_{o11}$$

Por lo tanto

$$\Delta V_o = V_{o11} - V_{o9} = 6,87V - 6,79V = 76,92mV$$

O también  $\Delta V = \pm 38,46mV$

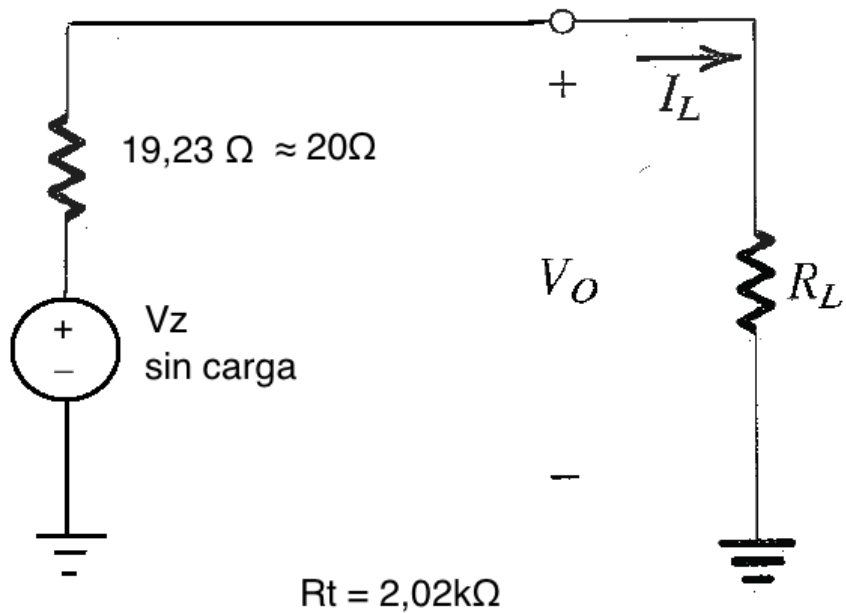
c) Cuando está conectada la carga  $R_L = 2\text{ k}\Omega$  y  $V^+$  varía  $\pm 1\text{V}$



Hay que calcular el circuito Thevenin equivalente entre A y B:

Voltaje de Thevenin: Voltaje en el zener sin carga, ya calculado para cada valor de  $V^+$

Resistencia de Thevenin:  $R // r_z = 500\Omega // 20\Omega = 19,23\Omega \approx 20\Omega$



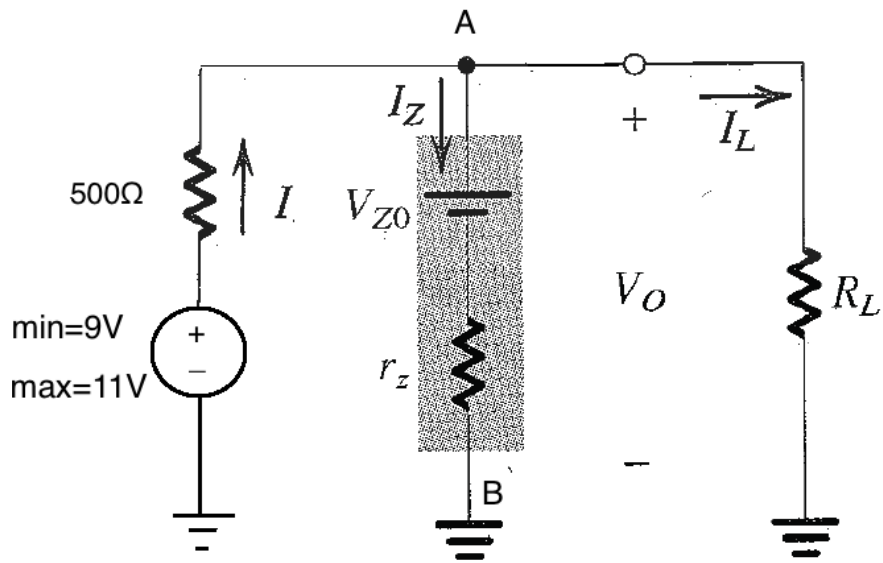
**Para 10 V :**

$$V_Z \text{ sin carga} = V_{O10} = 6,83V$$

$$R_t = 2k\Omega + 20\Omega = 2,02 k\Omega$$

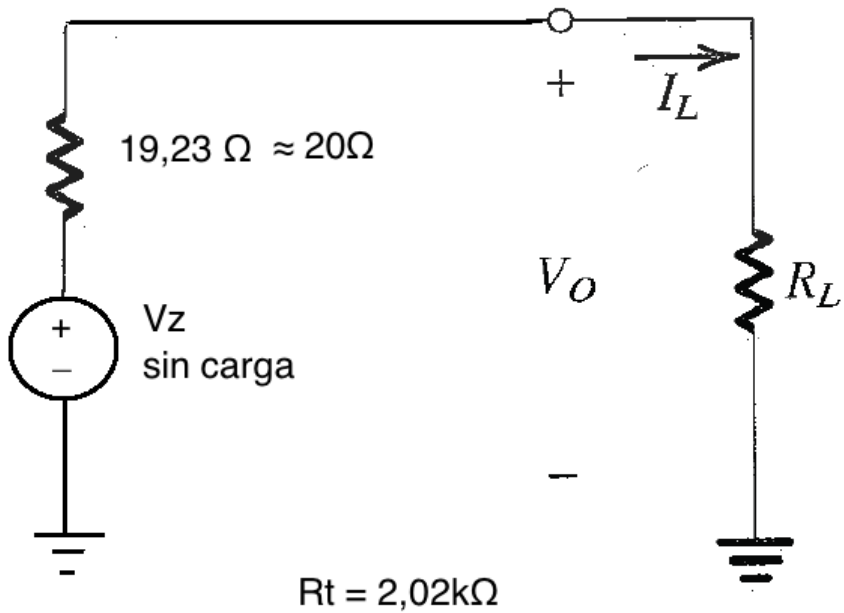
$$I_L = 6,83V / 2,02k\Omega = 3,38mA$$

$$V_O = 2k\Omega \times 3,38mA = 6,76V = V_Z$$



Volviendo al modelo del zener:

$$I_Z = \frac{6,76V - 6,7V}{0,02k\Omega} = 3mA$$



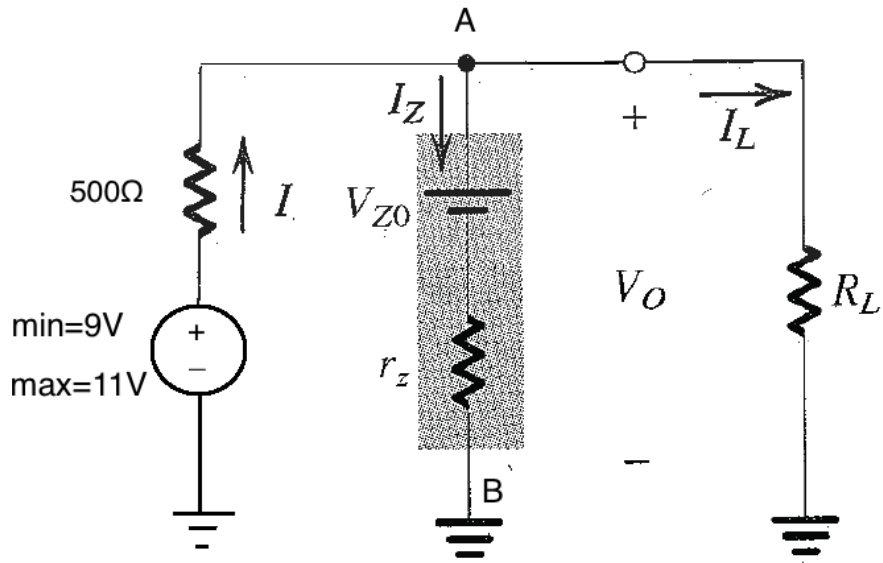
**Para 9 V :**

$$V_Z \text{ sin carga} = V_{O9} = 6,79V$$

$$R_t = 2k\Omega + 20\Omega = 2,02 k\Omega$$

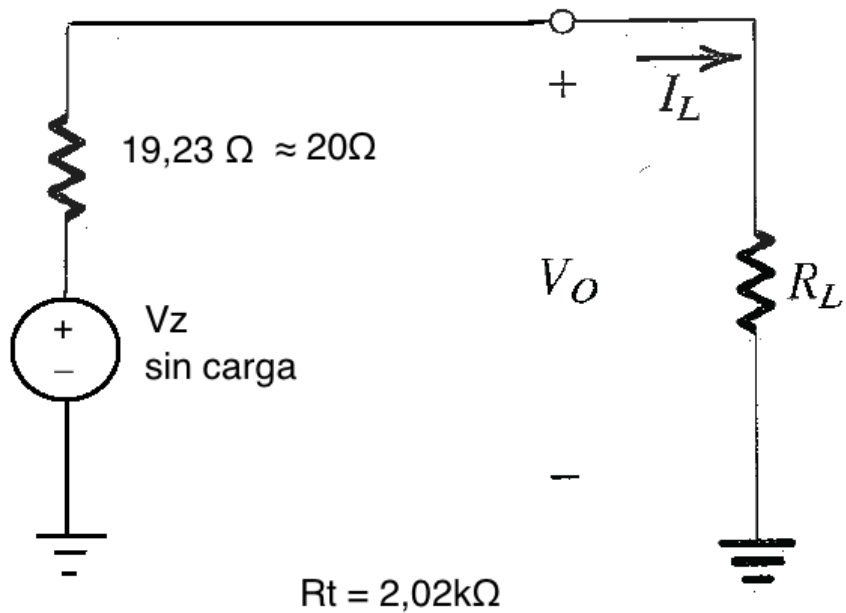
$$I_L = 6,79V / 2,02k\Omega = 3,36mA$$

$$V_O = 2k\Omega \times 3,36mA = 6,72V = V_Z$$



**Volviendo al modelo del zener:**

$$I_Z = \frac{6,72V - 6,7V}{0,02k\Omega} = 1,14mA$$



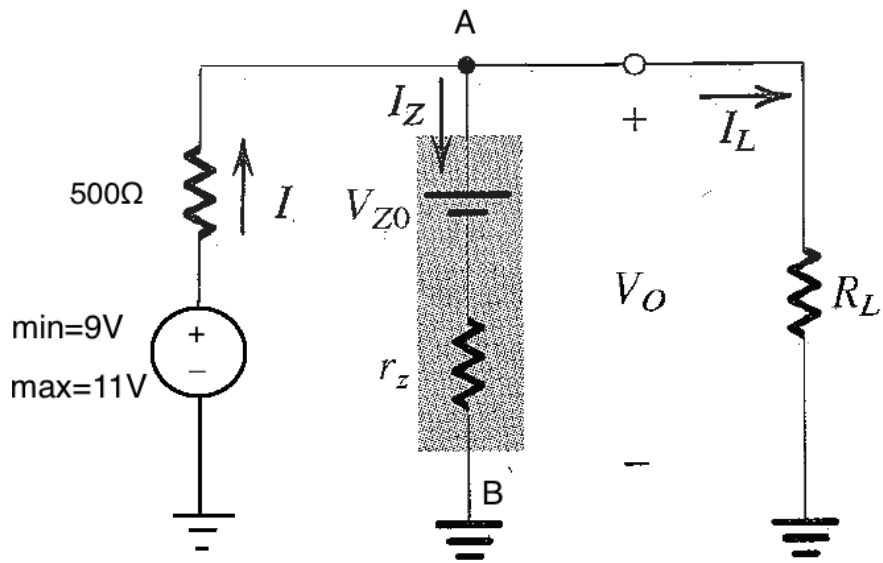
**Para 11 V :**

$$V_Z \text{ sin carga} = V_{O11} = 6,87 \text{ V}$$

$$R_t = 2 \text{ k}\Omega + 20 \Omega = 2,02 \text{ k}\Omega$$

$$I_L = 6,87 \text{ V} / 2,02 \text{ k}\Omega = 3,40 \text{ mA}$$

$$V_O = 2 \text{ k}\Omega \times 3,40 \text{ mA} = 6,80 \text{ V} = V_Z$$



Volviendo al modelo del zener:

$$I_Z = \frac{6,80 \text{ V} - 6,7 \text{ V}}{0,02 \text{ k}\Omega} = 5,10 \text{ mA}$$



La variación de voltaje total en la salida (terminales del zener) es:

$$\Delta V = 6,80V - 6,72V = 80mV$$

La corriente máxima por el zener circula cuando no está conectada la carga y la fuente es 11V:  $I_{zmax} = 8,27 \text{ mA}$

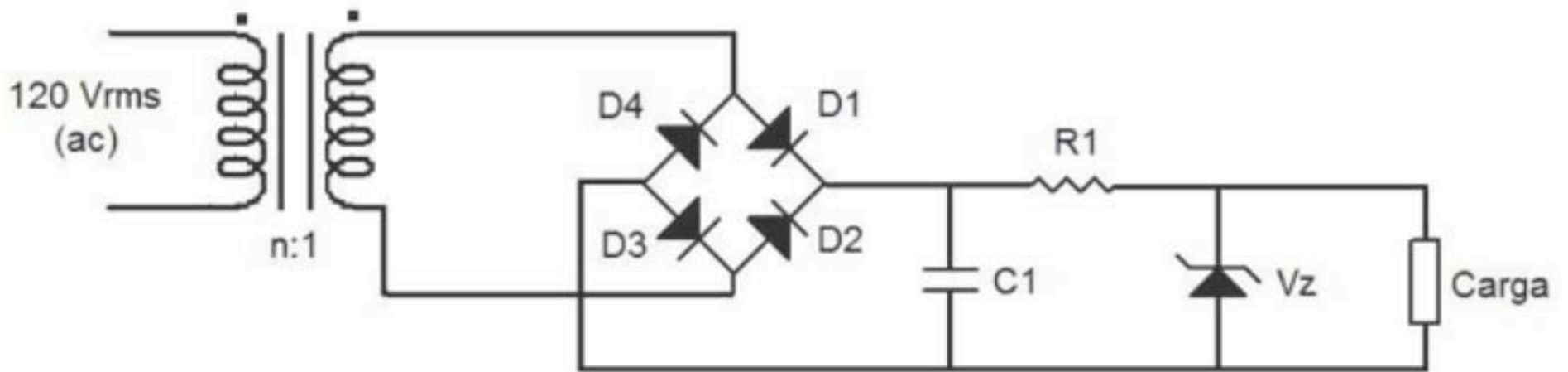
Para esa corriente habíamos calculado que el voltaje de zener es:

$$V_{O11} = 6,87V = V_{zmax}$$

La potencia máxima en el zener es  $P_{max} = I_{zmax} V_{zmax} = 56,81 \text{ mW}$

**La potencia máxima nunca debe sobrepasar la especificación dada por el fabricante**

# FUENTE DE VOLTAJE DC REGULADA CON DIODO ZENER



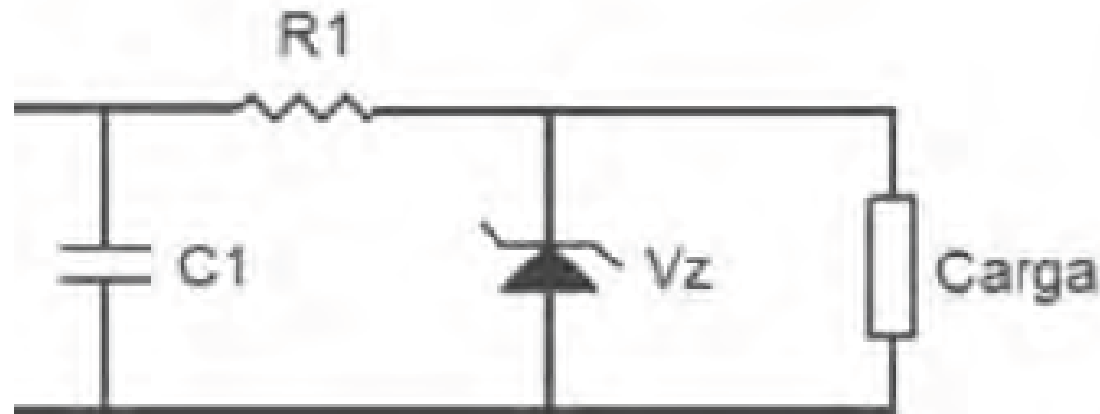
## EJERCICIO 2

Se tiene una fuente regulada en la que el voltaje en el condensador varía entre  $V_{C_{\max}} = 15,57V$  y  $V_{C_{\min}} = 13,46V$ .

Resistencia R1:  $27\Omega$ . Resistencia de carga:  $240\Omega$   $I_{\text{carga}} = 50 \text{ mA}$

Parámetros zener:  $V_Z = 12V @ I_Z = 10\text{mA}$ ;  $r_Z = 20\Omega$ ;  $I_{Z_{\min}} = 0,5\text{mA}$ ;  $P_Z = 2W$

De los datos:  $I_L = 12V / 240\Omega = 50\text{mA}$



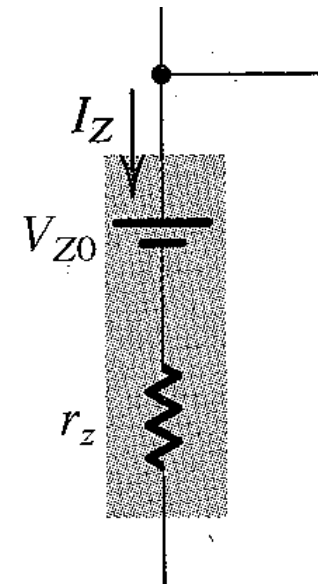
**a) Determine si el zener está siempre en su región de regulación y dentro del rango de potencia que puede disipar.**

Se calcula el modelo del zener

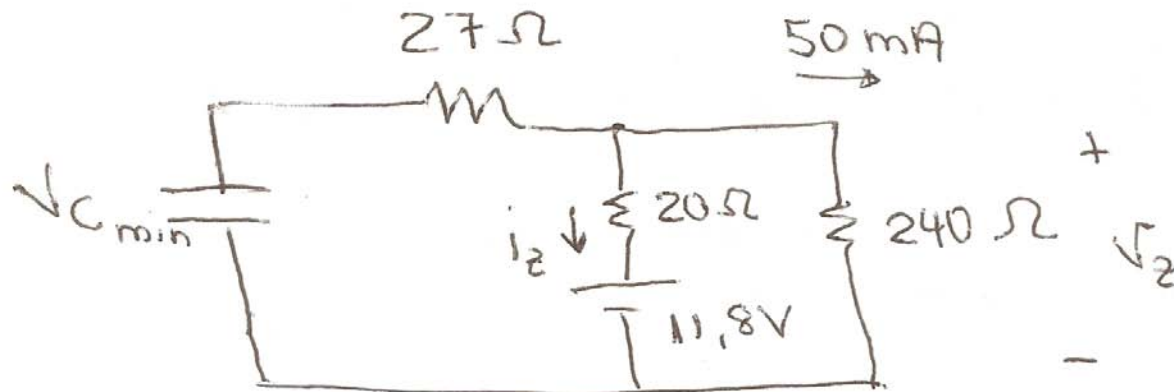
$$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

$$V_{Z0} = 12V - 20\Omega \times 10mA = 11,8V$$

$$r_Z = 20\Omega$$



La corriente por el zener es mínima cuando el voltaje de entrada es mínimo y la corriente por la carga es máxima.

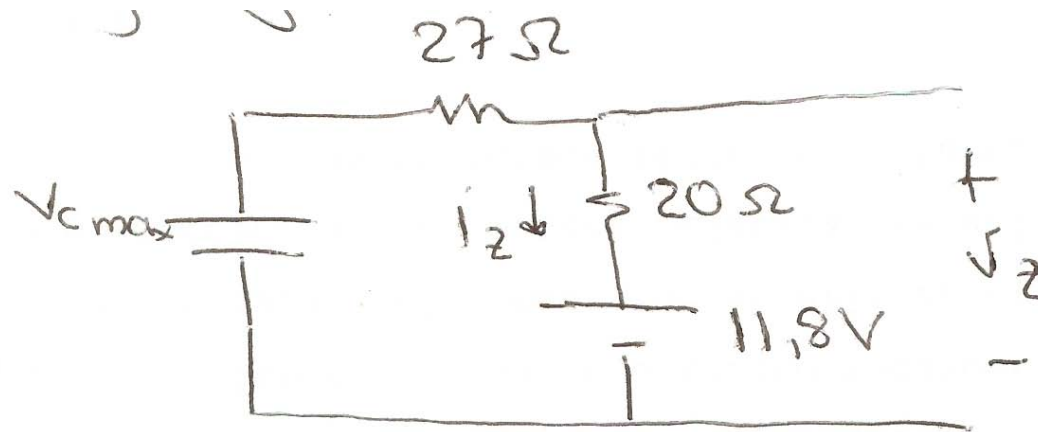


Del circuito:  $V_{C_{min}} = 27\ \Omega (i_z + 50\text{mA}) + 12\text{V}$

$$i_z = \frac{V_{C_{min}} - 12\text{V}}{0,027\text{k}\Omega} - 50\text{mA} = \frac{13,46\text{V} - 12\text{V}}{0,027\text{k}\Omega} - 50\text{mA} = 4,07\text{mA}$$

Dado que la corriente mínima es  $0,5\text{mA}$  el zener permanece en su región de regulación.

