CENTRO DE ESTUDIOS VIRTUALES

CEVIRT LTDA

NIT: 813.008.568

SEMICONDUCTORES

1. TEORÍA BÁSICA DE LOS SEMICONDUCTORES

Los dispositivos de estado sólido, tales como los diodos de juntura y los transistores se fabrican de materiales semiconductores. Estos materiales tienen propiedades eléctricas que se localizan entre la de los conductores y la de los aislantes. Los principales semiconductores utilizados son el germanio y el silicio, que adquieren la forma cristalina al encontrarse puros.

En la fig 1.1 se muestran los modelos atómicos del germanio y del silicio, Los núcleos de estos átomos tienen 32 y 14 protones respectivamente, mientras que alrededor del núcleo orbita un número idéntico de electrones. Esta igualdad en las cargas hace que átomo sea eléctricamente neutro.

Los electrones, en sus órbitas alrededor del núcleo, poseen valores específicos de energía que se denominan “niveles de energía discretos”. Entre más lejos se encuentre los electrones del núcleo se requiere mayor cantidad de energía para liberarlos.

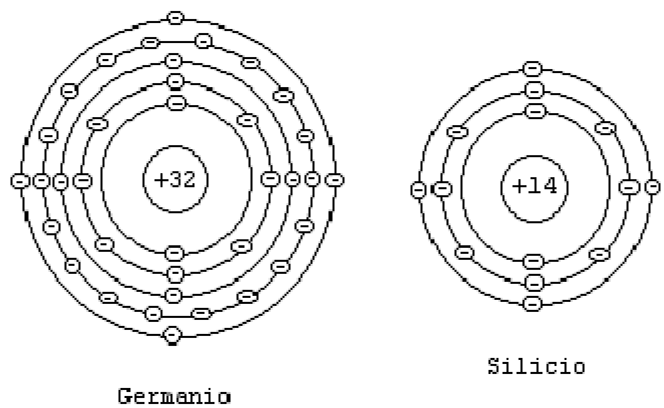


fig 1.1

Los electrones de valencia son aquellos situados en la órbita externa por lo cual pueden liberarse más fácilmente del átomo. Los electrones de la banda externa o banda de valencia, determinan las propiedades cristalinas y químicas de los elementos.

Los electrones de valencia existen en niveles de excitación si se les suministra energía desde una fuente externa. Cuando se elimina la fuente de energía normalmente los electrones se devuelven a la banda de valencia. A estos electrones en niveles de excitación se les denomina “electrones libres”; estos están muy débilmente atados al núcleo y se mueven por el semiconductor con relativa libertad en presencia de un campo eléctrico.

En un cristal semiconductor los átomos vecinos producen modificación en las energías de los átomos de valencia, estas energías se distribuyen en una “banda de energía” que representa el rango de energía de los electrones de valencia del cristal. A pesar de que las energías de los electrones tienen valores discretos, las bandas de energía que corresponden a los electrones de valencia en el cristal aparecen casi como una banda continua de distribución de energía.

Hay también, una banda de energía para cada capa dentro de cada átomo del cristal. Las bandas están separadas entre sí por “brechas de energía” que representan la energía requerida para pasar de una banda a otra. La mecánica cuántica demuestra que solo pueden existir electrones con niveles de energía que caigan dentro de las bandas y no con niveles en las brechas prohibidas. Sólo si la banda no está completa puede ocurrir que un electrón se mueva dentro de la banda de energía como en el caso de la banda de valencia. Si se les suministra energía puede ocurrir que el electrón salte de una banda a otra. La energía de un campo eléctrico puede mover un electrón desde la banda de valencia a la banda de conducción donde éste puede moverse con cierta libertad a través del cristal. Al lugar vacante dejado en la banda de valencia se le denomina “hueco”.

En un conductor la brecha prohibida entre las bandas de conducción y valencia es nula; por lo tanto, no se requiere energía para mover los electrones hasta la banda de conducción y por consiguiente el flujo de electrones que se produce al aplicar un pequeño voltaje es grande (fig 2.2)

En un semiconductor la brecha prohibida es del orden de 1V. El flujo de electrones que se consigue al aplicar un campo eléctrico es poco. En un aislador la brecha prohibida es muy ancho y casi ningún electrón está disponible en la banda de conducción.