El zener disipa la mayor potencia cuando se desconecta la carga y el voltaje en el condensador es máximo ( $V_{C_{max}}$ ).



$$i_{z_{max}} = \frac{V_{C_{max}} - V_{z0}}{R_1 + r_z} = \frac{15,57V - 11,8V}{27\Omega + 20\Omega} = 88,21mA$$

$$V_{z_{max}} = V_{z0} + i_{z_{max}} r_z = 11,8V + 88,21mA \times 20\Omega = 13,56V$$

$$P_{z \max} = V_{z \max} i_{z \max} = 13,56V \times 88,21mA = 1,2W$$

**El zener es de 2W, por lo tanto está siempre en su región de regulación y dentro del rango de potencia que puede disipar.**

**b) Para el mismo circuito determine el factor de rizado en el zener y en el condensador.**

$$F_r = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}} \times 100\%$$

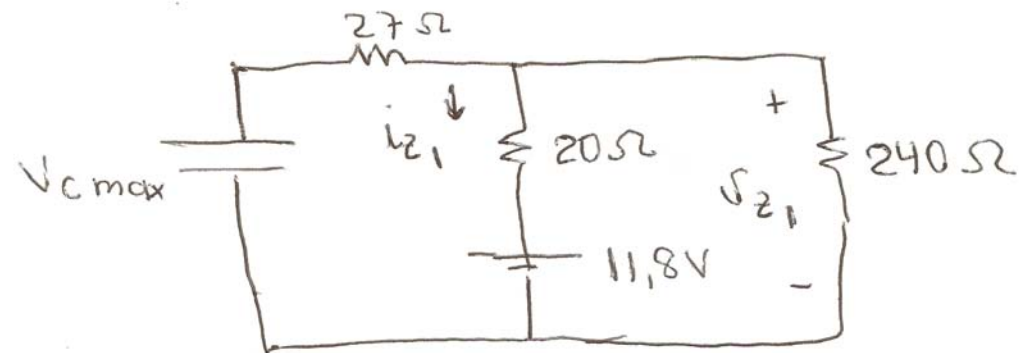
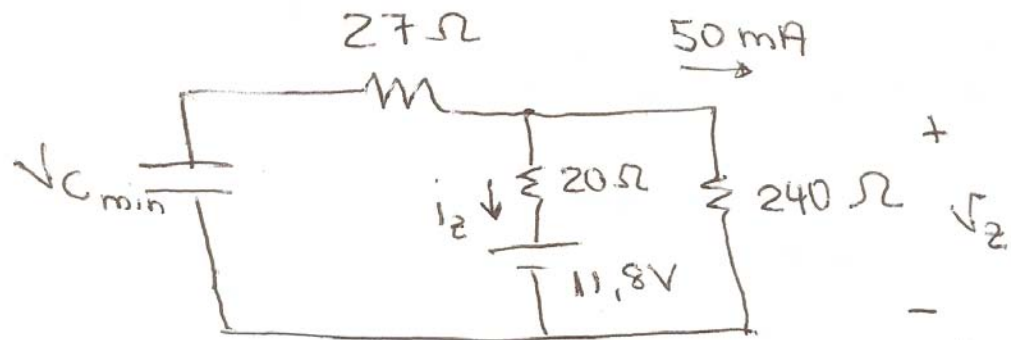
Para el condensador

$$F_{r-\text{condensador}} = \frac{V_{C \max} - V_{C \min}}{V_{C \max}} \times 100\% = \frac{15,57 - 13,46}{15,57} \times 100\% = 13,55\%$$

Para el zener

Cuando el voltaje de entrada es  $V_{Cmin}$  y la corriente de carga es 50mA, consideramos que el voltaje del zener es 12V (fórmula inicial), que corresponde a  $V_{0min}$ .

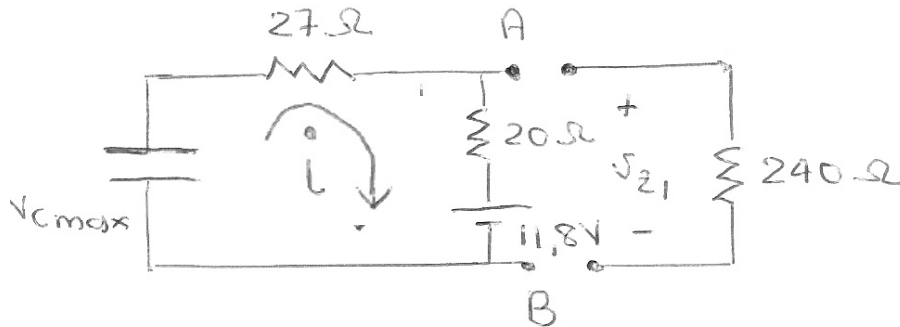
Cuando el voltaje de entrada es  $V_{Cmax}$  y la carga está conectada, hay que calcular el voltaje de zener, que es igual al voltaje en la carga para esta condición, correspondiente a  $V_{0max}$ .





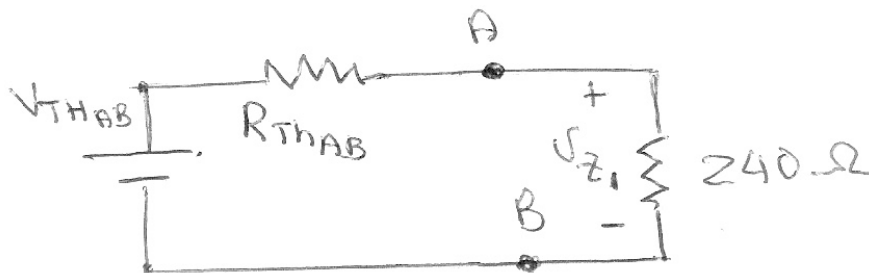
Calculamos el equivalente Thevenin entre A y B:

$$i = \frac{V_{C_{\max}} - 11,8V}{27\Omega + 20\Omega} = \frac{15,57V - 11,8V}{0,047k\Omega} = 80,21mA$$



$$V_{THAB} = 11,8V + 80,21mA \times 0,02k\Omega = 13,40V$$

$$R_{THAB} = \frac{27\Omega \times 20\Omega}{27\Omega + 20\Omega} = 11,49\Omega$$



Aplicando divisor de voltaje:

$$V_{O\max} = \frac{240 \times V_{THAB}}{R_{THAB} + 240\Omega} = \frac{240\Omega \times 13,40V}{11,49\Omega + 240\Omega} = 12,79V$$

$$F_{r-zener} = \frac{V_{O\max} - V_{O\min}}{V_{O\max}} = \frac{12,79V - 12V}{12,79V} \times 100\% = 6,16\%$$

## EJERCICIO 3

$$R = 300 \Omega$$

$$V_z = 12V @ 20mA, r_z = 10 \Omega$$

$$I_{zmin} = 1mA, P_{zmax} = 1W$$

Hallar C para  $F_r = 15\%$

Seleccionar C comercial

Calcular:

Corriente pico diodos

Tiempo de conducción

Corriente promedio y Potencia promedio diodos

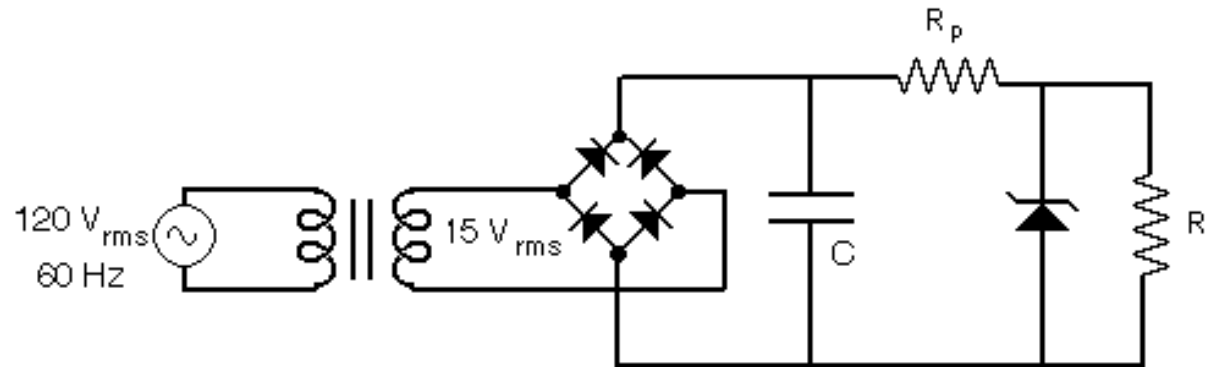
Voltaje inverso diodos

Potencia promedio en la resistencia

Potencia aparente en el transformador

**Seleccionar un valor de  $R_p$  que permita el correcto funcionamiento del regulador. (¿El zener puede operar cuando se desconecta la carga?)**

Determinar la regulación de carga y potencia máxima en la carga.



En el secundario del transformador  $V_{pico} = 15\sqrt{2} = 21,21V$

En el condensador  $V_{max} = 21,21V - 1,4V = 19,81V$

Factor de rizado  $F_r = \frac{V_r}{V_{max}} = 0,15 \Rightarrow V_r = 2,97V \Rightarrow V_{min} = 16,84V$

$$V_{min} = V_{max} \text{sen} \omega t_o \Rightarrow \omega t_o = \text{arcsen} \frac{V_{min}}{V_{max}} = 1,02 \text{rad} \Rightarrow t_o = \frac{1,02}{2\pi 60 \text{Hz}} = 2,69 \text{ms}$$

$$T = \frac{1}{60 \text{Hz}} = 16,67 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{2} = 8,33 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{4} = 4,17 \text{ms} \Rightarrow \frac{T}{4} + t_o = 6,86 \text{ms}$$

Para calcular C aplicamos la ecuación:  
Falta determinar  $I_C$

$$I_C = C \frac{V_r}{\frac{T}{4} + t_o} \Rightarrow C = \frac{I_C \left( \frac{T}{4} + t_o \right)}{V_r}$$

El condensador va a suministrar corriente a la resistencia de carga y al zener a través de la resistencia  $R_p$ . Considerando valores nominales, la corriente por R es  $I_R = 12V/300\Omega = 40 \text{ mA}$ . Dado que  $I_{z\text{min}} = 1\text{mA}$ , vamos a considerar que cuando está regulando, por el zener circulan unos  $5 \text{ mA}$ . Por lo tanto  $I_C = 45 \text{ mA}$ . Con este valor:

$$C = \frac{I_C \left( \frac{T}{4} + t_o \right)}{V_r} = \frac{45\text{mA} \times 6,86\text{ms}}{2,97\text{V}} = 103,9\mu\text{F}$$

El valor es próximo a **100 $\mu\text{F}$** , por lo que escogemos este valor.

Cálculo de la corriente pico en los diodos:

$$I_{dmax} = C \omega V_{max} \cos \omega t_0 + I_{Rmax}$$

$$I_{dmax} = 100\mu F \times 377 \text{ rad} \times 19,81 \text{ V} \cos(377 \times 0,00269) + 0,045 \text{ A} = 0,44 \text{ A}$$

La corriente pico es de 440mA mientras que la de la carga es 40 mA.

Tiempo de conducción de los diodos  $t_c = \frac{T}{4} - t_o = 1,48 \text{ ms}$

Corriente promedio en los diodos  $I_{dprom} = \frac{I_{dmax} t_c}{T} = \frac{440 \text{ mA} \times 1,48 \text{ ms}}{16,67 \text{ ms}} = 39,06 \text{ mA}$

Potencia promedio en los diodos  $P_{dprom} = \frac{I_{dmax} V_d t_c}{T} = 27,34 \text{ mW}$

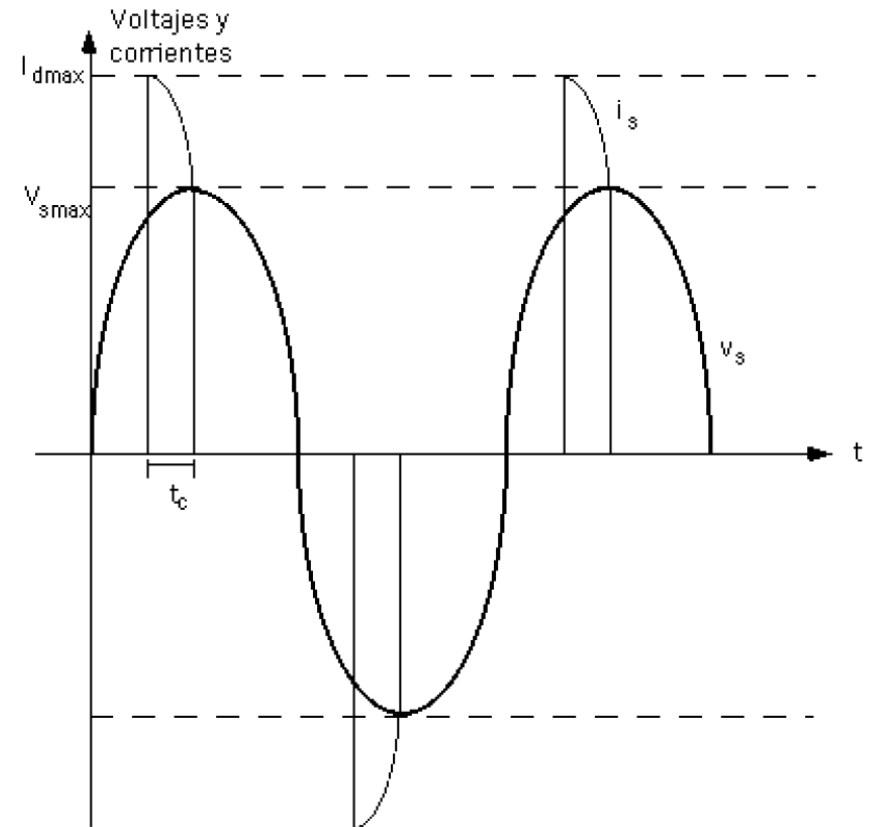
Voltaje pico inverso en los diodos  $PIV = 21,21 \text{ V}$

Potencia aparente en el transformador:

$$P_{aparente} = V_{rms} I_{rms}$$

Forma de onda de la corriente y el voltaje en el secundario del transformador

Aproximamos la corriente a un nivel constante igual a  $I_{dmax}$  durante el tiempo de conducción correspondiente.



$$I_{rmsd} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_c} (I_{dmax})^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} 2(I_{dmax})^2 t_c} = \sqrt{\frac{2 \times (0,44A)^2 \times 1,48ms}{16,67ms}} = 0,19A_{rms}$$

Por lo tanto

$$P_{aparente} = V_{rms_{sec}} I_{rmsd} = 15V_{rms} \times 0,19A_{rms} = 2,8VA$$

## Cálculos del regulador con zener

Cálculo de  $V_{z0}$  para el modelo del zener  $12V@20mA$ ,  $r_z=10\ \Omega$

$$V_z = V_{z0} + i_z r_z \Rightarrow V_{z0} = V_z - i_z r_z = 12V - 20mA \times 0,01k\Omega = 11,8V$$

El valor de  $R_p$  debe ser tal que, cuando el voltaje en el condensador sea mínimo, circule la corriente requerida por la carga  $R$  más una cierta cantidad de corriente por el zener para que se mantenga en la zona de regulación.

Seleccionamos una corriente de  $5mA$  para el zener cuando se tiene la carga de  $300\ \Omega$ . Para esta corriente el voltaje del zener es:

$$V_{z1} = V_{z0} + i_z r_z = 11,8V + 5mA \times 0,01k\Omega = 11,85V$$

Corriente por la carga

$$I_R = \frac{11,85V}{0,3k\Omega} = 39,5mA$$

Corriente total por Rp:  $I_{Rp} = 39,5mA + 5mA = 44,5mA$

Por lo tanto la consideración de 45 mA con la que realizamos los cálculos iniciales es adecuada.

Valor de Rp:  $R_p = \frac{V_{\min} - V_{z1}}{I_{Rp}} = \frac{16,84V - 11,85V}{45mA} = 110,89\Omega$

Tenemos que seleccionar un valor menor que el obtenido. **Rp=100Ω**

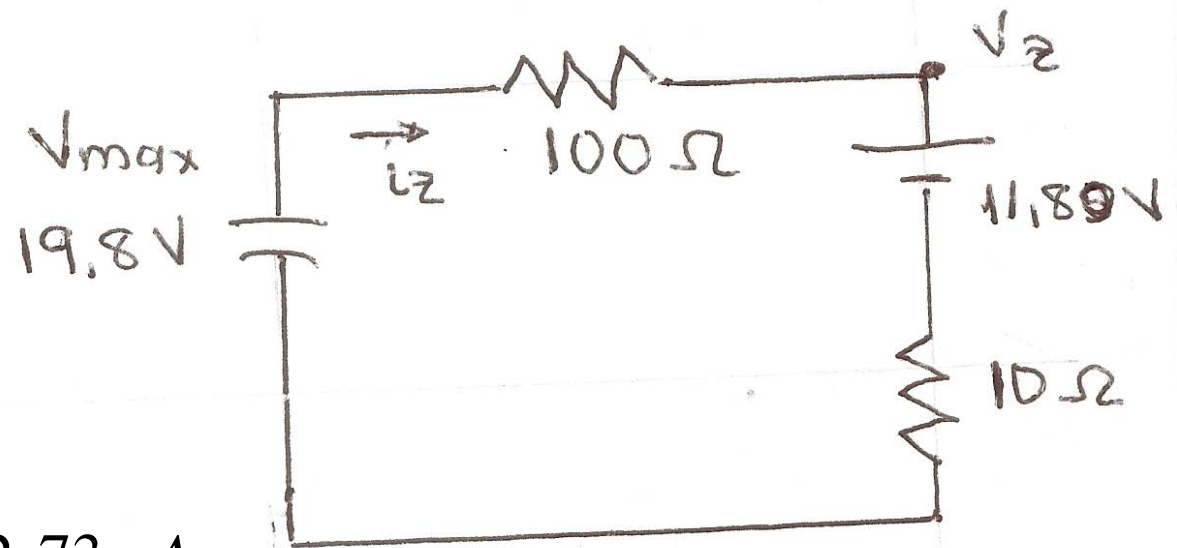
Potencia en Rp :  $P_{Rp} = I_{Rp}^2 R_p = (0,045A)^2 \times 100\Omega = 0,2W$

Puede seleccionarse una resistencia de 100Ω, 0,5W

Para calcular la potencia máxima en el zener: Por el zener circula la máxima corriente cuando el voltaje en el condensador es máximo y se desconecta la carga.



El circuito equivalente es



$$i_Z = \frac{19,8V - 11,8V}{110\Omega} = 72,73mA$$

$$V_Z = 11,8V + 72,73mA \times 0,01k\Omega = 12,53V$$

$$P_Z = V_Z i_Z = 12,53V \times 72,73mA = 911mW = 0,91W$$

El zener va a estar disipando 0,91W. Es un zener de 1W, por lo que está dentro de rango, pero el margen es muy pequeño. Es preferible seleccionar un zener de mayor potencia.

## Regulación de carga

$$R_C = \frac{V_{O_{Imax}} - V_{O_{SC}}}{V_{O_{Imax}}} \times 100\%$$

Voltaje del zener sin carga: 12,53V

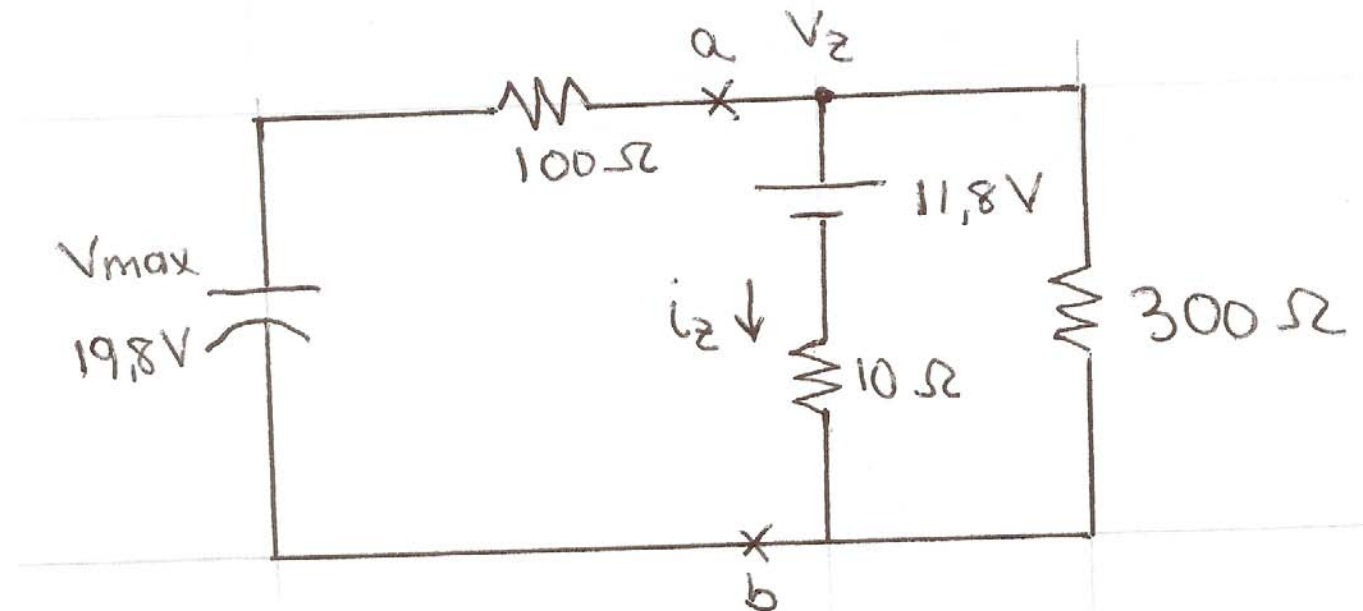
Voltaje del zener a plena carga: 11,85V

$$R_C = \frac{12,53 - 11,85}{11,85} \times 100\% = 5,74\%$$

## Potencia máxima en la carga

Se calcula cuando el voltaje en el condensador es máximo y la carga está conectada.