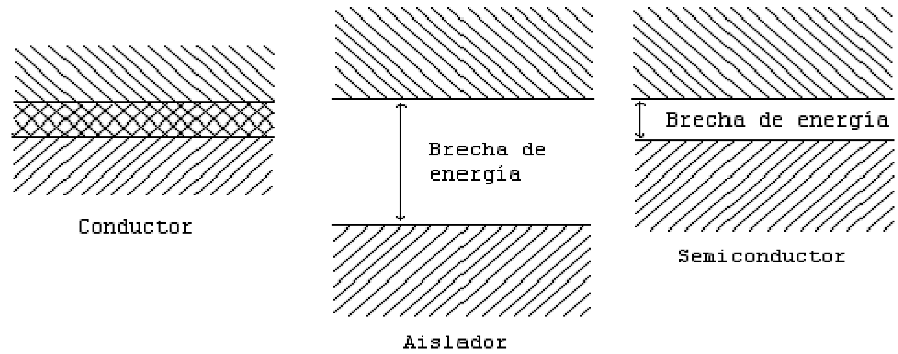


fig 2.2

Las bandas de valencia de los átomos de germanio y silicio tienen 4 electrones cada uno y en cristales forman “uniones covalentes”, es decir, los átomos adyacentes comparten un par de electrones de valencia. Al aplicar energía al cristal, los electrones de valencia absorben energía y un cierto número de ellos rompe las uniones covalentes.

Las uniones rotas mueven electrones dentro de la banda de conducción dejando huecos en la banda de valencia. Estos hacen posible que ambas bandas conduzcan. En la banda de conducción los electrones libres se mueven respondiendo a la presencia de un campo eléctrico mientras que en la banda de valencia los electrones se mueven desplazándose de un hueco al siguiente.

Los semiconductores puros requieren una energía más o menos importante para romper los enlaces covalentes. En el silicio se requiere 1.1 eV y para el germanio 0,72 eV. Cuando un electrón que se mueve en un cristal semiconductor se encuentra con un hueco, se produce su “recombinación” y el par electrón – hueco, deja de existir. Como el número de electrones es igual al número de huecos, se puede decir que un cristal es eléctricamente neutro. En la fig 1.3 se puede apreciar la generación par electrón – hueco en un semiconductor.

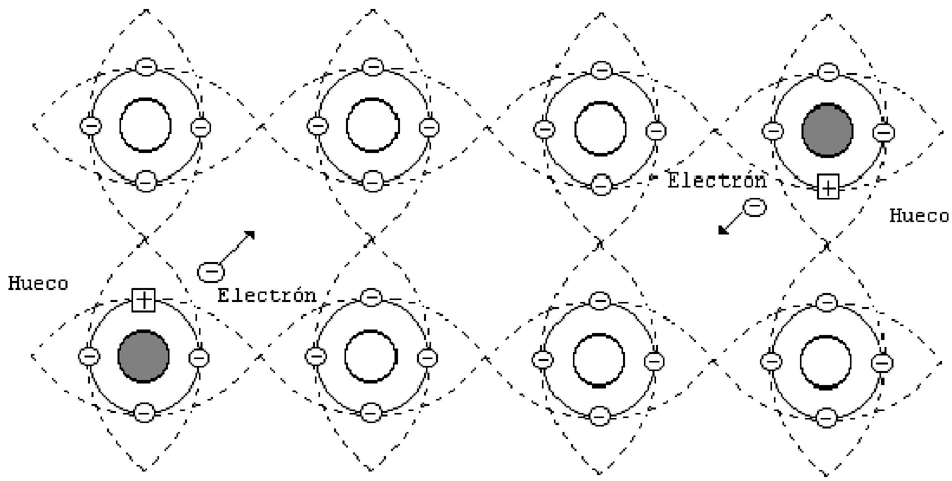
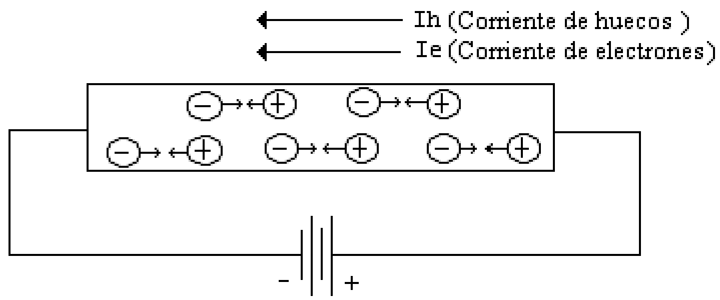


fig. 1.3



1.1 EFECTO DE LAS IMPUREZAS

Para lograr un dispositivo semiconductor útil se le agrega al cristal semiconductor puro una pequeña cantidad de otro elemento denominado impureza; a ésta técnica se le llama “dopado”. Los átomos de al impureza tienen 5 o 3 electrones de valencia.

Al dopar el cristal, se forman uniones covalentes entre los impuros y los puros en los cuales sobrará un electrón de valencia o un hueco en la vecindad del átomo de impureza dependiendo del tipo de impureza. Las impurezas que contribuyen con electrones se llaman “donadoras” y al cristal así formado se le denomina tipo N.

Los que contribuyen con huecos se les llama “aceptadores” y al cristal formado se le denomina tipo P (Ver fig 1.4.).

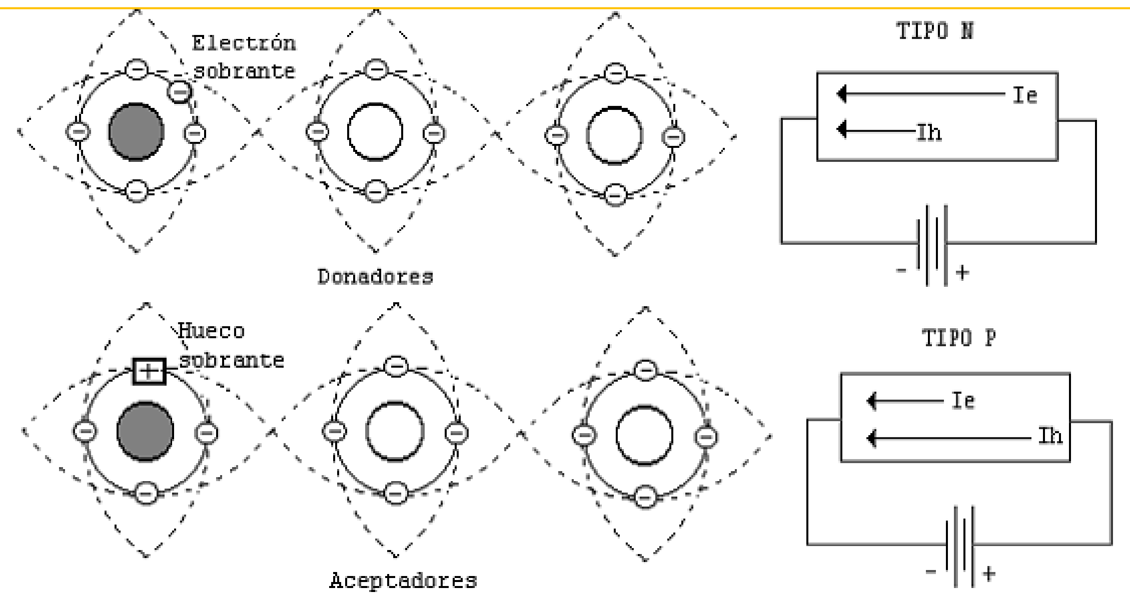


fig. 1.4

En los materiales tipo N los electrones se llaman “portadores mayoritarios” y los huecos “portadores minoritarios”. Ie >> Ih

En un material tipo P, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones los portadores minoritarios Ih >> Ie

Tanto los materiales tipo P como tipo N son eléctricamente neutros a pesar de que hay huecos y electrones libres.

2. DIODO DE JUNTURA

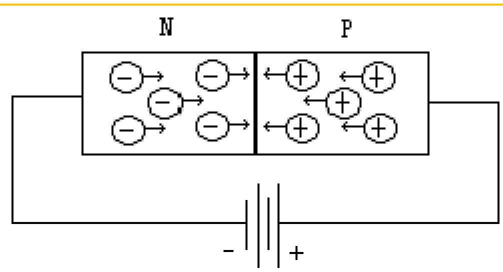
2.1 POLARIZACIÓN

Si un material tipo P y otro de tipo N se juntan mecánicamente para formar un único cristal y los materiales, por tanto, constituyen una juntura en la cual se conserva la continuidad cristalina, entonces, esa juntura se llama juntura PN o diodo de juntura.

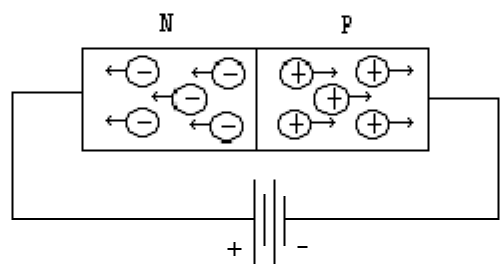
Cuando se juntan estos dos materiales el tipo N y el tipo P se produce un equilibrio, debido a que los huecos, del tipo P por difusión pasan hacia el tipo N mientras que los electrones fluyen en dirección contraria.

Durante la difusión, las áreas ionizadas a cualquier lado de la juntura llegan a quedar relativamente vacías debido a la recombinación de electrones y huecos, ésta área se denomina “zona de transición”. También se produce un campo eléctrico debido a los iones negativos y positivos recientemente creados en las caras opuestas de los materiales, lo que hace decrecer la conducción. En esta zona se crea una diferencia de potencial que se llama “barrera de potencial” y que es igual a 0,3 voltios para el germanio y 0,7 V para el silicio a temperatura ambiente.