Circuito cuando el voltaje en el condensador es el máximo

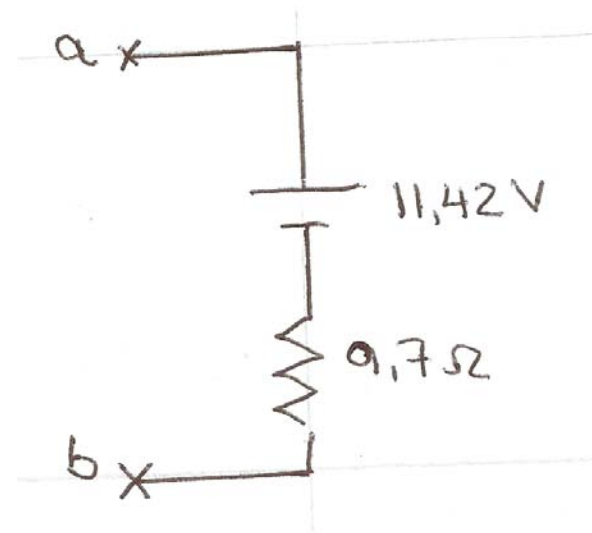
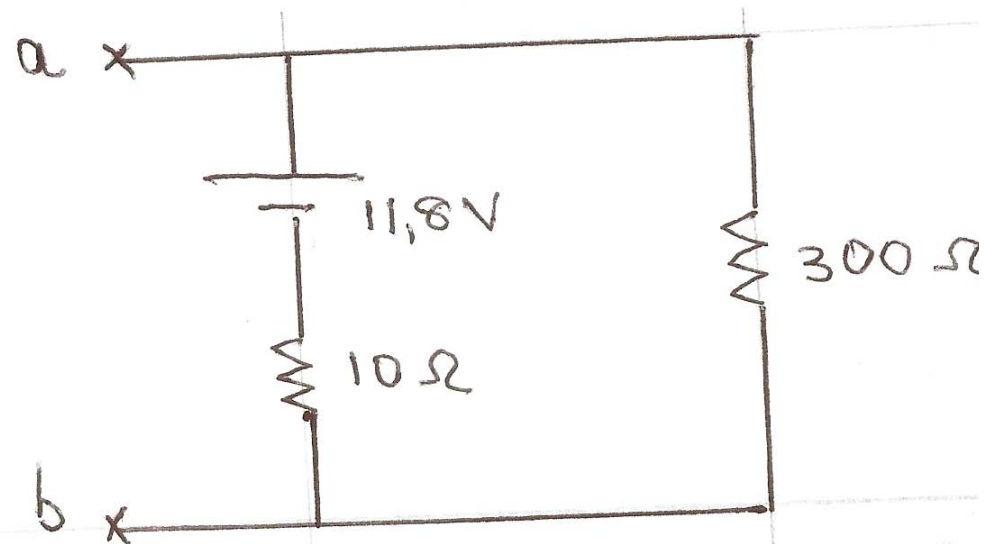


Thevenin entre a y b

$$i = \frac{11,8V}{310\Omega} = 38,06mA$$

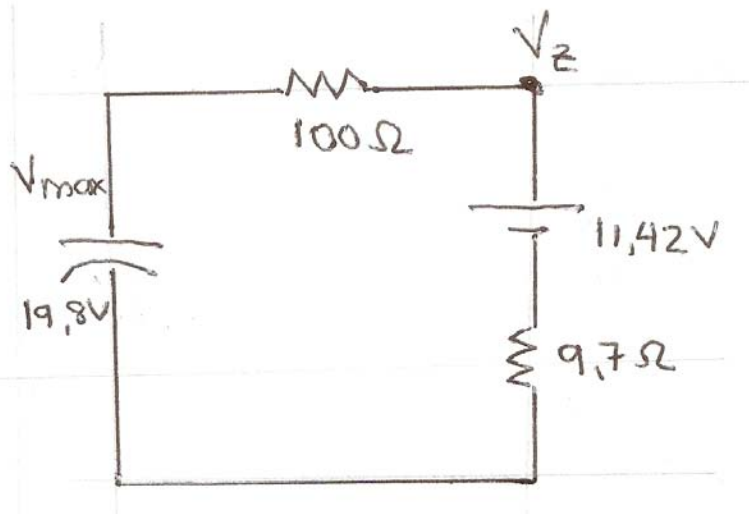
$$V_{TH} = 11,8V - 0,01k\Omega \cdot i = 11,42V$$

$$R_{TH} = 300\Omega // 10\Omega = 9,7\Omega$$



Equivalente Thevenin

Con este equivalente calculamos el voltaje  $V_z$  a plena carga con el voltaje máximo en C



$$i_{Rp} = \frac{19,8V - 11,42V}{0,1097k\Omega} = 76,4mA$$

$$V_z = 11,42V + 0,0097k\Omega \times 76,4mA = 12,16V$$

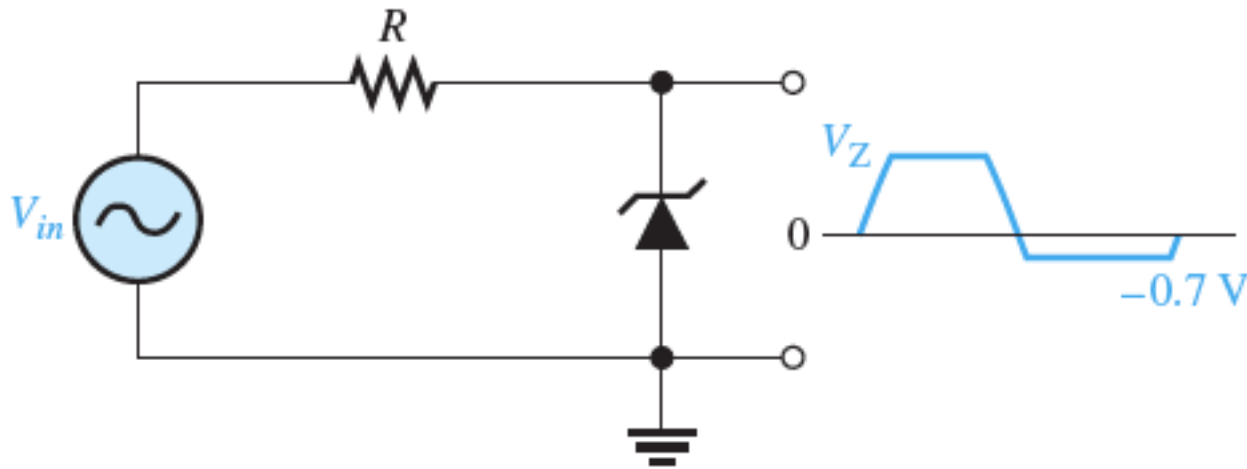
Este es el voltaje máximo en el zener y con la carga de  $300\Omega$  conectada.

La potencia máxima en la carga es

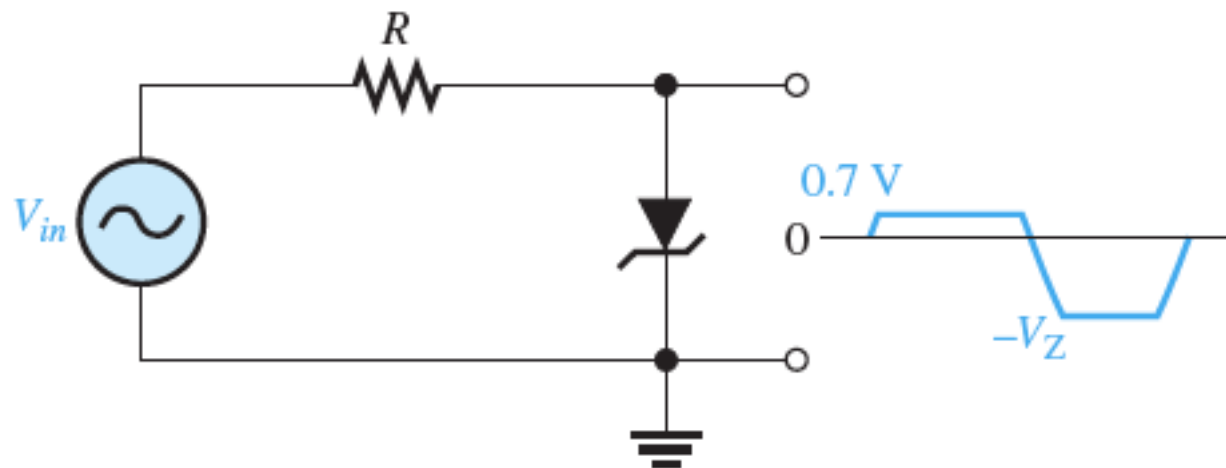
$$P_{RC} = \frac{(12,16V)^2}{300\Omega} = 0,49W$$

Es conveniente que la resistencia de  $300\Omega$  sea capaz de disipar por lo menos  $1W$

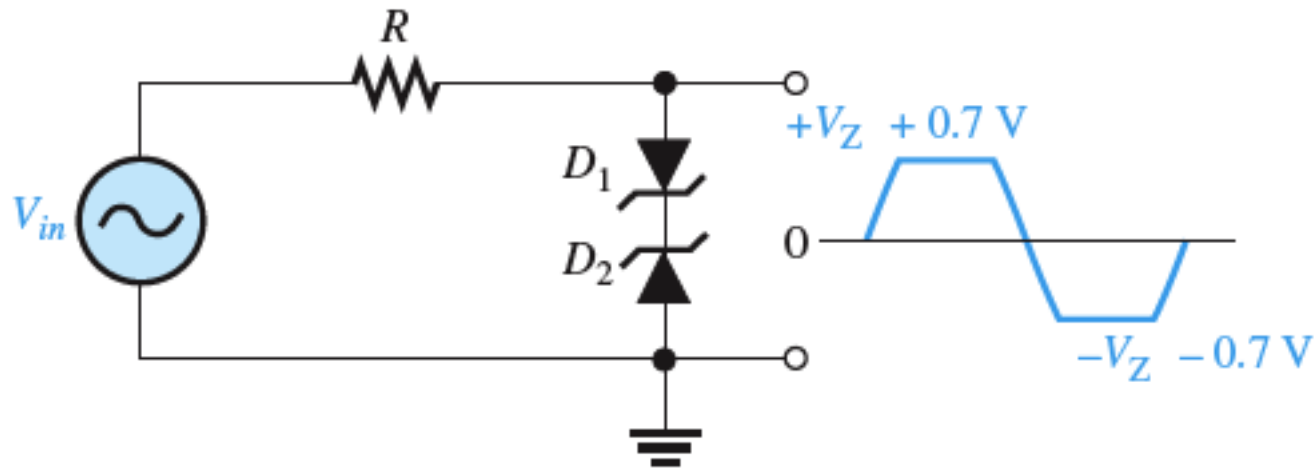
# OTRAS APLICACIONES DEL ZENER. CIRCUITOS LIMITADORES



**Zener en el  
semiciclo positivo  
Diodo en el  
semiciclo  
negativo**



**Diodo en el  
semiciclo positivo  
Zener en el  
semiciclo negativo**

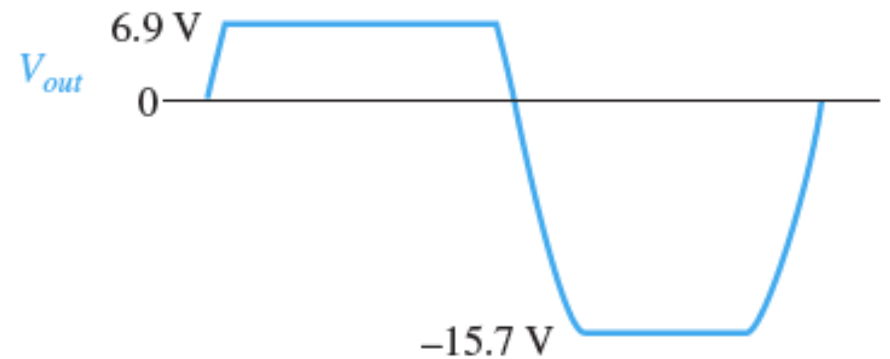
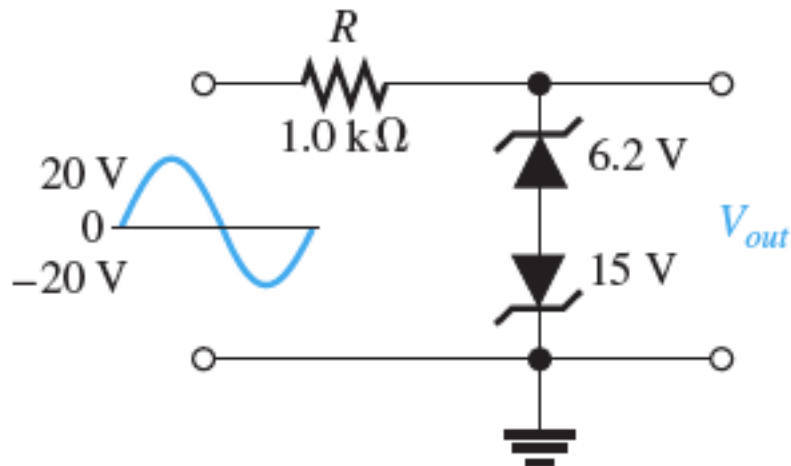
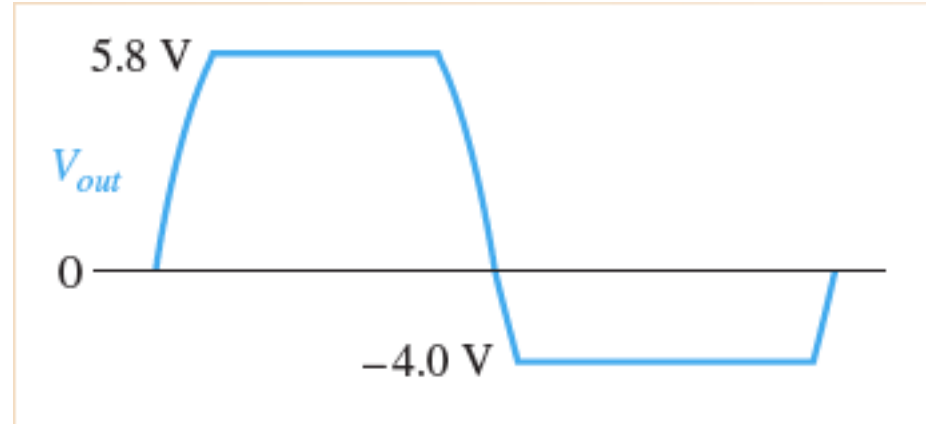
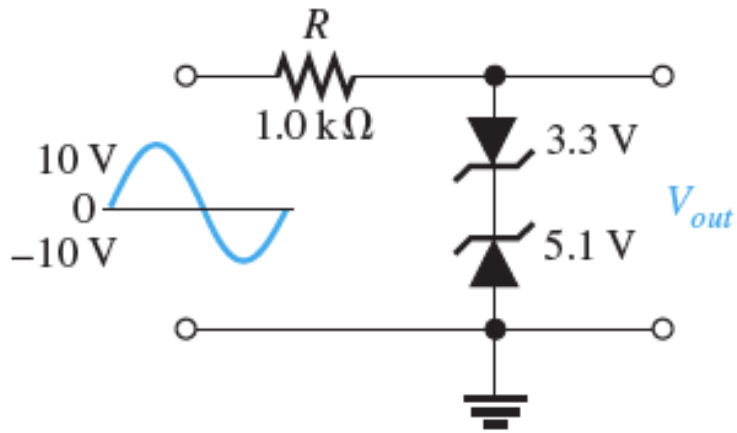


**En el semiciclo positivo  $D_1$  actúa como un diodo en la zona directa y  $D_2$  como un zener.**

**En el semiciclo negativo  $D_2$  actúa como un diodo en la zona directa y  $D_1$  como un zener.**

## EJERCICIO 4

Determine el voltaje de salida para cada circuito.



# ESPECIFICACIONES PRESENTADAS POR LOS FABRICANTES DE DIODOS ZENER (DATASHEETS)

**FAIRCHILD**  
SEMICONDUCTOR

**1N4728A - 1N4764A**

Zeners



DO-41 Glass case  
COLOR BANDS SHOWS CATHODE

**Absolute Maximum Ratings** \*  $T_c = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$P_D$	Power Dissipation @ $T_L \leq 50^\circ\text{C}$ , Lead Length = 3/16"	1.0	W
	Densities above $50^\circ\text{C}$	667	mW/°C
$T_J, T_{STG}$	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +200	°C

\* These ratings are only valid when shown with the reversibility of the diode being interpreted.

**Electrical Characteristics**  $T_c = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Device	$V_Z$ (V) @ $I_Z$ (mA)			Test Current $I_Z$ (mA)	Max. Zener Impedance			Leakage Current	
	Min.	Typ.	Max.		$Z_Z$ @ $I_Z$ ( $\Omega$ )	$Z_{ZK}$ @ $I_{ZK}$ ( $\Omega$ )	$I_{ZK}$ (mA)	$I_R$ ( $\mu\text{A}$ )	$V_R$ (V)
1N4728A	3.315	3.3	3.495	7.6	10	400	1	100	1
1N4729A	3.42	3.6	3.78	6.9	10	400	1	100	1
1N4730A	3.705	3.9	4.095	6.4	9	400	1	50	1
1N4731A	4.005	4.3	4.515	5.8	9	400	1	10	1
1N4732A	4.485	4.7	4.935	5.3	8	500	1	10	1
1N4733A	4.945	5.1	5.355	4.9	7	550	1	10	1
1N4734A	5.32	5.6	5.88	4.5	5	600	1	10	2
1N4735A	5.69	6.2	6.51	4.1	2	700	1	10	3
1N4736A	6.46	6.8	7.14	3.7	3.5	700	1	10	4
1N4737A	7.125	7.5	7.875	3.4	4	700	0.5	10	5
1N4738A	7.79	8.2	8.61	3.1	4.5	700	0.5	10	6
1N4739A	8.645	9.1	9.595	2.8	5	700	0.5	10	7
1N4740A	9.5	10	10.5	2.5	7	700	0.25	10	7.6
1N4741A	10.45	11	11.55	2.3	8	700	0.25	5	8.4
1N4742A	11.4	12	12.6	2.1	9	700	0.25	5	9.1
1N4743A	12.35	13	13.65	1.9	10	700	0.25	5	9.9
1N4744A	14.25	15	15.75	1.7	14	700	0.25	5	11.4
1N4745A	15.2	16	16.8	15.5	16	700	0.25	5	12.2
1N4746A	17.1	18	18.9	1.4	20	750	0.25	5	13.7
1N4747A	19	20	21	12.5	22	750	0.25	5	15.2
1N4748A	20.9	22	23.1	11.5	23	750	0.25	5	16.7
1N4749A	22.8	24	25.2	10.5	25	750	0.25	5	18.2
1N4750A	25.65	27	28.35	9.5	35	750	0.25	5	20.6
1N4751A	28.5	30	31.5	8.5	40	1000	0.25	5	22.8
1N4752A	31.35	33	34.65	7.5	45	1000	0.25	5	25.1
1N4753A	34.2	36	37.8	7	50	1000	0.25	5	27.4
1N4754A	37.05	39	40.95	6.5	60	1000	0.25	5	29.7
1N4755A	40.85	43	45.15	6	70	1500	0.25	5	32.7
1N4756A	44.65	47	49.35	5.5	80	1500	0.25	5	35.8
1N4757A	48.45	51	53.55	5	95	1500	0.25	5	38.8
1N4758A	53.2	56	59.8	4.5	110	2000	0.25	5	42.6
1N4759A	58.9	62	65.1	4	125	2000	0.25	5	47.1
1N4760A	64.6	68	71.4	3.7	150	2000	0.25	5	51.7
1N4761A	71.25	75	76.75	3.3	175	2000	0.25	5	56
1N4762A	77.9	82	86.1	3	200	3000	0.25	5	62.2
1N4763A	86.45	91	95.55	2.8	250	3000	0.25	5	69.2
1N4764A	95	100	105	2.5	350	3000	0.25	5	76

Notes:

1. Zener Voltage ( $V_Z$ )

The Zener voltage is measured with the device junction in the forward condition at the test temperature ( $T_c$ ) at  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  and 3/16" lead length.



## VALORES MÁXIMOS ABSOLUTOS

**Absolute Maximum Ratings** \*  $T_a = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$P_D$	Power Dissipation @ $T_L \leq 50^\circ\text{C}$ , Lead Length = 3/8"	1.0	W
	Derate above $50^\circ\text{C}$	6.67	mW/ $^\circ\text{C}$
$T_J, T_{STG}$	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +200	$^\circ\text{C}$

\* These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

$P_D$ : Potencia máxima que puede disipar el zener. El dispositivo debe operarse por lo menos 20% por debajo de este valor.

Esta disipación de potencia debe reducirse por el valor indicado a partir de la temperatura especificada. Por ejemplo, a  $60^\circ\text{C}$

$$P_D = 1 \text{ W} - 10^\circ\text{C}(6.67 \text{ mW}/^\circ\text{C}) = 1 \text{ W} - 66.7 \text{ mW} = 0.9933 \text{ W}$$

$T_J, T_{STG}$ : Rango de temperatura de operación y almacenamiento

# CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

## Electrical Characteristics T<sub>a</sub> = 25°C unless otherwise noted

Device	V <sub>Z</sub> (V) @ I <sub>Z</sub> (Note 1)			Test Current I <sub>Z</sub> (mA)	Max. Zener Impedance			Leakage Current	
	Min.	Typ.	Max.		Z <sub>Z</sub> @ I <sub>Z</sub> (Ω)	Z <sub>ZK</sub> @ I <sub>ZK</sub> (Ω)	I <sub>ZK</sub> (mA)	I <sub>R</sub> (μA)	V <sub>R</sub> (V)
1N4728A	3.315	3.3	3.465	76	10	400	1	100	1
1N4729A	3.42	3.6	3.78	69	10	400	1	100	1
1N4730A	3.705	3.9	4.095	64	9	400	1	50	1
1N4731A	4.085	4.3	4.515	58	9	400	1	10	1
1N4732A	4.465	4.7	4.935	53	8	500	1	10	1

**V<sub>Z</sub> @ I<sub>Z</sub>:** El fabricante especifica los valores mínimo, medio y máximo de V<sub>Z</sub> para un valor de I<sub>Z</sub>.

**Z<sub>Z</sub> @ I<sub>Z</sub>:** Resistencia dinámica (r<sub>Z</sub>) a la corriente I<sub>Z</sub>

**Z<sub>ZK</sub> @ I<sub>ZK</sub>:** Resistencia en la rodilla a la corriente de rodilla

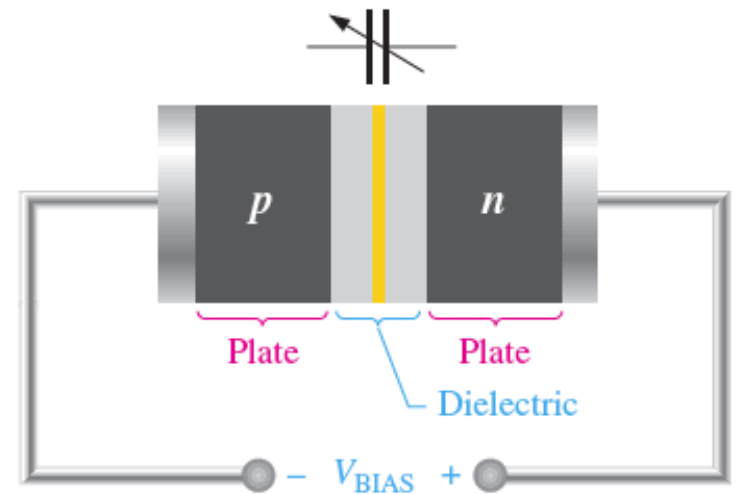
**I<sub>R</sub> @ V<sub>R</sub>:** Corriente de fuga al voltaje indicado, cuando el zener todavía no conduce corriente.

## EL VARACTOR

\*El varactor es un diodo que siempre se opera en la región inversa.

\*Está diseñado para poder utilizarlo como condensador variable, aprovechando que existe un condensador formado por la zona de carga espacial como el dieléctrico y las regiones p y n como las placas del condensador.

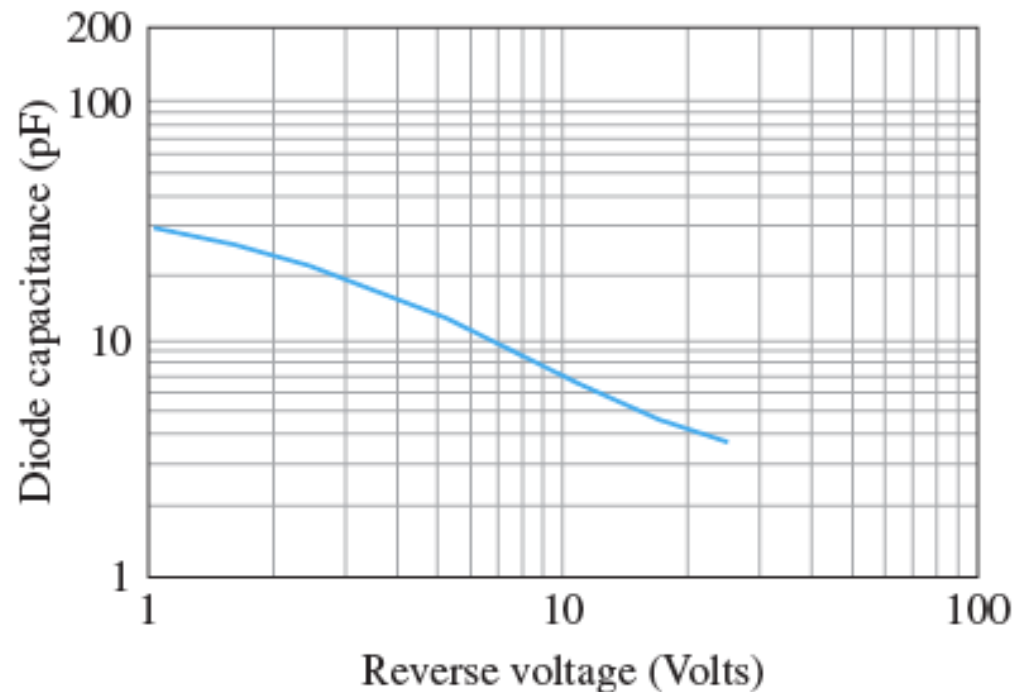
\*La capacitancia está dada por  $C = A\epsilon/d$ , donde A es el área de las placas,  $\epsilon$  es la constante dieléctrica y d el ancho de la zona de carga espacial.



## SÍMBOLO Y CARACTERÍSTICAS DEL VARACTOR



- \* Cuando el voltaje inverso aumenta, se ensancha la zona de carga espacial y la capacitancia decrece (y viceversa).
- \* Las capacitancias nominales de los varactores van de pocos picofaradios a cientos de picofaradios
- \* En la gráfica, la capacitancia varía entre 30 pF a menos de 4 pF cuando el voltaje varía entre 1 y 30 V



# ESPECIFICACIONES PRESENTADAS POR LOS FABRICANTES DE VARACTORES (DATASHEETS)

Tuning characteristics at  $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

Part	Capacitance (pF)			Min Q $V_R = 3V$ $f = 50\text{MHz}$	Capacitance ratio $C_2 / C_{20}$ @ $f = 1\text{MHz}$	
	Min.	Nom.	Max.		Min.	Max.
829A	7.38	8.2	9.02	250	4.3	5.8
829B	7.79	8.2	8.61	250	4.3	5.8
830A	9.0	10.0	11.0	300	4.5	6.0
830B	9.5	10.0	10.5	300	4.5	6.0
831A	13.5	15.0	16.5	300	4.5	6.0
831B	14.25	15.0	15.75	300	4.5	6.0
832A	19.8	22.0	24.2	200	5.0	6.5
832B	20.9	22.0	23.1	200	5.0	6.5
833A	29.7	33.0	36.3	200	5.0	6.5
833B	31.35	33.0	34.65	200	5.0	6.5
834A	42.3	47.0	51.7	200	5.0	6.5
834B	44.65	47.0	49.35	200	5.0	6.5
835A	61.2	68.0	74.8	100	5.0	6.5
835B	64.6	68.0	71.4	100	5.0	6.5
836A	90.0	100.0	110.0	100	5.0	6.5
836B	95.0	100.0	105.0	100	5.0	6.5

## Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	Max.	Unit
Forward current	$I_F$	200	mA
Power dissipation at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ SOT23	$P_{tot}$	330	mW
Power dissipation at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ SOD323	$P_{tot}$	330	mW
Power dissipation at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ SOD523	$P_{tot}$	250	mW
Operating and storage temperature range		-55 to +150	$^\circ\text{C}$

## Electrical characteristics at $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Reverse breakdown voltage	$I_R = 10 \text{ A}$	25			V
Reverse voltage leakage	$V_R = 20\text{V}$		0.2	20	nA
Temperature coefficient of capacitance	$V_R = 3\text{V}, f = 1\text{MHz}$		300	400	ppCm/ $^\circ\text{C}$

## OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LOS VARACTORES

### Relación de Capacitancia

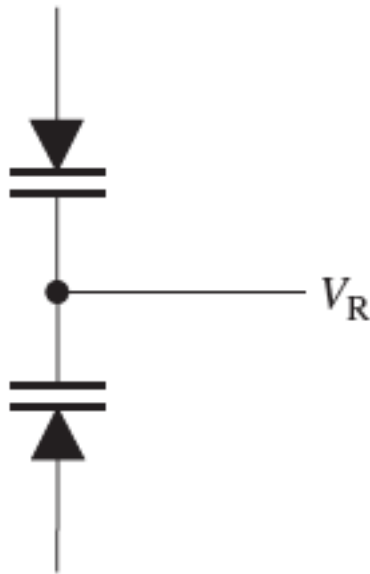
Es la relación entre la capacitancia del varactor al voltaje reverso mínimo entre la capacitancia al voltaje reverso máximo.

Por ejemplo, para los Varactores indicados en la hoja de especificaciones, la Relación de Capacitancia se mide a  $V_R = 2V$  y  $V_R = 20V$ , por lo que se especifica como  $CR = C_2/C_{20}$ .

Esto permite calcular el rango de Capacitancia que ofrece el dispositivo. Si para el 832A el mínimo  $C_2/C_{20}$  es 5.0 y  $C_2 = 22pF$  (en realidad es para 3V), entonces:

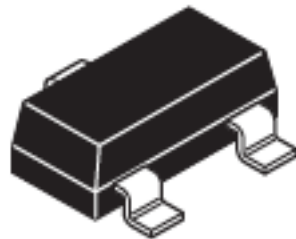
$$C_{20} = \frac{C_2}{CR} = \frac{22 \text{ pF}}{5} = 4.4 \text{ pF}$$

## CONEXIÓN "BACK-TO-BACK" (ESPALDA CONTRA ESPALDA)

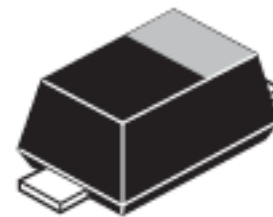


Se utiliza cuando hay que conectar un varactor en un circuito en el que va a cambiar la polaridad de la señal entre los terminales del componente, usualmente en circuitos de sintonización de radiofrecuencia (VHF y UHF).

El voltaje se aplica a los dos dispositivos simultáneamente, por lo que uno está en reverso y el otro en directo, la capacitancia neta se mantiene constante.



SOT23



SOD523



## DIODOS ÓPTICOS

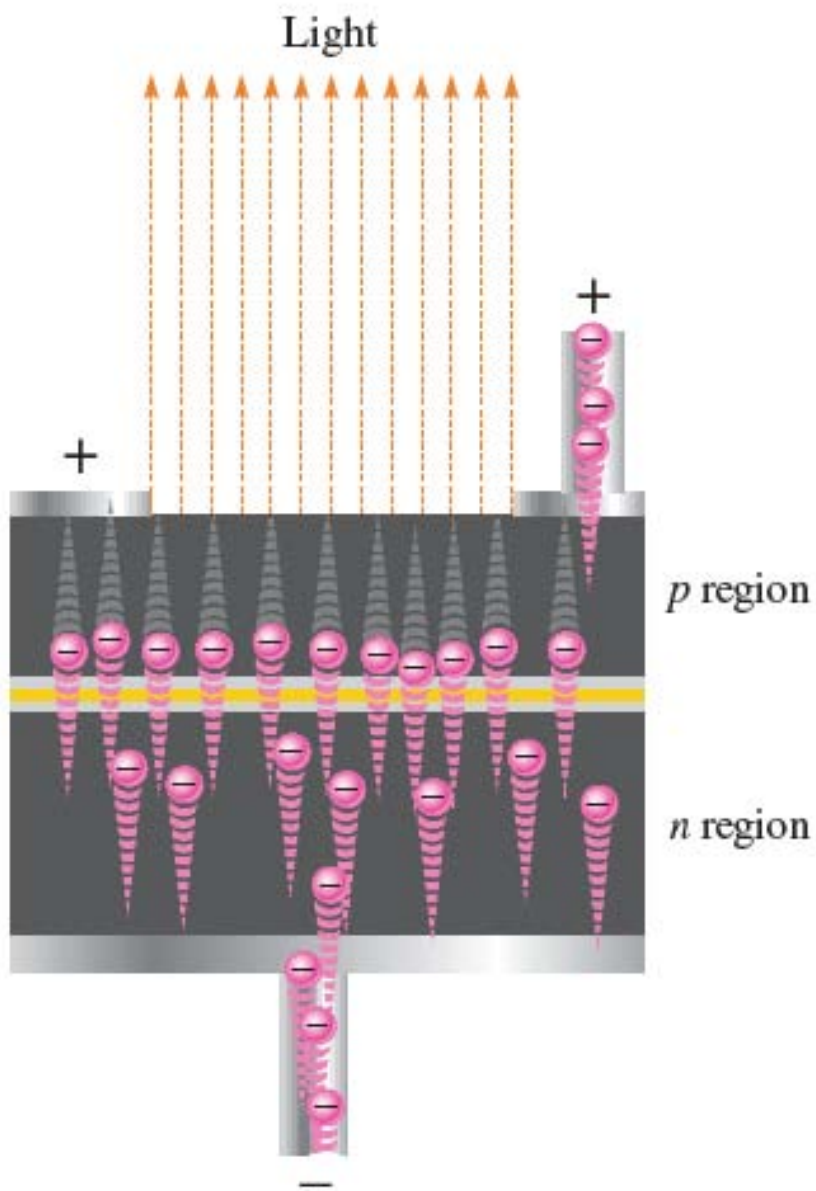
### DIODOS EMISORES DE LUZ (LED)



En un LED polarizado en directo, los electrones de la región n que están en la banda de conducción cruzan la juntura y se recombinan con los huecos de la región p, que están en la banda de valencia, pasando a una banda de menos energía. Al hacerlo liberan energía en la forma de **fotones (luz visible)**.

La luz emitida es monocromática (un solo color) que depende del ancho de la banda de energía.

Hay LEDs que trabajan en la región infra-roja (IR) del espectro.



Un área amplia de material semiconductor expuesta a estas condiciones permite la emisión de la luz visible, mediante el fenómeno llamado **electroluminiscencia**.

Los semiconductores utilizados para la elaboración de LEDs son materiales compuestos.

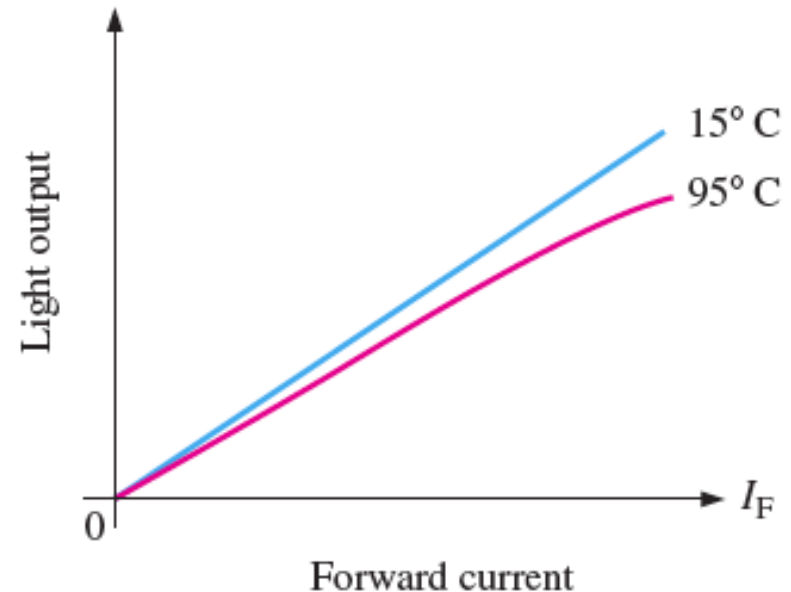
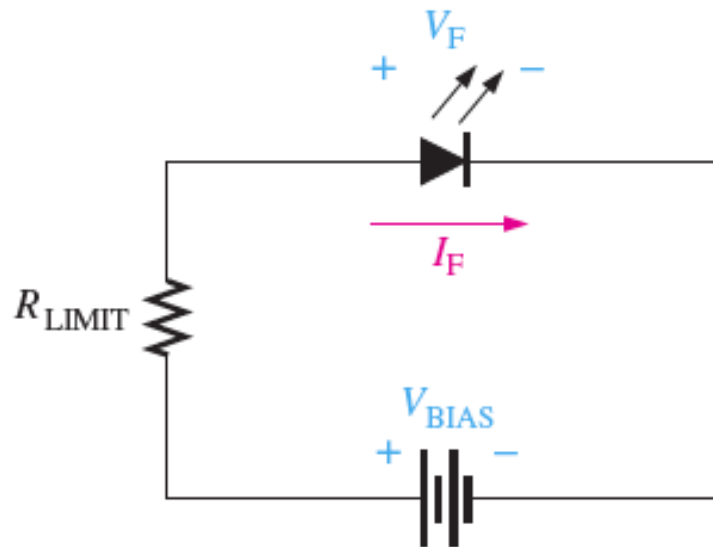
Ejemplos:

Arseniuro de Galio (GaAs)

Fosfato de Arseniuro de Galio (GaAsP)

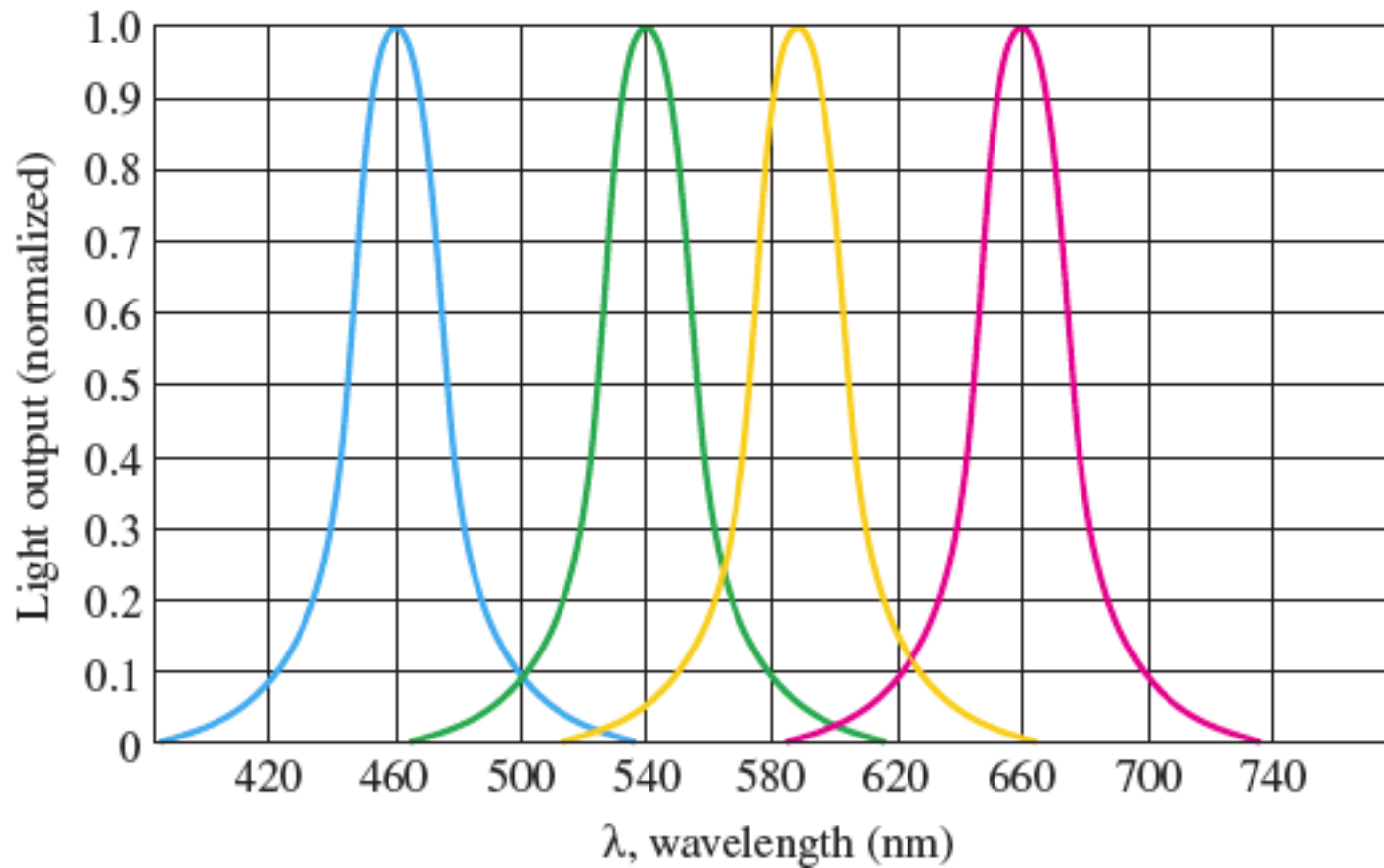
## POLARIZACIÓN DE LOS DIODOS EMISORES DE LUZ (LEDS)

- \* El voltaje en directo es mayor que el de un diodo (1,2 a 3,2V)
- \* El voltaje reverso está usualmente entre 3 y 10 V.
- \* La potencia que se convierte en luz es proporcional a la corriente directa.
- \* La intensidad de luz y el color dependen de la temperatura.

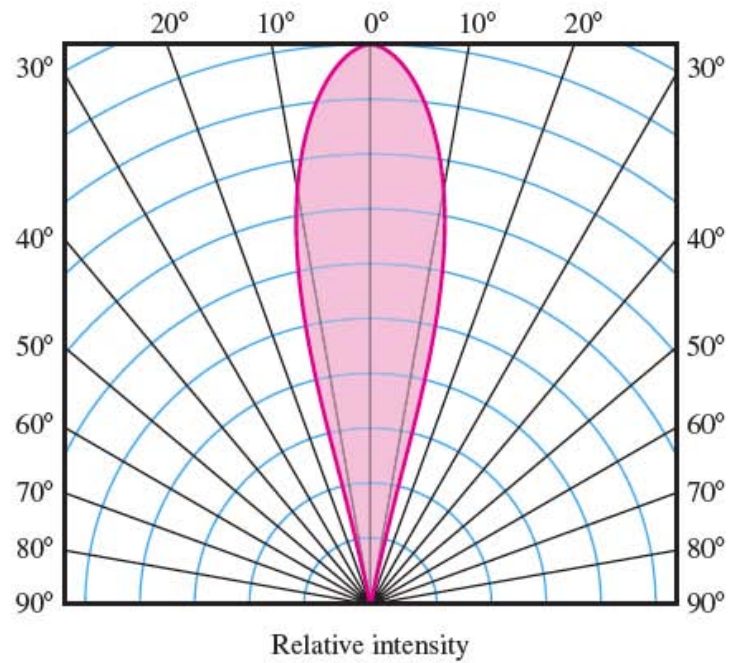


# EMISIÓN DE LUZ

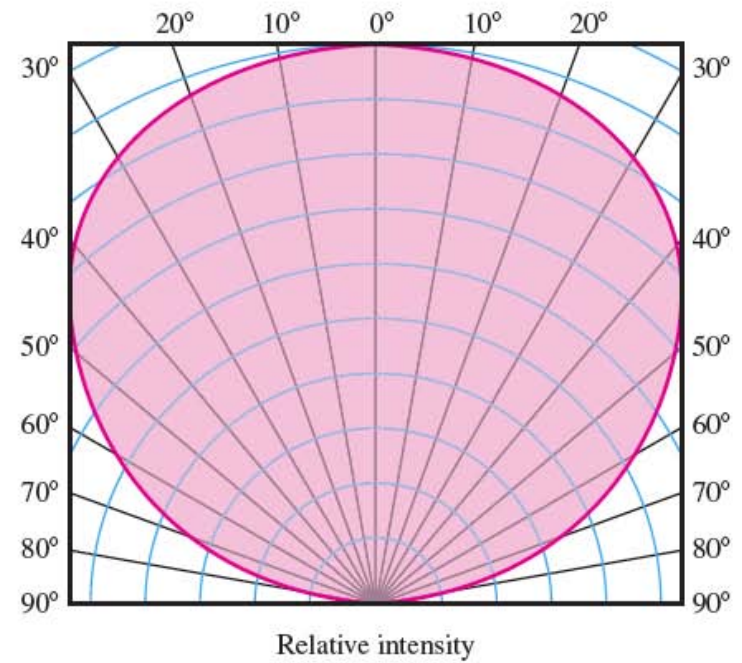
Un LED emite luz sobre un rango específico de longitudes de onda.