Al aplicarse un voltaje que anule la zona de transición, se polariza directamente el diodo (positivo a P y negativo a N) se crean dos corrientes, una de electrones y otra de huecos mayoritarios como se indica en la fig.1.5(A). Al polarizarse inversamente se aumenta la zona de transición y solo fluye una pequeña corriente debido a portadores minoritarios (fig. 1.5B)



Polarización Directa
fig. 1.5(A)



Polarización Inversa
fig. 1.5(B)

A la corriente debida a los portadores mayoritarios se le llama “corriente de difusión” I_d. A la debida a los portadores minoritarios “corriente de saturación”. I_S.

En polarización directa: $I = I_d - I_S$

En polarización inversa: $I = - I_S$

La corriente directa en función del voltaje aplicado es:

$$I = I_S\left(e^{\frac{q}{KT}V} - 1\right)$$

donde

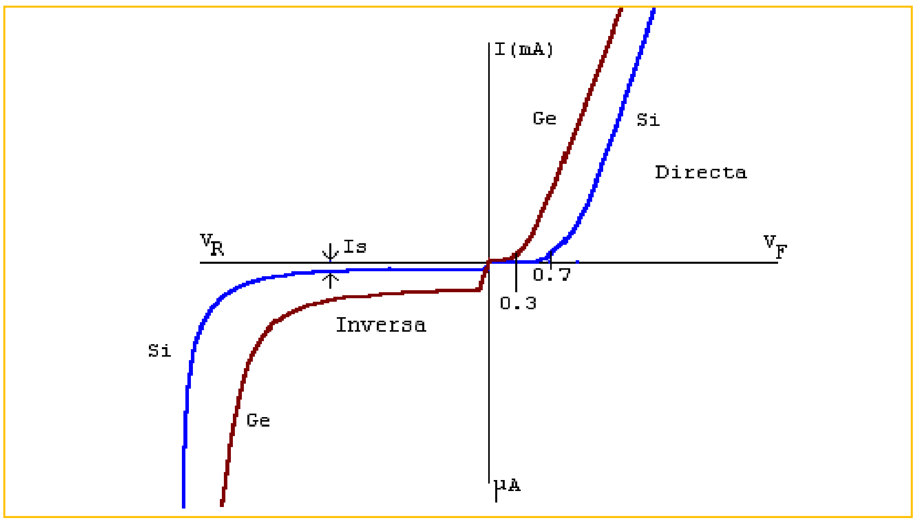
q= carga del electrón = 1,6 x 10^{-19} Coulomb

K = constante de Boltzman = 1,38 x 10^{-23} Joule/ºK

T = Temperatura absoluta (ºK)

A la temperatura ambiente (T=300ºK, KT/q = 0,026)

2.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS



La corriente de saturación o fuga crece abruptamente con la temperatura. Aproximadamente dobla su magnitud cada 10ºC de aumento de la temperatura.

Como para el Germanio la brecha de energía es 0,72 eV y para el silicio es 1,1 eV es de concluir que la corriente de fuga que es debida a los portadores minoritarios es más importante en el germanio.

Debido a esto el silicio permite el uso de temperaturas más elevadas.

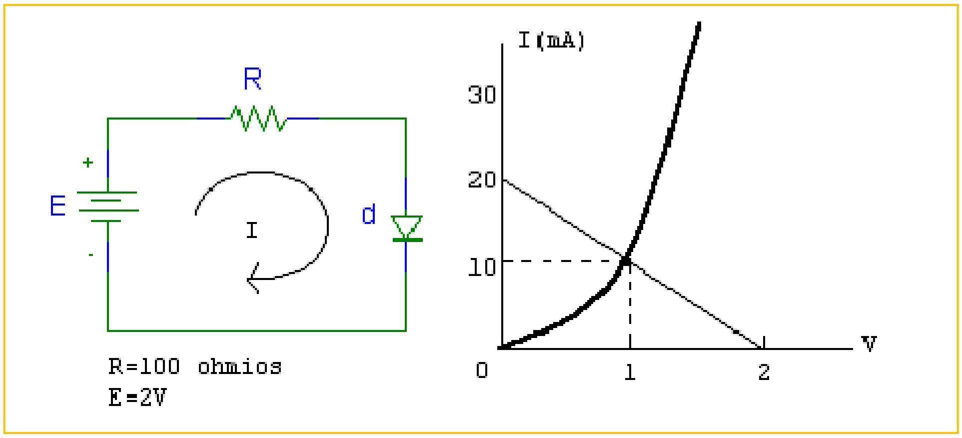
La resistencia dinámica de un diodo $r_f = dV/dI$

$$I \approx I_s\, e^{qV/KT} \rightarrow dI / dV = q/KT\, I_s\, e^{qV/KT} = qI / KT$$

$$r_f = KT / q\, I$$

a T=27ºC =300ºK → $\mathbf{r_f = 26/ I}$ donde I está en mA.