# PATRONES DE RADIACIÓN DE LOS LEDs



LED de ángulo estrecho



LED de ángulo ancho

## POTENCIA DE LOS LEDs



LEDs para  
indicadores

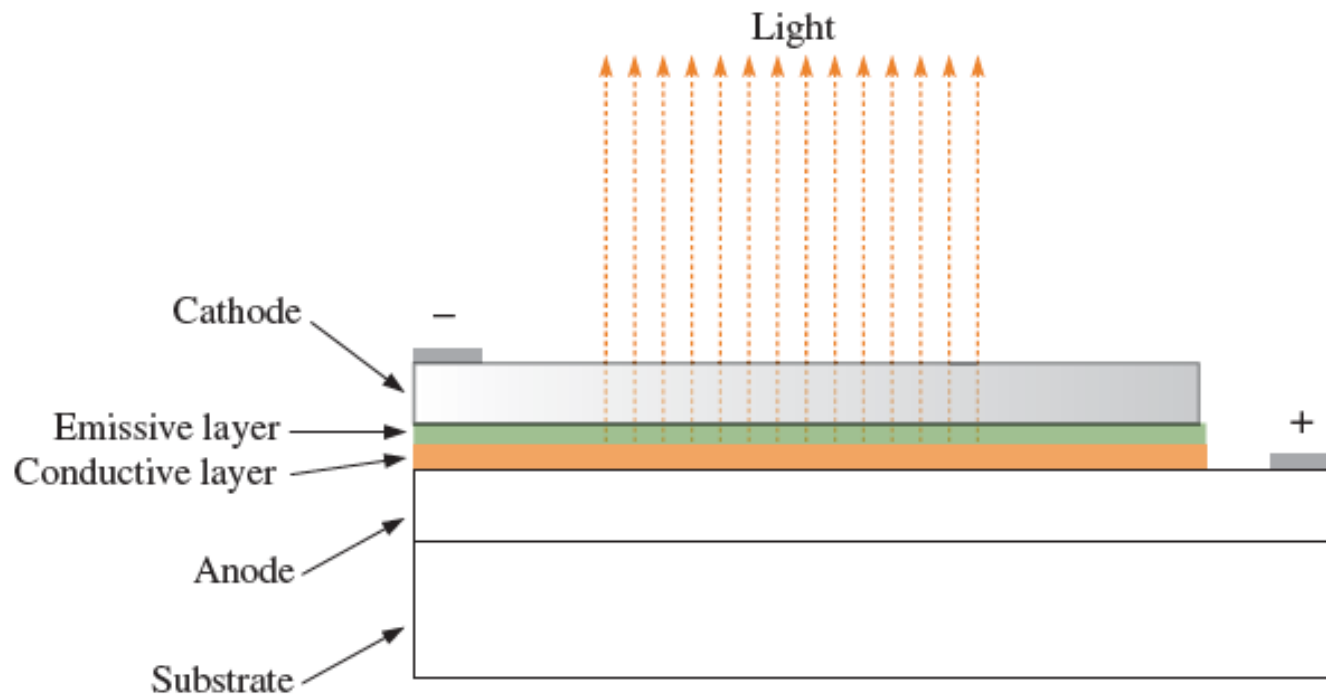


LEDs para  
iluminación

## LEDs ORGÁNICOS (OLEDs)

Son dispositivos con dos o tres capas de material compuesto por moléculas orgánicas o polímeros que emiten luz cuando se les aplica voltaje, por el proceso llamado **electrofosforecencia**.

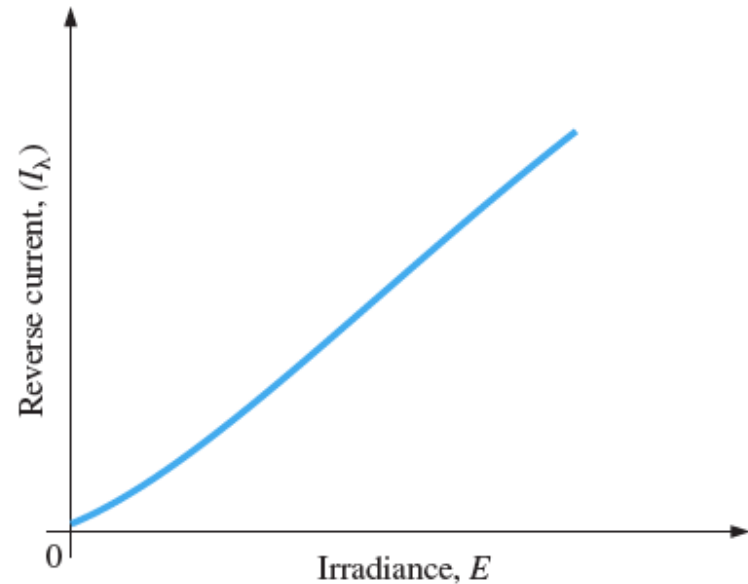
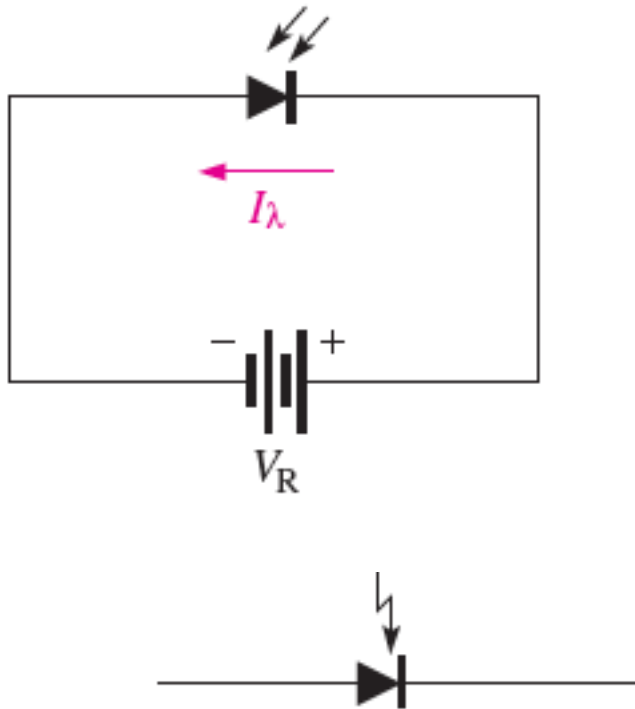
El color de la luz depende de la molécula orgánica.



# FOTODIODO

El fotodiodo opera polarizado en la región inversa, con una pequeña corriente  $I_\lambda$ , despreciable cuando no hay luz, llamada corriente oscura.

Tiene una pequeña ventana transparente, por donde la luz llega a la juntura pn. La corriente inversa aumenta al aumentar la intensidad de la luz, expresada como **irradiancia** ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ).





## OTROS TIPOS DE DIODOS



Diodo LASER

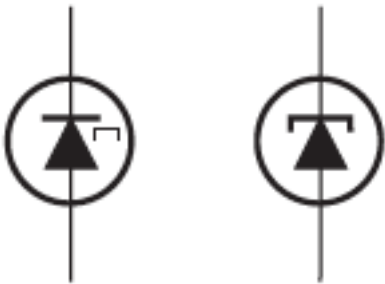


Diodo Schottky

Diodo regulador de corriente



Diodo PIN



Diodo tunel

## DIODO LASER

\* La palabra **LASER** es el acrónimo para **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation: Amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación.

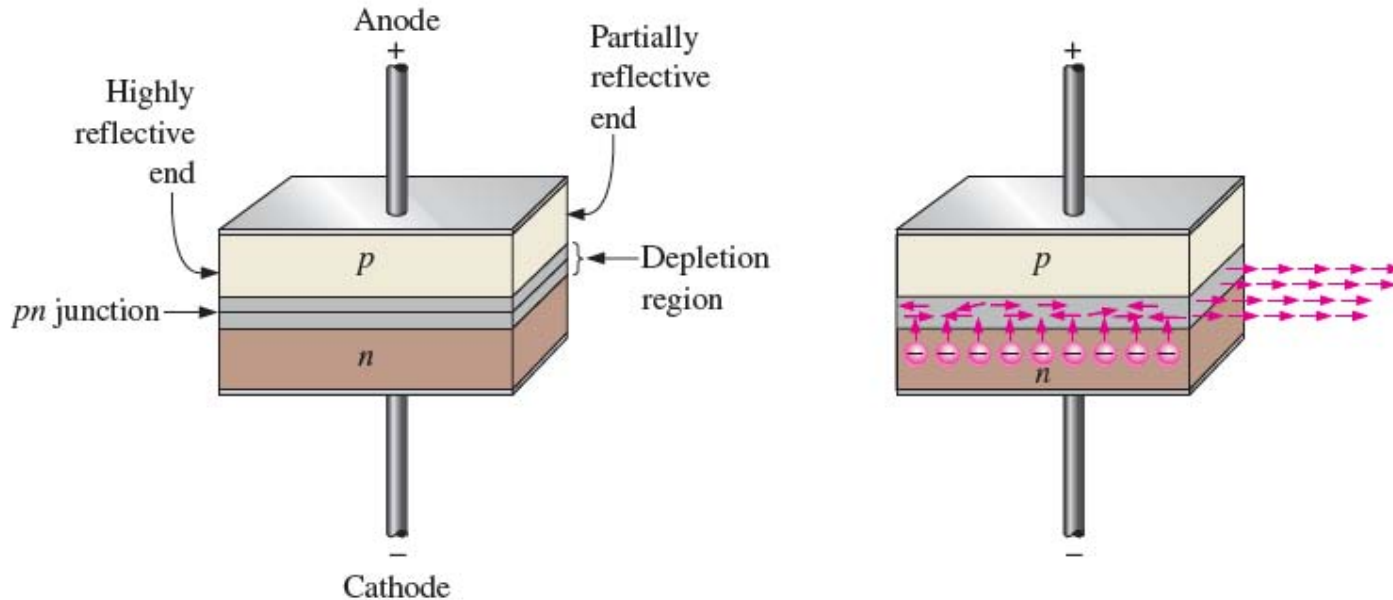
\* La luz emitida por los diodos LASER es monocromática, es decir, de un solo color, correspondiente a una sola longitud de onda, por lo que se llama también Luz Coherente.

\* La luz emitida por los LEDs consta de una serie de señales de diferentes longitudes de onda, por lo que se llama Luz Incoherente

\* El símbolo del diodo LASER es igual al del LED.



# FUNCIONAMIENTO DEL DIODO LASER



\* El material básico es Arseniuro de Galio, dopado para definir las regiones P y N.

La longitud de la juntura pn guarda una estrecha

relación con la longitud de onda que emite el diodo LASER.

Hay una superficie altamente reflectora en un extremo del dispositivo y otra parcialmente reflectora en el otro, lo que forma una cavidad resonante para los fotones.

- \* Cuando el diodo se polariza en directo los electrones cruzan la juntura pn y se recombinan con los huecos, liberando fotones.
- \* Los fotones chocan con otros átomos y liberan mas fotones.
- \* Eventualmente los fotones chocan con las superficies reflectoras, volviendo a interaccionar con otros átomos con lo que se incrementa el número de fotones debido al efecto de avalancha.
- \* Todos los fotones tienen las mismas características en cuanto a nivel de energía, relación de fase y frecuencia.
- \* Este movimiento continúa hasta que los fotones forman un haz de luz coherente (LASER) muy intenso que pasa a través de la superficie parcialmente reflectora.
- \* Los diodos LASER tienen un umbral de corriente por encima del cual emiten luz LASER propiamente dicha. Si la corriente es menor, emiten luz incoherente (LED).

## DIODO SCHOTTKY

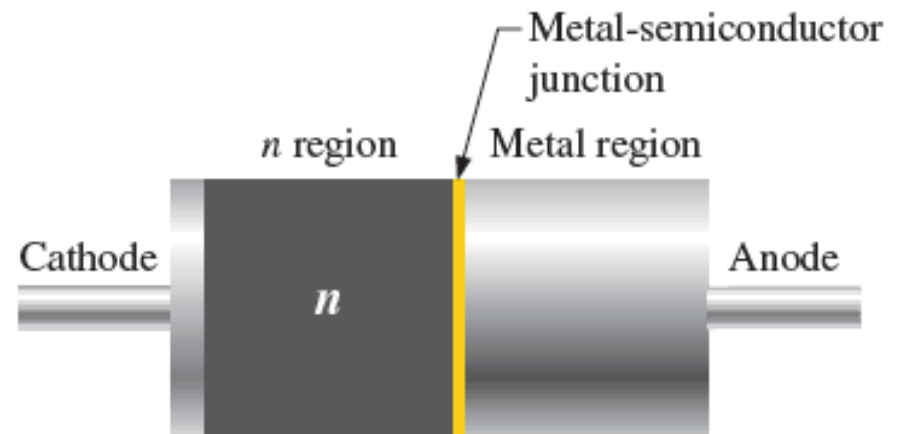


\* Los diodos Schottky son diodos que manejan corrientes altas, y se utilizan en sistemas de alta frecuencia y aplicaciones de conmutación rápida (puertas lógicas TTL de la familia LS : Low power Schottky).

\* Están formados por una región de material semiconductor tipo n ligeramente dopado y un metal (oro, plata o platino).

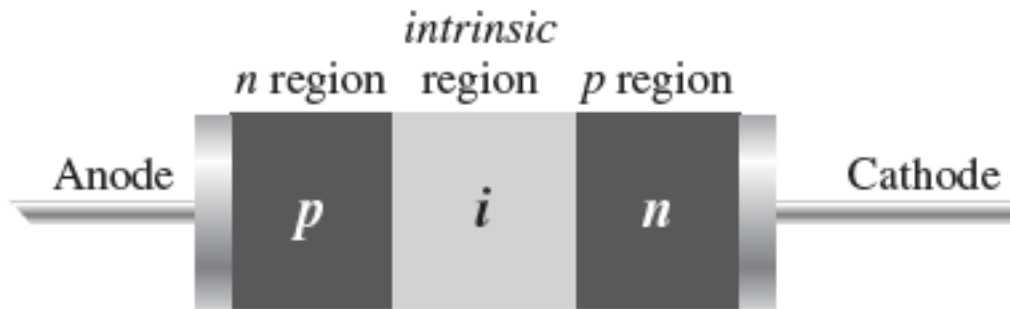
\* No se forma una región de vaciamiento. El voltaje  $V_d$  es de 0,3V. Al polarizarlos el directo, los electrones pasan de la región n al metal, donde entregan el exceso de energía rápidamente.

\* Solo operan con portadores mayoritarios, no presentan corriente de fuga inversa y la respuesta a un cambio de polaridad es muy rápida.



## DIODO PIN

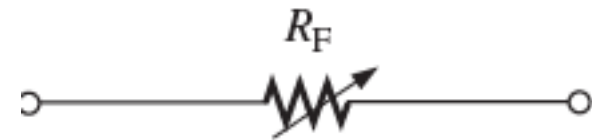
- \* El diodo PIN consta de dos regiones p y n altamente dopadas, separadas por una región de semiconductor intrínseco.
- \* Polarizado en reverso, actúa como una capacitancia constante.
- \* Polarizado en directo actúa como una resistencia variable controlada por corriente.

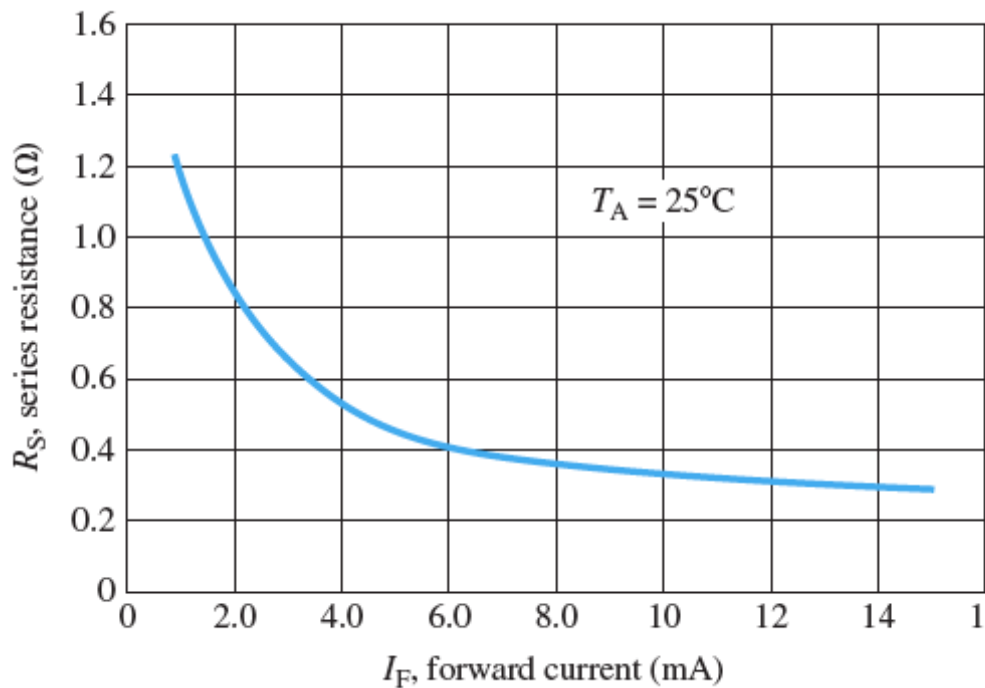


Polarización inversa

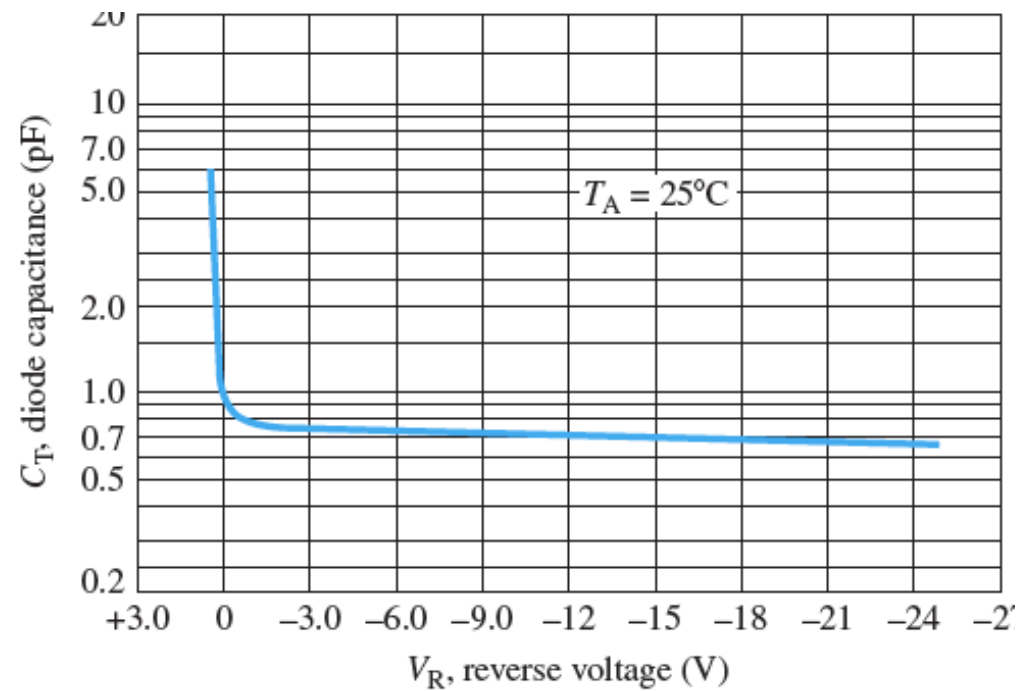


Polarización directa





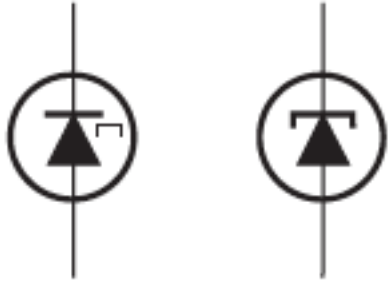
Característica de la resistencia variable en un diodo PIN polarizado en directo



Característica de la capacitancia en un diodo PIN polarizado en inverso

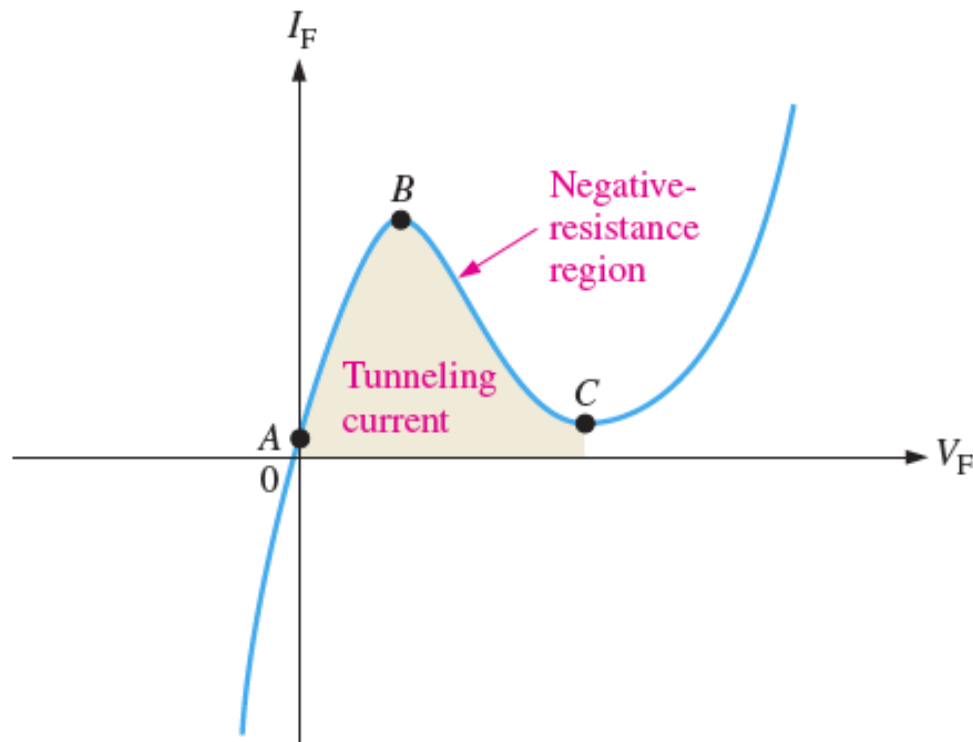
En este diodo no ocurre el proceso de rectificación. Se utiliza para aplicaciones en las que hay que aplicar atenuación, dado que su resistencia puede controlarse mediante la cantidad de corriente.

## DIODO TUNEL



\* El diodo tunel tiene una característica especial, conocida como **resistencia negativa**.

\* Se utiliza en circuitos osciladores y amplificadores de microondas (aplicaciones de alta frecuencia).



\* Se elabora con Germanio o Arseniuro de Galio, dopando muy fuertemente las dos regiones, p y n. La región de vaciamiento es sumamente estrecha, y hay conducción para los voltajes negativos, por lo que no se produce el efecto de ruptura (breakdown).



\* Cuando se polariza en directo, los electrones pueden cruzar por la zona de vaciamiento estrecha como por un tunel (de ahí su nombre) a valores muy bajos de voltaje positivo, por lo que el diodo se comporta como un material conductor. (Puntos A a B).

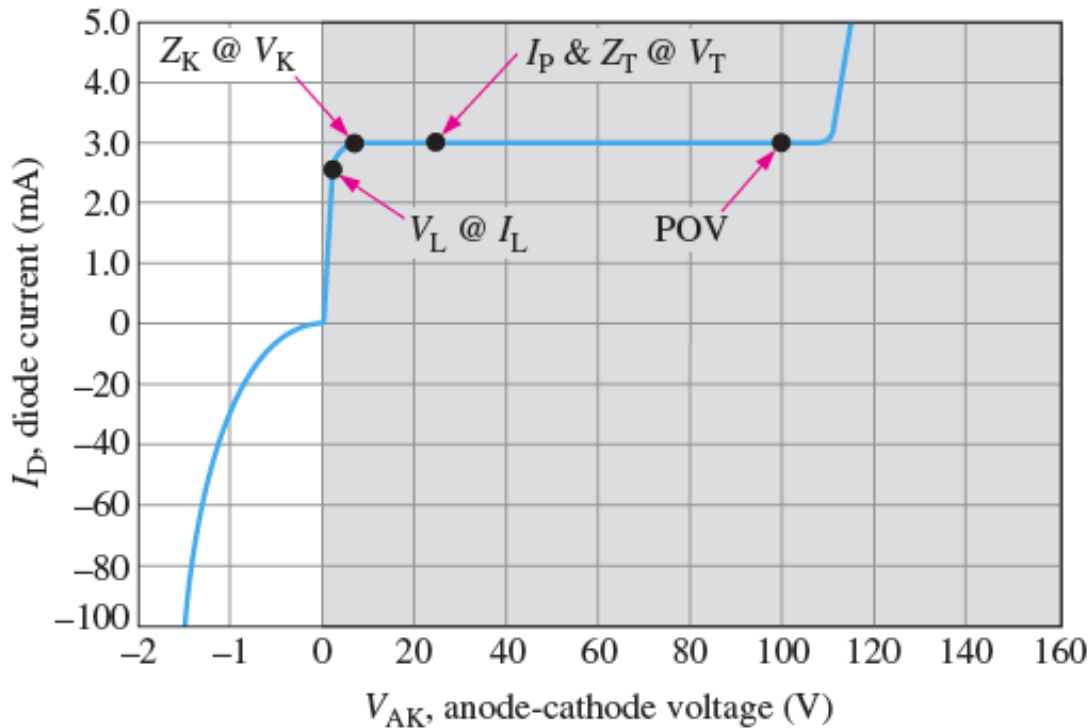
\* Al llegar a B comienza a formarse la barrera de potencial y entonces a medida que aumenta el voltaje disminuye la corriente, dando lugar a la **región de resistencia negativa**, hasta el punto C.

$$R_F = \frac{\Delta V_F}{\Delta I_F}$$

\* A partir del punto C el dispositivo se comporta como un diodo convencional.

## DIODO REGULADOR DE CORRIENTE

\* El diodo regulador de corriente es capaz de mantener una corriente constante para un amplio rango de voltajes positivos.



\* Debe operarse siempre en la región directa.

\* La corriente alcanza su valor constante para un valor específico del voltaje directo,  $V_L$ , en el rango de 1,5 a 6V.

\* La corriente se mantiene constante hasta el valor  $POV$  (Peak Operating Voltage).



# EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA 1956



The Nobel Prize in Physics 1956

William B. Shockley, John Bardeen, Walter H. Brattain

## The Nobel Prize in Physics 1956



William Bradford  
Shockley



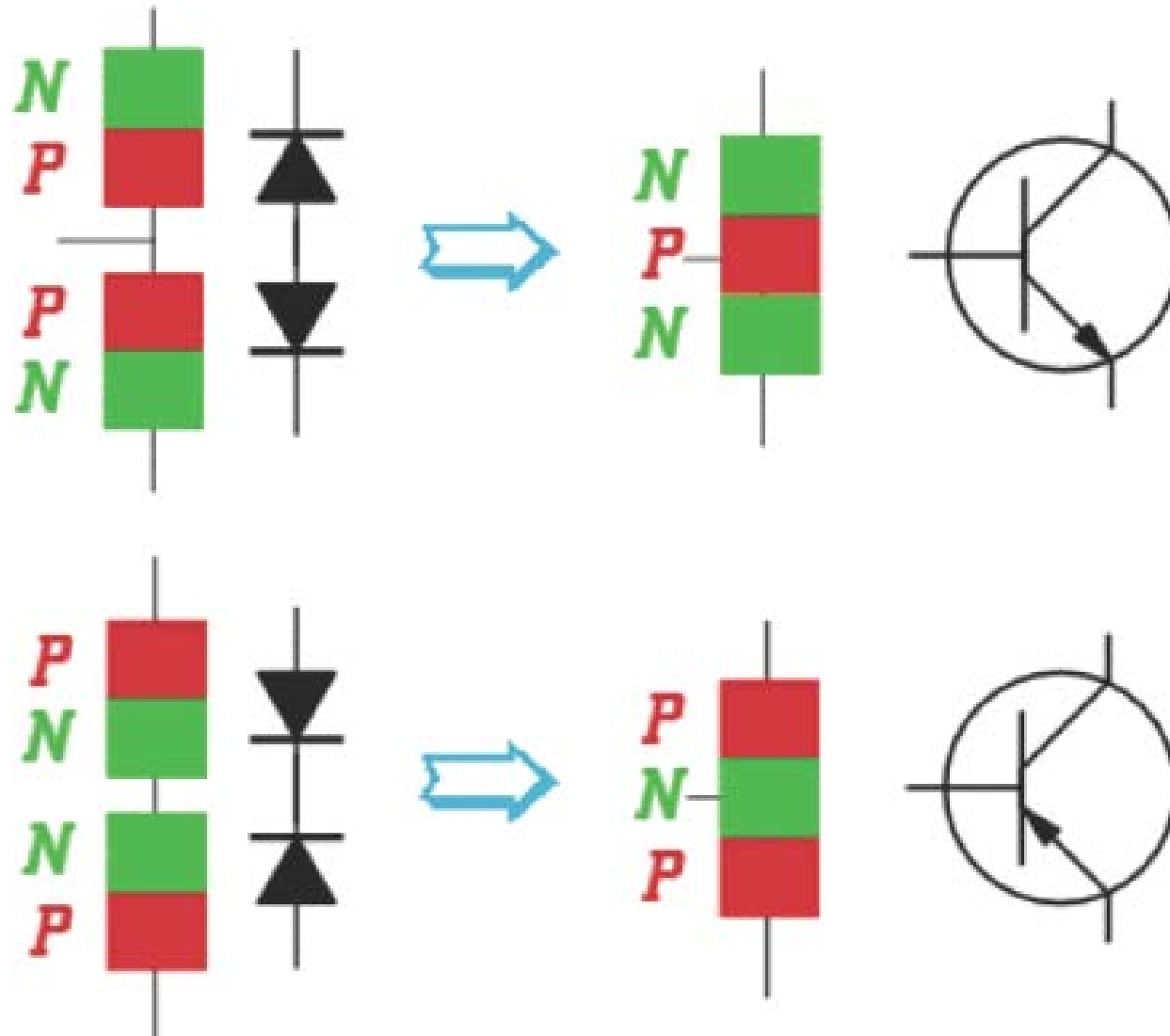
John Bardeen



Walter Houser  
Brattain

The Nobel Prize in Physics 1956 was awarded jointly to William Bradford Shockley, John Bardeen and Walter Houser Brattain *"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"*.

# EL TRANSISTOR BIPOLAR



## **EL TRANSISTOR BIPOLAR**

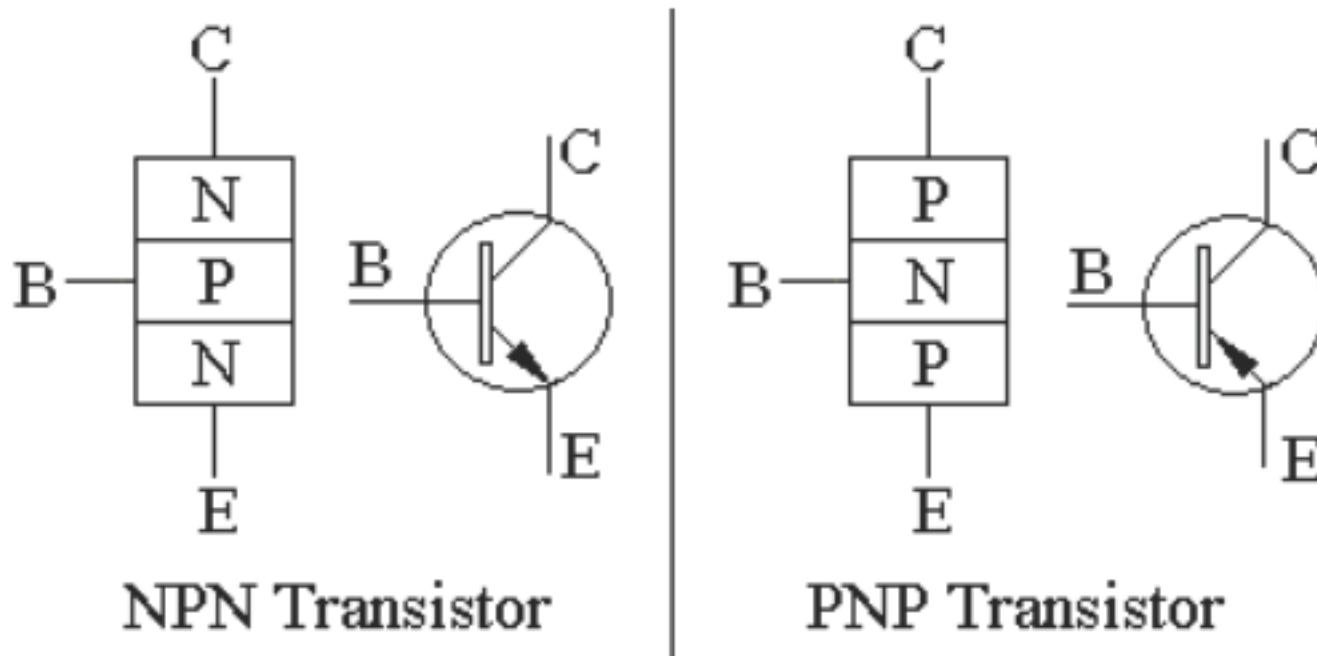
El transistor bipolar (BJT Bipolar Junction Transistor) fue desarrollado en los Laboratorios Bell Telephone en 1948. El nombre Bipolar viene de que en los procesos de conducción intervienen tanto huecos como electrones. Su invención marcó la era de todo el desarrollo tecnológico e informático que tenemos hoy día.

Durante tres décadas fue el dispositivo utilizado en todos los diseños de circuitos discretos o integrados. En los 70 y 80 apareció un competidor muy fuerte: El transistor de Juntura, que dio origen a otros componentes, los MOSFETs. Actualmente la tecnología CMOS es la más utilizada en los diseños de circuitos integrados. Pero el BJT se sigue usando en aplicaciones específicas, entre ellas circuitos de muy alta frecuencia.

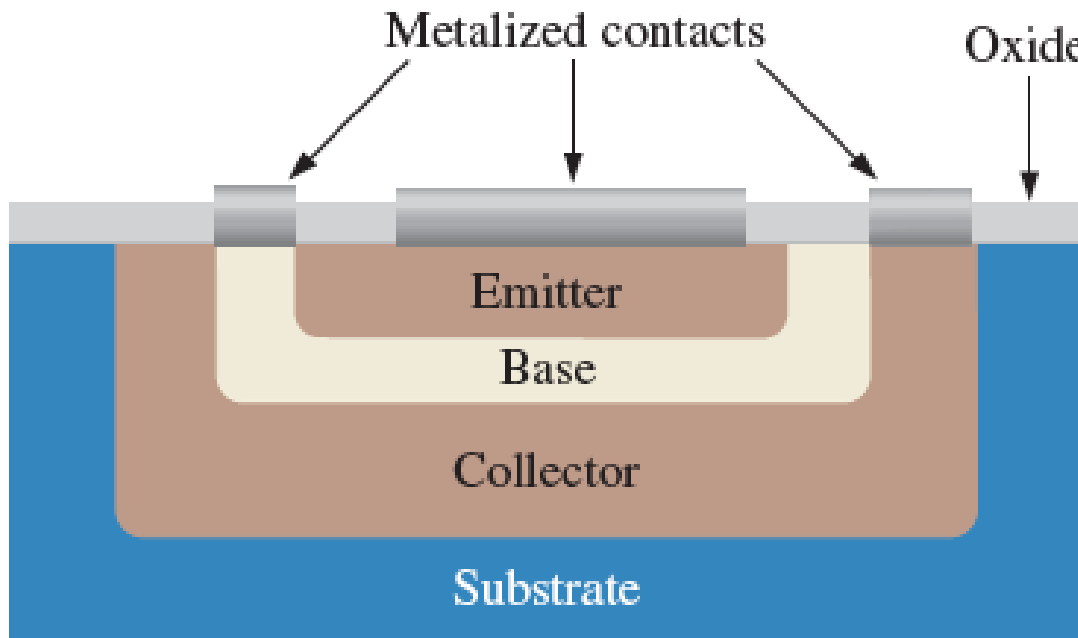
Uno de los dispositivos más utilizados en los sistemas de electrónica de potencia es el IGBT, que combina las características de entrada de un MOSFET con las de salida de un BJT.

## ESTRUCTURA FÍSICA

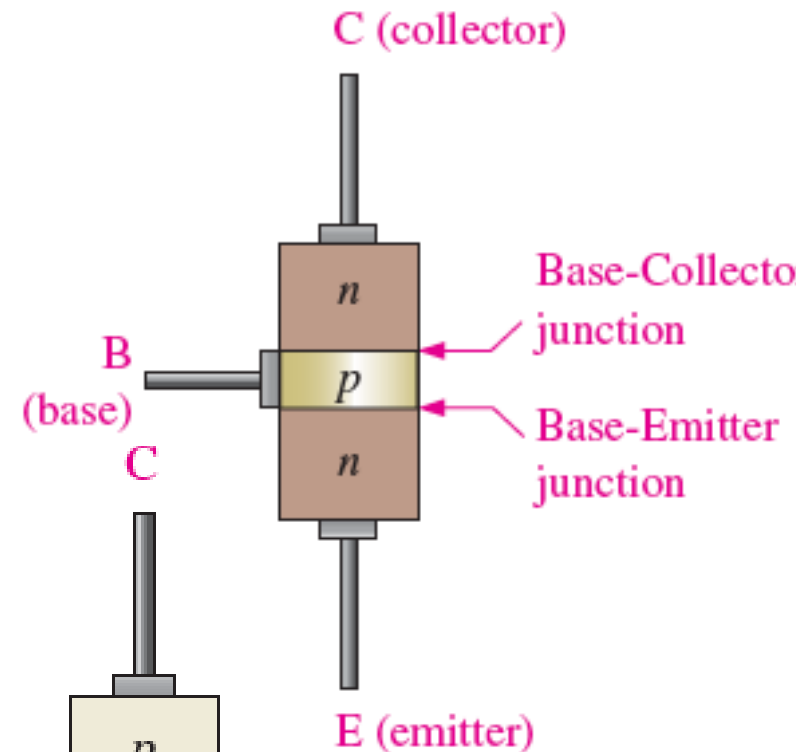
Los transistores bipolares están constituidos por dos junturas pn espalda contra espalda.



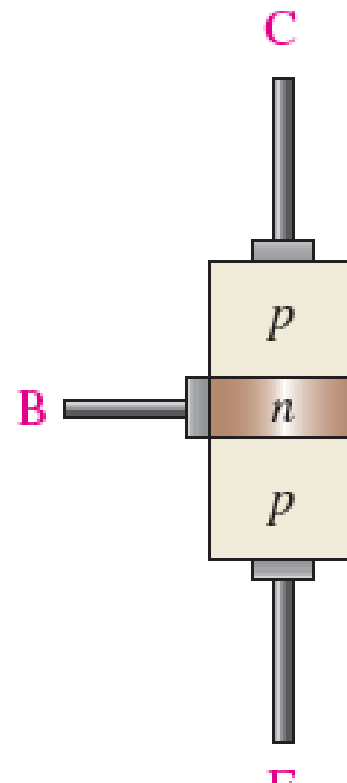
# ESTRUCTURA PLANAR BÁSICA



NPN



PNP



## MODOS DE OPERACIÓN

Los transistores tienen dos junturas pn: La Emisor-Base (EB) y la Colector-Base (CB). Según la polarización de las junturas, presentan cuatro modos de operación.

MODO	Juntura EB	Juntura CB
Cortado	Reversa	Reversa
Activo	Directa	Reversa
Saturado	Directa	Directa
Activo inverso	Reversa	Directa

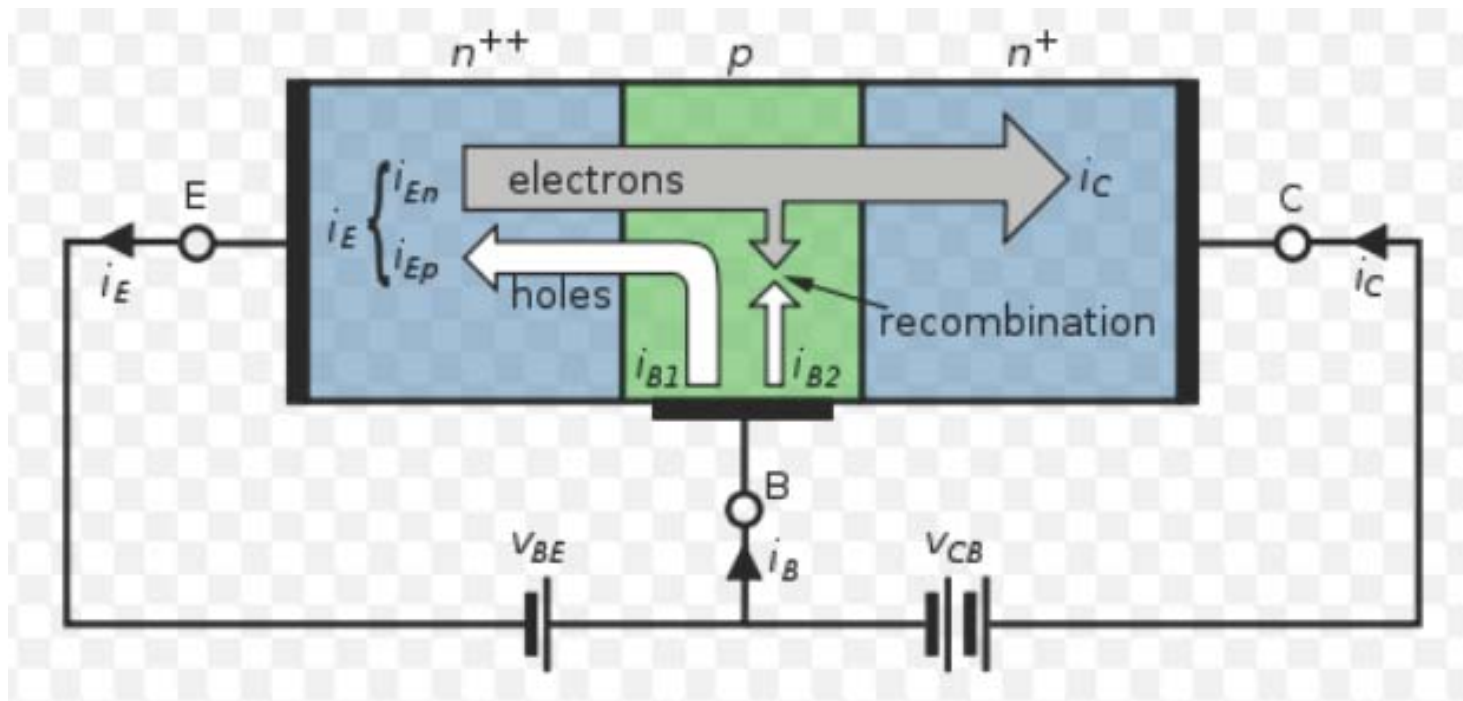
En el modo activo el transistor opera como amplificador.

Los modos Cortado y Saturado se usan en las aplicaciones donde los dispositivos tienen que conmutar entre dos estados (circuitos lógicos)

El modo activo inverso tiene aplicaciones muy limitadas.



# OPERACIÓN DEL TRANSISTOR NPN EN EL MODO ACTIVO



\*Se tienen que polarizar las junturas como indican las baterías. La fuente  $V_{BE}$  polariza en directo la juntura Emisor-Base. La fuente  $V_{CB}$  polariza en inverso la juntura Colector -Base.

\*En el análisis se van a considerar solamente las corrientes de difusión. El emisor está mucho mas dopado que la base y mas dopado que el colector.

\*La corriente de Emisor a Base tiene dos componentes: Un flujo de electrones de E a B y un flujo de huecos de menor magnitud de B a E.

\*La corriente  $i_E$  tiene dirección positiva saliendo del Emisor

\*En la base los electrones se convierten en portadores minoritarios y algunos se recombinan mientras que otros son arrastrados hacia el Colector.

\*La corriente de Base alimenta el flujo de huecos que va de la Base al Emisor y los portadores que intervienen en la recombinación en la base. Es por lo tanto un movimiento de huecos.

\*La corriente  $i_B$  tiene dirección positiva entrando en la Base.