Polarización

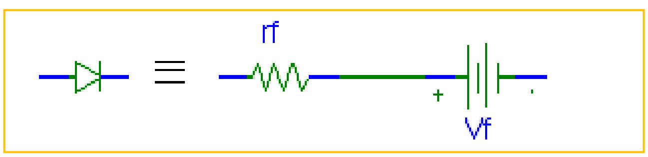


I=E/R = 2/100 = 20 mA

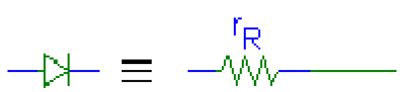
El punto de funcionamiento se encuentra de la misma forma que para el diodo de vacío. Para el ejemplo tenemos: I=10mA ; V=1V

Para cálculos analíticos se representa el diodo de la siguiente manera:

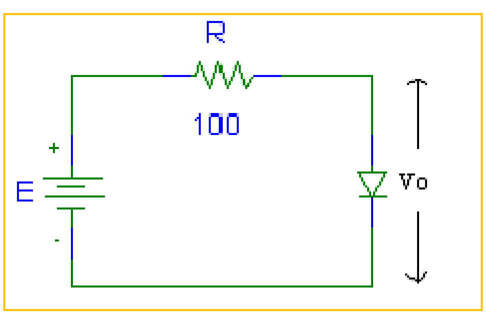
En sentido directo.



En sentido inverso



Ejemplo:

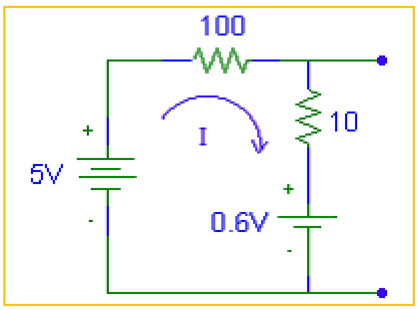


En el circuito hallar la caída de voltaje en el diodo cuando:

a) E = 5V
b) E = - 20V

siendo r_f =10Ω, V_f=0,6V; r_R =10kΩ

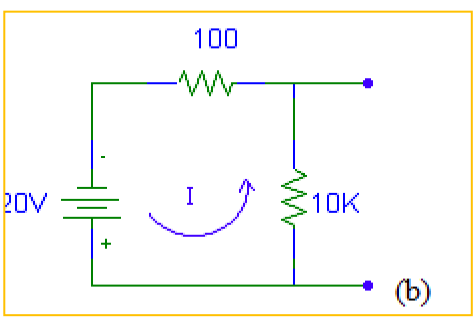
En directo:



I = (5-0,6) / 110 = 4,4V/0,11K = 40mA

V_O = 0,6 + 40mA x 10 Ω = 0,6 + 0,4 = 1,0 V

En inverso:



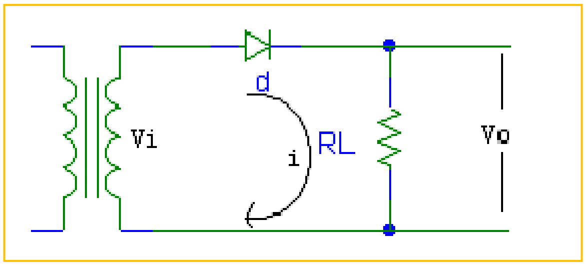
I = 20/10,1K Ω V_o=(-20/10,1K) x 10K = -19,8V

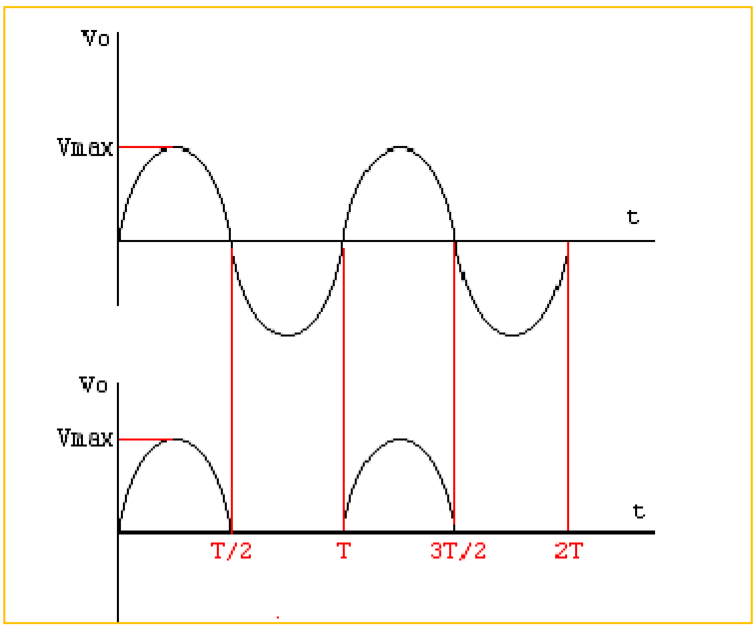
Ejercicio:

Un diodo semiconductor tiene las siguiente características: V_f = 0,3V; r_f = 20Ω R_r=20kΩ, si se aplica un voltaje en sentido directo de 40V ¿Qué resistencia de protección se debe agregar en serie para limitar la corriente en el diodo a 200mA?