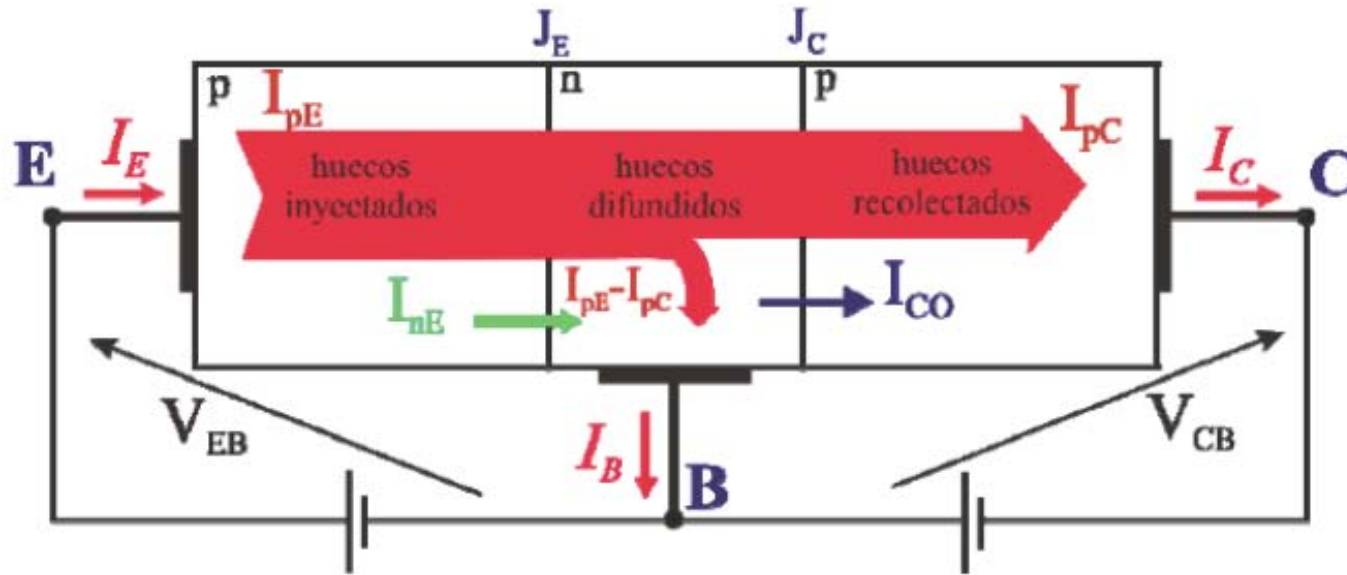
\*La corriente de Colector está formada por los electrones que pasaron la juntura Colector-Base.

\*La corriente  $i_C$  tiene dirección positiva entrando en el Colector.

\*De acuerdo con las Leyes de Kirchhoff:

$$i_E = i_C + i_B$$

# OPERACIÓN DEL TRANSISTOR PNP EN EL MODO ACTIVO



En ambos tipos de transistores la corriente de Colector es independiente del voltaje  $V_{CB}$ . Esta corriente es una fracción de la corriente de Emisor, que está controlada por el voltaje  $V_{EB}$ .

El colector se comporta como una fuente de corriente controlada por voltaje.

## PARÁMETROS BÁSICOS DEL TRANSISTOR BJT

\* Al Colector llega prácticamente toda la corriente del Emisor. Las corrientes se relacionan mediante un parámetro denominado  $\alpha$ .

**$\alpha$ : Ganancia de corriente de Base Común.**

\* La corriente de Base es aproximadamente 1% la corriente de Emisor. Del análisis matemático se puede concluir que la corriente de Base y la de Colector están relacionadas por un parámetro identificado como  $\beta$ .

**$\beta$ : Ganancia de corriente de Emisor Común**

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependen de las características de los dispositivos

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} \quad i_C = \beta i_B \quad \alpha = \frac{i_C}{i_E} \quad i_C = \alpha i_E$$

## RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DEL BJT

Los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  dependen de las características del dispositivo.

Valores típicos para  $\beta$ : 100, 200, 400

En todo transistor  $i_E = i_C + i_B$   $i_E = i_C + \frac{i_C}{\beta} = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$

$$i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E = \alpha i_E \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

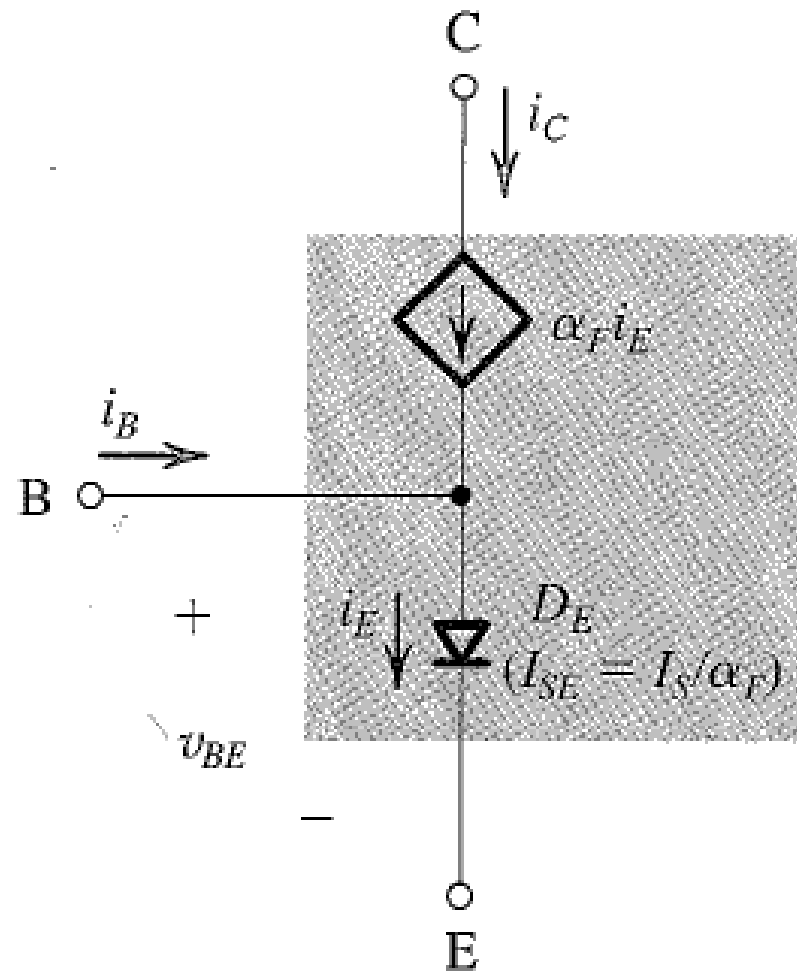
Para  $\beta = 100$   $\alpha = 0,99$ .

Pequeñas variaciones en  $\alpha$  producen grandes cambios en  $\beta$ .

# MODELO EQUIVALENTE DE GRAN SEÑAL EN LA REGIÓN ACTIVA BASE COMÚN

Con este modelo el transistor se va a usar como una red de dos puertos, con el puerto de entrada entre B y E y el puerto de salida entre C y B. De ahí que:

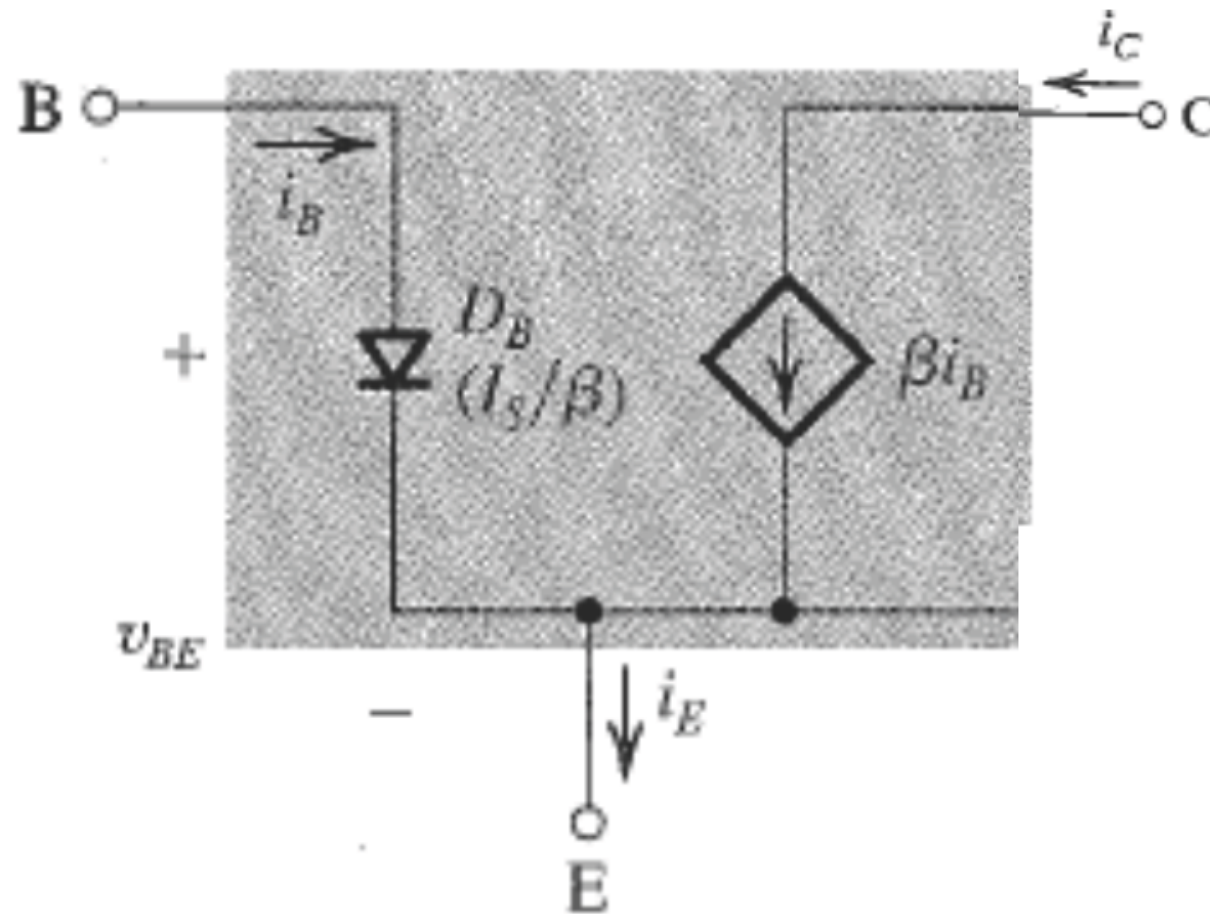
**$\alpha$ : Ganancia de corriente de Base Común**



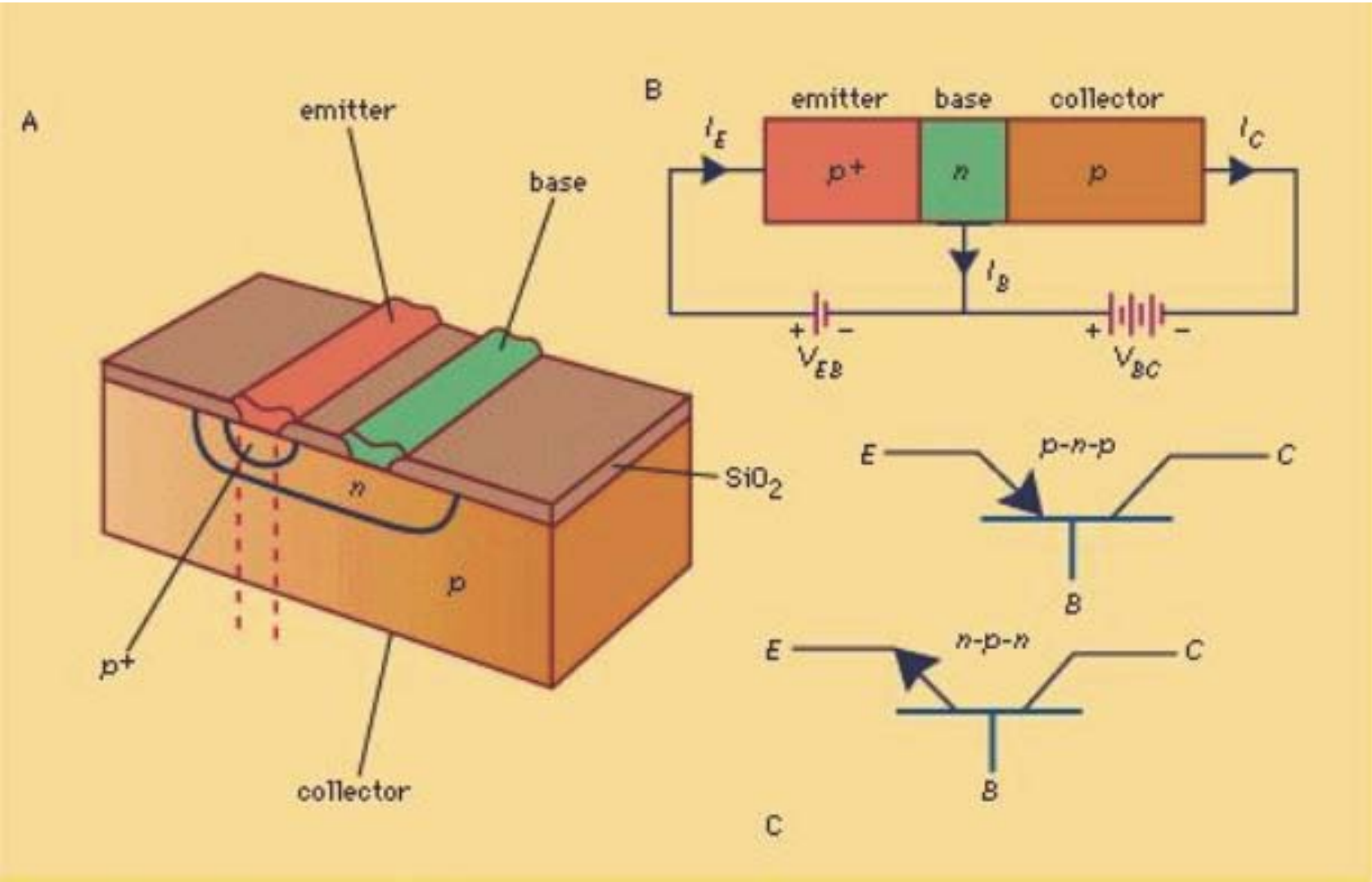
# MODELO EQUIVALENTE DE GRAN SEÑAL EN LA REGIÓN ACTIVA EMISOR COMÚN

Con este modelo el transistor se va a usar como una red de dos puertos, con el puerto de entrada entre B y E y el puerto de salida entre C y E. De ahí que:

**$\beta$ : Ganancia de corriente de Emisor Común**



# ESTRUCTURA FÍSICA DE LOS BJT



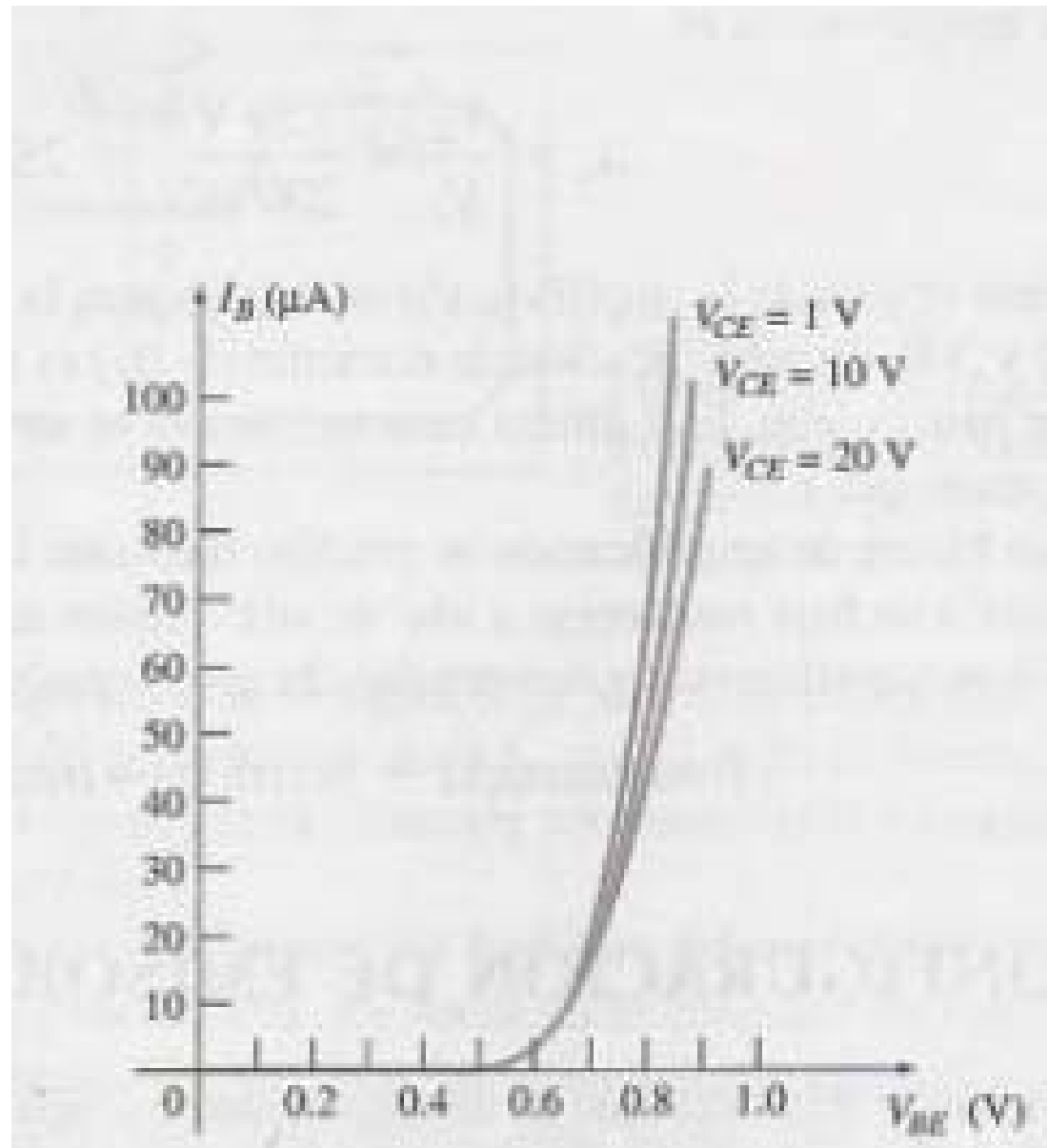


# CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN BJT TIPO NPN

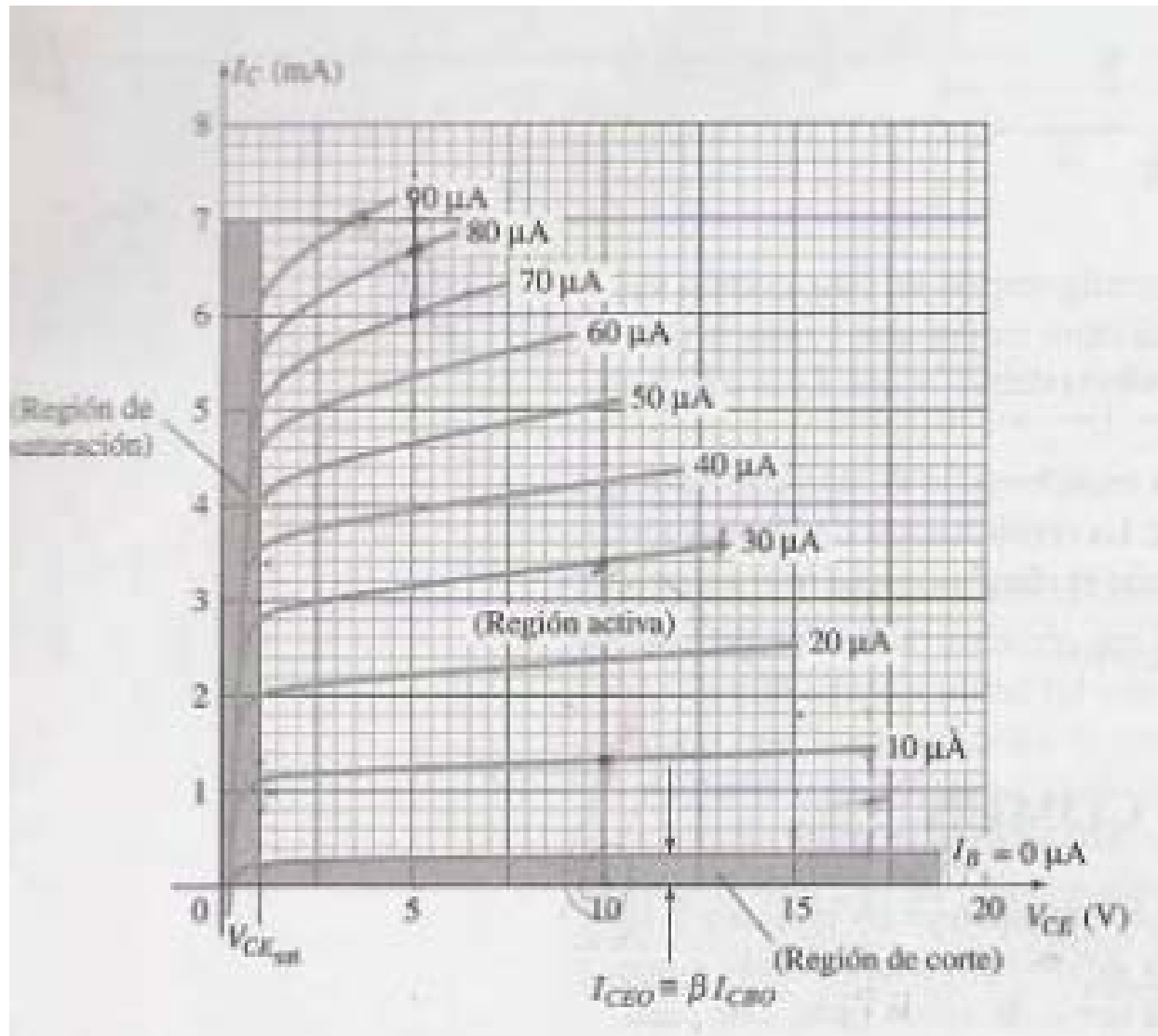
## CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA BASE-EMISOR

En estas características se observa el efecto que tiene el aumento del voltaje  $V_{CE}$ .

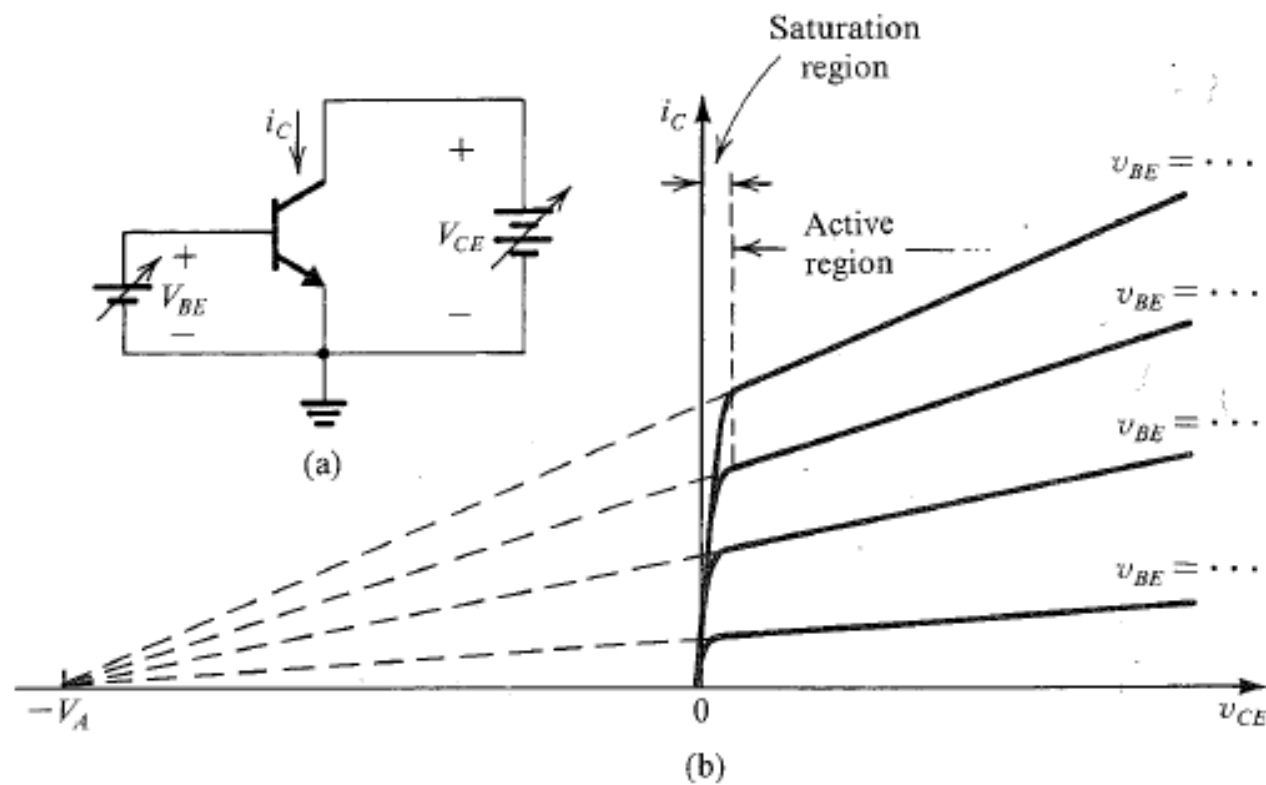
Cuando  $V_{CE}$  aumenta, crece la zona de carga espacial de la juntura BC polarizada en inverso. La base se reduce



# CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN BJT TIPO NPN CARACTERÍSTICAS DE SALIDA EMISOR COMÚN



# DEPENDENCIA DE $I_C$ CON EL VOLTAJE DE COLECTOR: EL EFECTO EARLY



## EL EFECTO EARLY

Las curvas características para cada valor de voltaje Base-Emisor o cada valor de corriente de Base no son planas.

Extrapolando todas las curvas correspondientes a la región activa hacia los valores negativos de  $V_{CE}$  se obtiene que todas ellas intersectan el mismo voltaje  $-V_A$ , denominado voltaje de Early.

La pendiente de estas curvas,  $1/r_o$ , está dada por la relación:

$$r_o = \left( \left. \frac{\delta i_C}{\delta v_{CE}} \right|_{V_{BE} = \text{constante}} \right)^{-1} = \frac{V_A}{I_C}$$

**La resistencia  $r_o$ , no afecta la polarización de los transistores, pero sí los cálculos de ganancia cuando los BJT actúan como amplificadores.**

## REGIÓN DE SATURACIÓN

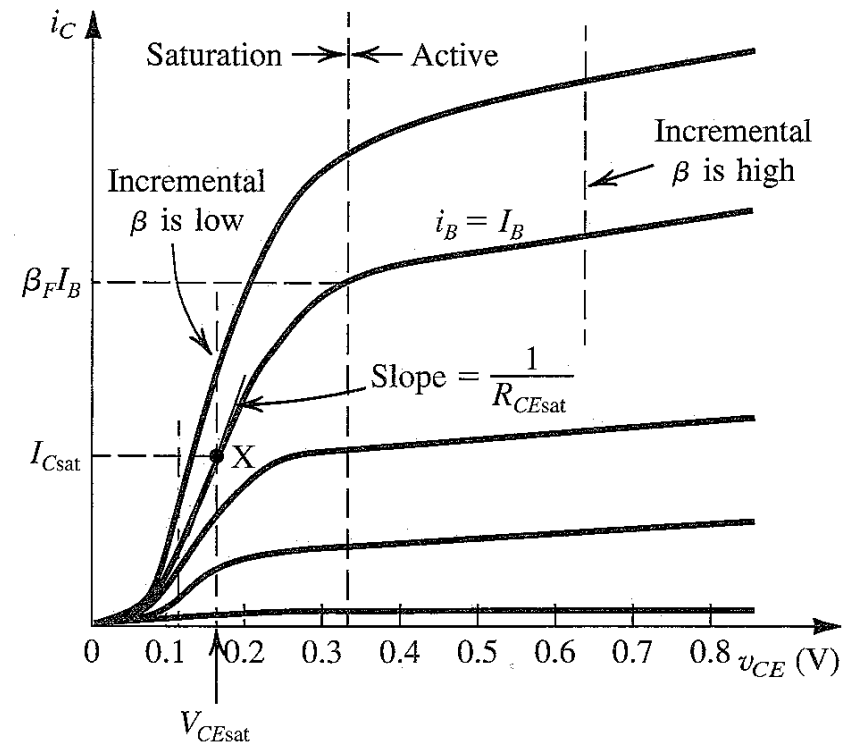
\*El transistor entra en la región de saturación cuando se cumple que

$$I_{Csat} < \beta I_B$$

\*El valor de  $I_{Csat}$  está dado por los valores de los componentes del circuito: Máxima corriente que puede circular por el transistor.

\*Las curvas características caen hacia cero con una pendiente mucho mayor que la que tienen en la región activa.

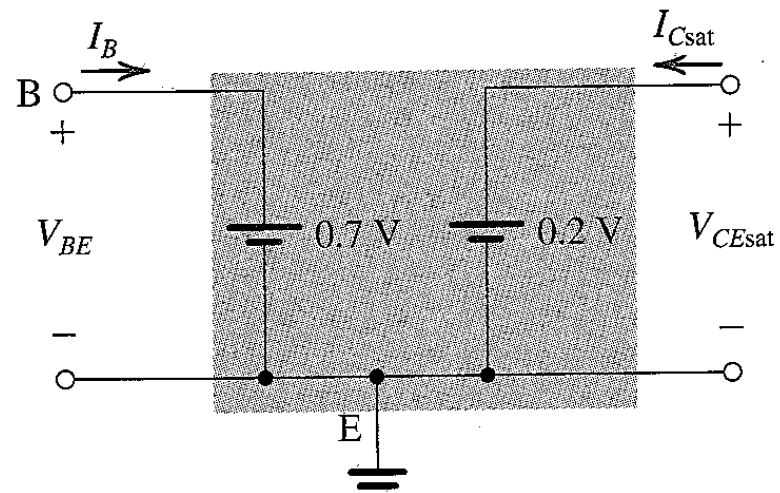
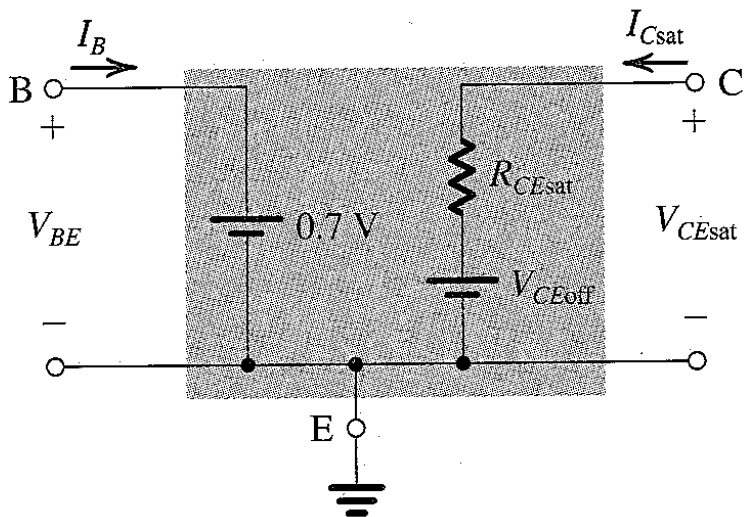
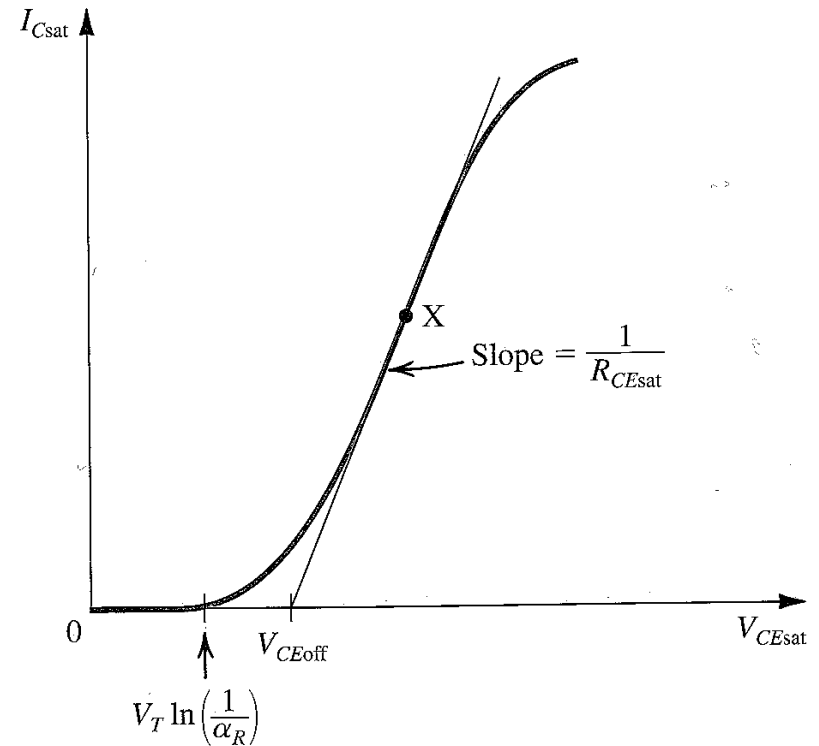
\*En el punto X la corriente es  $I_{Csat}$  y el valor de  $I_{Csat}$  está en el orden de 0,1 a 0,3 V para el ejemplo.



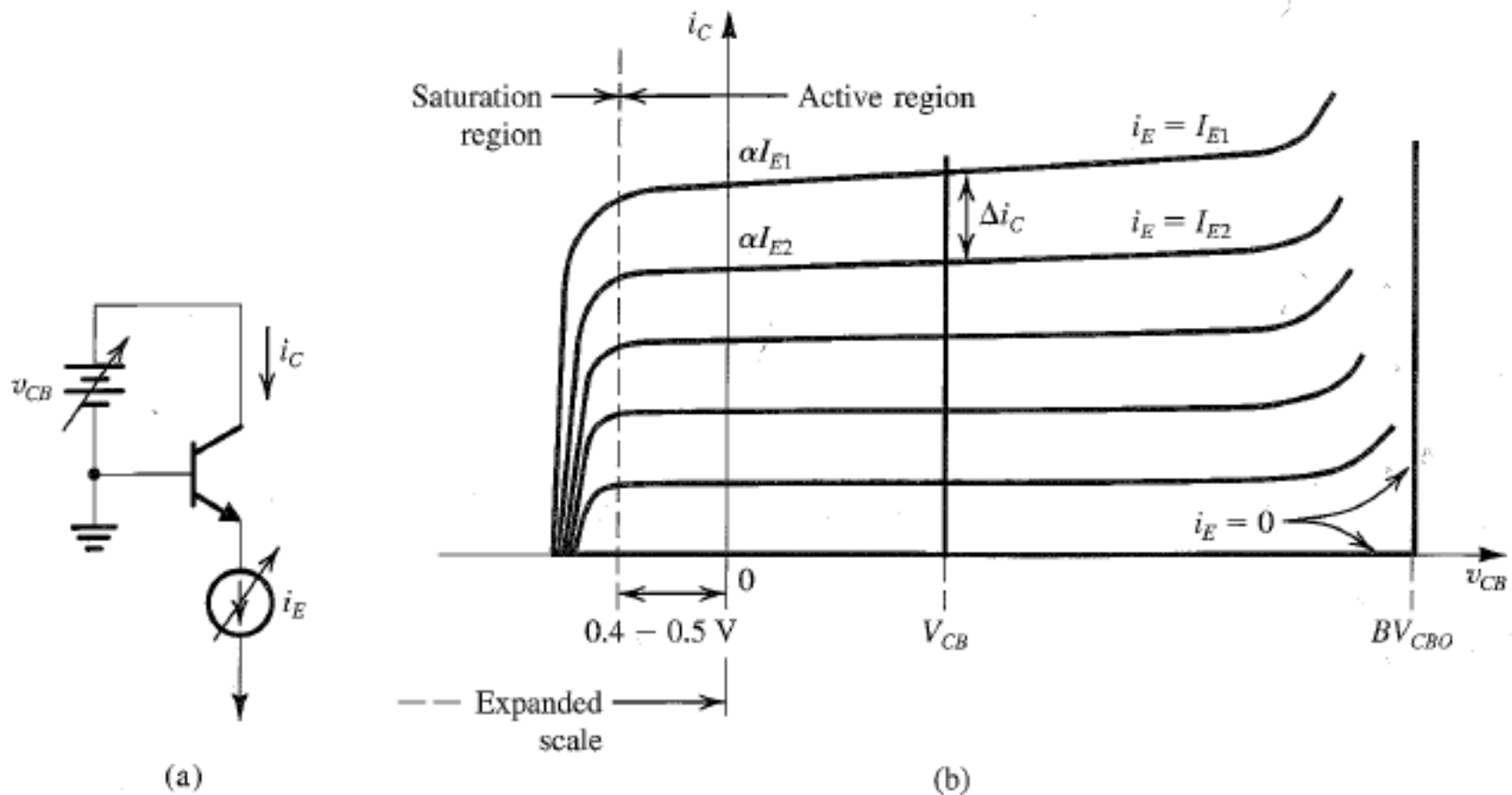
# MODELO DEL TRANSISTOR EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN

Las curvas características en la región de saturación tienen una pendiente pronunciada.

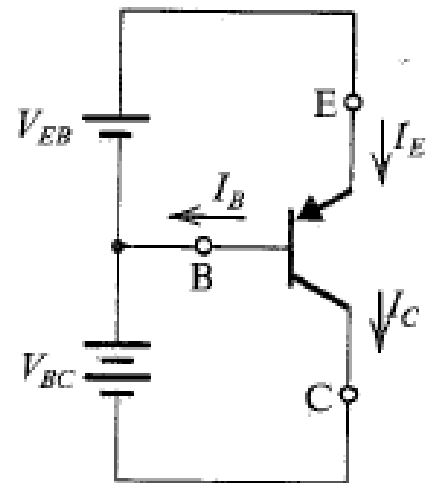
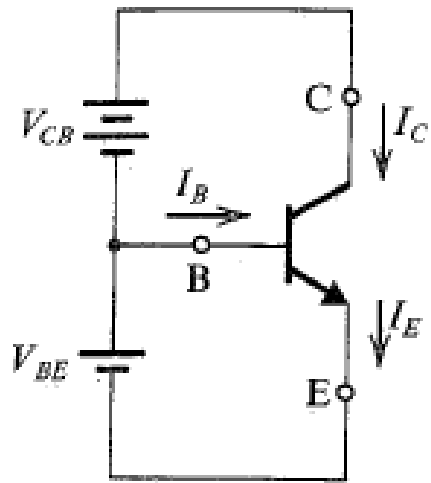
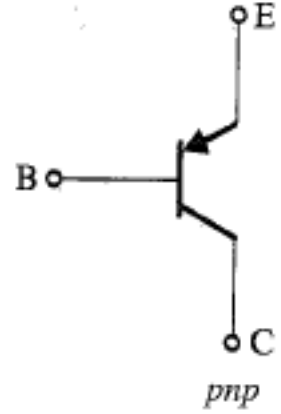
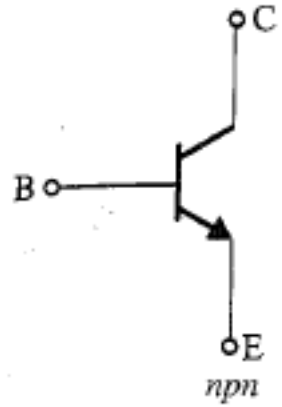
$$R_{CEsat} \equiv \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{\substack{i_B = I_B \\ i_C = I_{Csat}}}$$



# OTROS CONJUNTOS DE CURVAS CARACTERÍSTICAS



# POLARIDADES DE LOS VOLTAJES Y LAS CORRIENTES EN BJTS POLARIZADOS EN LA REGIÓN ACTIVA





## POLARIZACIÓN BÁSICA DE TRANSISTORES: ACTIVO

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$\beta = 100$$

Suponemos que está en la región activa

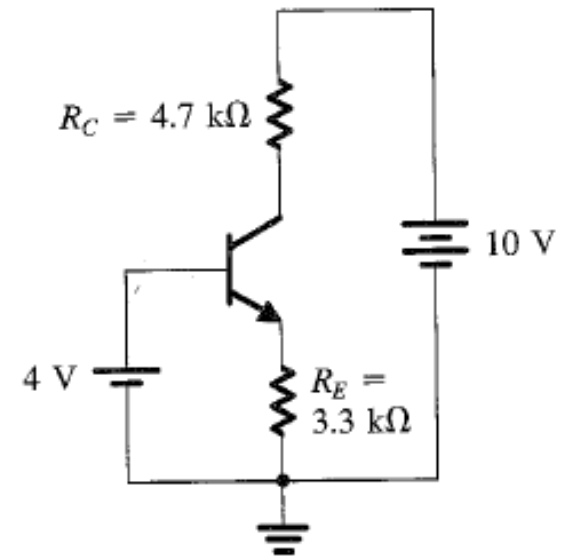
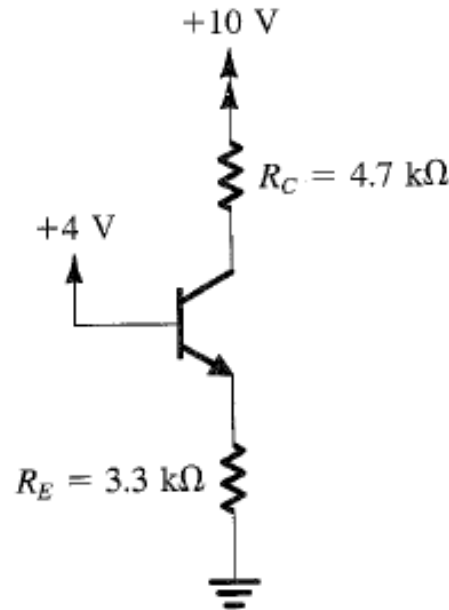
$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7V$$

$$V_E = 4V - 0,7V = 3,3V$$

$$I_E = \frac{3,3V}{3,3k\Omega} = 1mA$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{100 + 1} = 0,99 \quad I_C = \alpha I_E = 0,99 \times 1mA = 0,99mA \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0,01mA$$

$$V_C = 10V - 4,7k\Omega \times 0,99mA = 5,34V \quad V_{CB} = 5,34V - 4V = 1,34V$$



Juntura CB polarizada en inverso, por lo tanto está activo.

## POLARIZACIÓN DE TRANSISTORES: SATURADO

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$\beta = 100$$

Suponemos que está en la región activa

$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7V$$

$$V_E = 6V - 0,7V = 5,3V$$

$$I_E = \frac{5,3V}{3,3k\Omega} = 1,6mA$$

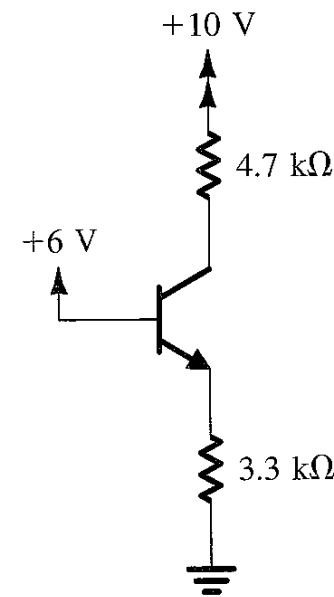
$$I_C = \alpha I_E = 0,99 \times 1,6mA = 1,58mA$$

$$V_C = 10V - 4,7k\Omega \times 1,58mA = 2,57V$$

$$V_{CB} = 2,57V - 6V = -3,43V$$

Juntura CB polarizada en directo, por lo tanto no está activo

Hay que considerar que el transistor se encuentra en la región de saturación y por lo tanto  $V_{CE} = 0,2V$



$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7V$$

$$V_E = 6V - 0,7V = 5,3V$$

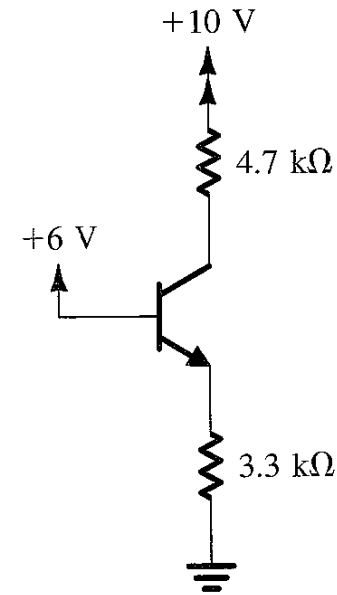
$$I_E = \frac{5,3V}{3,3k\Omega} = 1,6mA$$

$$V_C = V_E + V_{CE\max} = 5,3V + 0,2V = 5,5V$$

$$I_C = \frac{10V - 5,5V}{4,7k\Omega} = 0,96mA \quad I_B = I_E - I_C = 1,6mA - 0,96mA = 0,64mA$$

Con estos valores,  $\beta I_B = 100 \times 0,64mA = 64mA$

$\beta I_B \gg I_{C\text{sat}}$  por lo tanto el transistor está saturado



## POLARIZACIÓN DE TRANSISTORES: EN CORTE

Si no hay corriente de colector,  $V_E=0$  por lo tanto  $V_{BE}=0$ .

Si hubiera corriente de colector  $V_C$  tendría un voltaje positivo, por lo tanto  $V_{BE}=0$ . En cualquier caso el transistor está en la zona de corte.

Por lo tanto todas las corrientes son igual a cero.

El voltaje de colector es 10V y el de emisor 0V.

En este caso el voltaje  $V_{CE}$  es igual al de la fuente.