3. RECTIFICACIÓN SIMPLE

Es el proceso de convertir las tensiones y corrientes alternas en corrientes continuas pulsatorias.





$$v_i = V_{max}\ \text{sen}\ wt,\quad \text{para}\ 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$i = \frac{V_{max} - V_f}{R_f + R_L}\ \text{sen}\ wt$$

$$I_{max} = \frac{V_{max} - v_f}{R_f + R_L}$$

$$\text{Para}\quad \frac{T}{2} \leq t \leq T:$$

$$i = -\frac{V_{max}}{R_L + R_r}\text{sen } wt, \quad I_{max} = -\frac{V_{max}}{R_L + R_r} \approx 0$$

$$I_{DC} = \frac{I_{max}}{\pi} = \frac{V_{max} - V_f}{\pi(R_F + R_L)}$$

$$V_{ODC} = I_{DC}R_L = \frac{(V_{max} - V_f)R_L}{\pi(R_F + R_L)}$$

$$V_{ODC} = \frac{V_{Omax}}{\pi}; \quad I = \frac{I_{max}}{2}; \quad V_O = \frac{V_{Omax}}{2}$$

Factor de rizado (γ):

Mide la cantidad de tensión alterna presente en la salida.

$$\gamma = \frac{V_{OAC}}{V_{ODC}};$$

Como la señal de salida está compuesta de una señal directa y otra alterna, tenemos:

$$V_O{}^2 = V^2{}_{OAC} + V^2{}_{ODC} \Rightarrow V^2{}_{OAC} = V^2{}_O - V^2{}_{ODC} \Rightarrow$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{V_O}{V_{ODC}}\right)^2 - 1}; \quad V_O = \frac{V_{Omax}}{2}; V_{ODC} = \frac{V_{Omax}}{\pi}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} = 1{,}21$$

Potencia disipada en el diodo:

$$P_D = I^2{}_O R_F$$

Eficiencia de rectificación (η):

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida continua}}{\text{Potencia de entrada total}} \times 100 = \frac{I^2{}_{ODC} R_L}{I^2{}_o(R_F + R_L)} \times 100$$

$$\eta = \frac{4R_L}{\pi^2(R_F + R_L)} \times 100 = \frac{40,5}{1 + \frac{R_F}{R_L}} \%$$

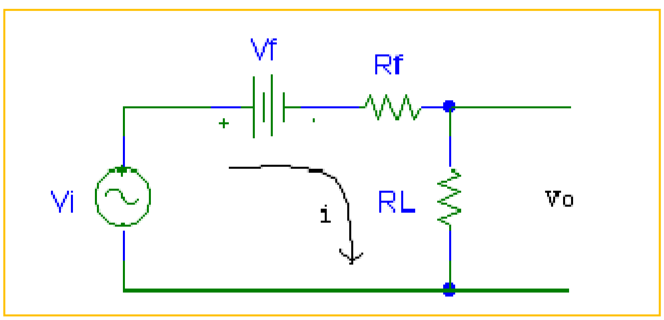
Por tanto, la máxima eficiencia de rectificación es 40,5%.

Tensión inversa pico: Es la tensión máxima que aparece en el diodo cuando éste no conduce. Para este rectificador es V_{max}.

Ejemplo:

Si el rectificador de media onda se le aplica una señal V_i = 10senwt y V_f = 0, R_F = 50Ω; R_L= 1kΩ; R_r = ∞, determinar: (a) Forma de onda de la salida (b) El valor efectivo de la salida, el valor efectivo de la parte AC de la salida y el valor DC de la salida.

En conducción.

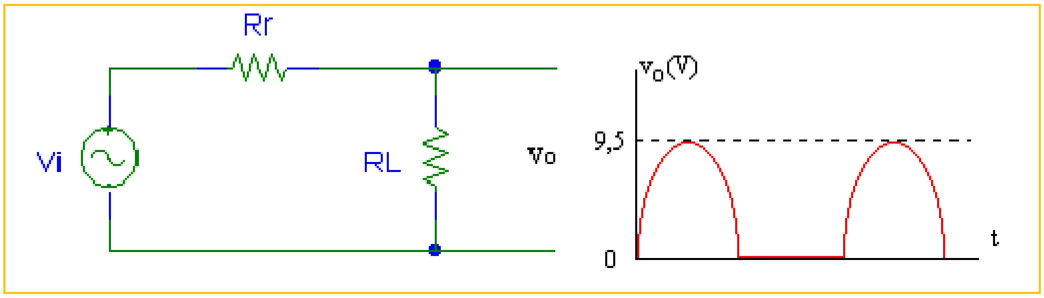


i = I_{max} = (10-0) / (1k+50 Ω) = 9,5mA

V_{omax} = I_{max}*R_L= 9,5V

En inverso:

Como R_r = ∞ entonces i=0 vo=0



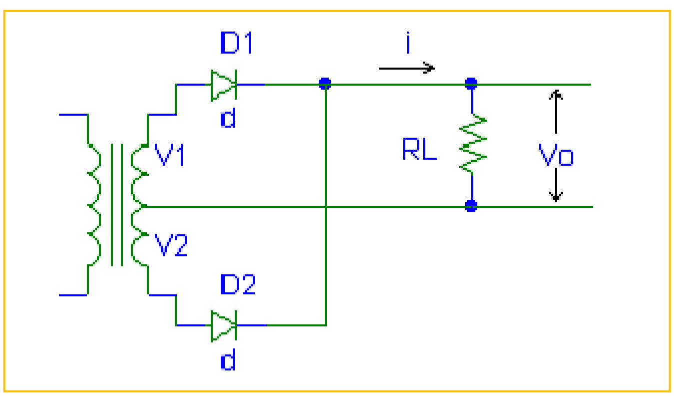
(b) $V_o = V_{omax}/2 = 9{,}5/2 = 4{,}75V$

$V_{oDC} = V_{omax} / \pi = 9{,}5 / \pi = 3V$

$$V_{oAC} = \sqrt{V^2{}_o - V^2{}_{oDC}} = \sqrt{(4{,}75)^2 - 3^2} = 3{,}7V$$

4. RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Básicamente consiste en dos rectificadores de media onda y una resistencia de carga común. La forma de rectificación es igual que para diodos de vacío. O sea, como v_1 y v_2 están desfasadas 180º, cada diodo conducirá durante medios ciclos alternos.



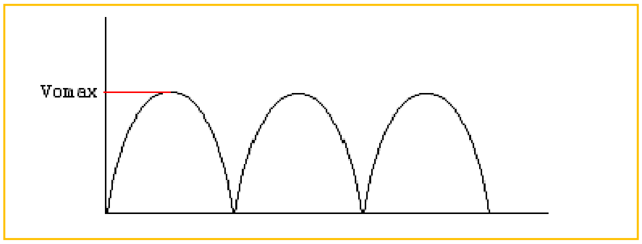
$v_1 = V_{max}$ sen wt
$v_2 = - V_{max}$ sen wt

$I_{max} = (V_{max} – V_F) / (R_F+R_L)$

$V_{omax} = I_{max} R_L$

$V_{oDC} = 2V_{omax}/\pi$

$$V_o = \frac{V_{omax}}{\sqrt{2}}$$



Factor de rizado(γ):

$$\gamma = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} = 0{,}48$$

En esta rectificación el rizado es menor que para el rectificador de media onda.

Potencia disipada:

$$P_D = \frac{{I_o}^2 R_F}{2} \quad \text{(En cada diodo)}$$

Obsérvese que para el mismo valor de I_o la potencia disipada en cada diodo es la cuarta parte del correspondiente al rectificador de media onda.

Eficiencia de rectificación (η):

$$\eta = \frac{I_{oDC}^2 R_L}{I_o^2 (R_F + R_L)} \times 100 = \frac{8R_L}{\pi^2 (R_F + R_L)} \times 100$$

$$\eta = \frac{81.1}{1 + \frac{R_F}{R_L}} \%$$

La eficiencia ahora es el doble.

Tensión inversa de pico:

Cuando un diodo está cortado el otro está en corto circuito, luego la tensión inversa de pico es 2 V_{max}

Ejemplo:

Comparar los valores efectivos de los dos rectificadores para la misma señal de entrada.

$$v_i = -v_2 = 10\,\text{sen}\,wt$$

$$I_{max} = \frac{(10-0)V}{(1k+50)\Omega} = 9{,}5mA$$

$$V_{omax} = I_{max}R_L = 9{,}5V$$

$$V_o = \frac{V_{omax}}{\sqrt{2}} = \frac{9{,}5}{\sqrt{2}} = 6{,}7V$$

$$V_{oDC} = \frac{2V_{omax}}{\pi} = \frac{2\times 9{,}5}{\pi} = 6V$$

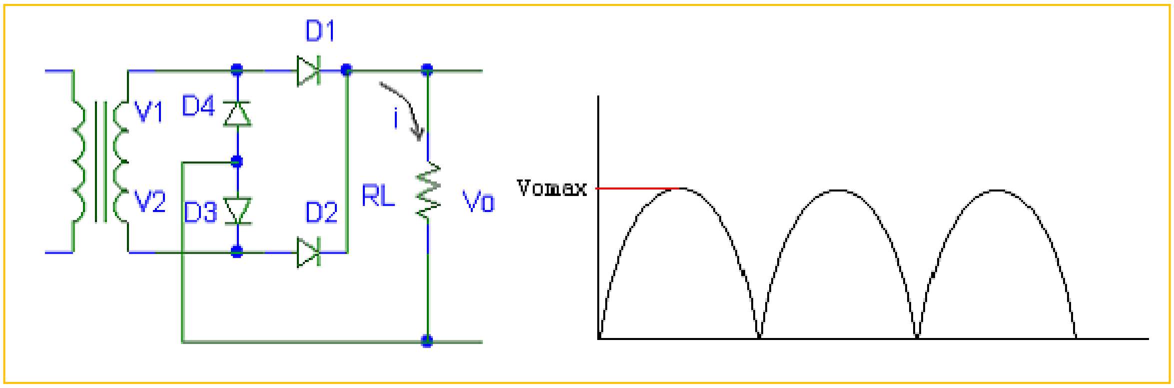
$$V_{oAC} = \sqrt{V_o^2 - V_{oDC}^2} = \sqrt{6{,}7^2 - 6^2} = 3V$$

Conclusión:

El valor efectivo total y el valor de corriente directa son ahora mayores y el valor efectivo de la CA menor, esto nos lleva a concluir que tiene mejor rectificación.

5. RECTIFICADOR EN PUENTE

Es otro rectificador de onda completa que usa cuatro diodos y un transformador sin punto medio.



Cuando la señal de entrada es positiva conducen los diodos D1 y D3 y cuando es negativa, conducen D2 y D4.

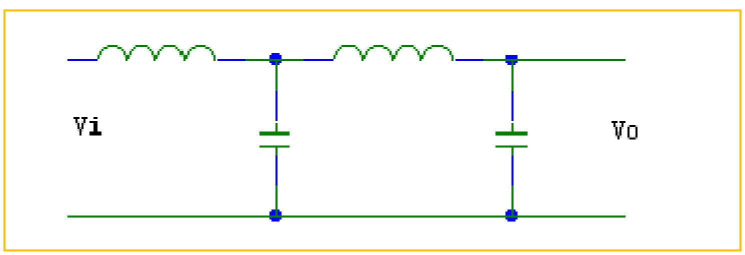
Si $v_i = V_{max}$ sen wt → $I_{max} = (V_{max} - 2V_F) / (2R_F + R_L)$

La tensión inversa de pico es ahora V_{max}

6. FILTRACIÓN

Es el proceso de reducir las componentes alternas que tienen la corriente continua pulsatoria de un rectificador.

A continuación tenemos un filtro típico:

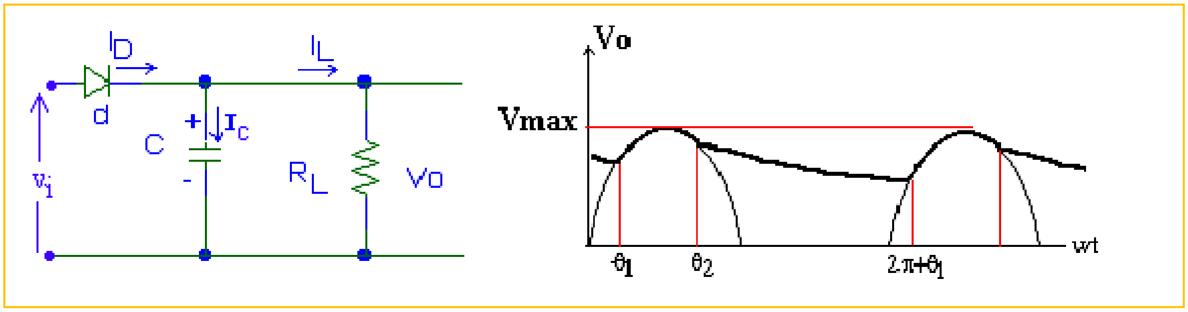


La componente continua de v_i no es afectada por el filtro, pero la componente alterna es atenuada por él. Los elementos en serie de un filtro deben presentar una impedancia alta a la componente alterna y los elementos en paralelo una impedancia baja a esta componente. Para la componente continua debe verificarse lo contrario.

Filtro de condensador:

Consiste en un condensador conectado en paralelo, con la resistencia de carga.

Entre ϕ_1 y ϕ_2 el diodo conduce. $v_o = V_{max}$ Senwt entre ϕ_2 y $2\pi+\phi_2$ el diodo no conduce, entonces el condensador se descarga por R_L:



$$v_o = (V_{max}\ \text{sen}\ \phi_2)e^{\frac{-t}{R_L C}}$$

Cuando el diodo no conduce:

$i_c = -\ i_L = -v_o/R_L$

En conducción :

$i_L = (V_{max}\text{sen wt}) / R_L$; $i_c = V_{max}\text{wc Cos wt}$

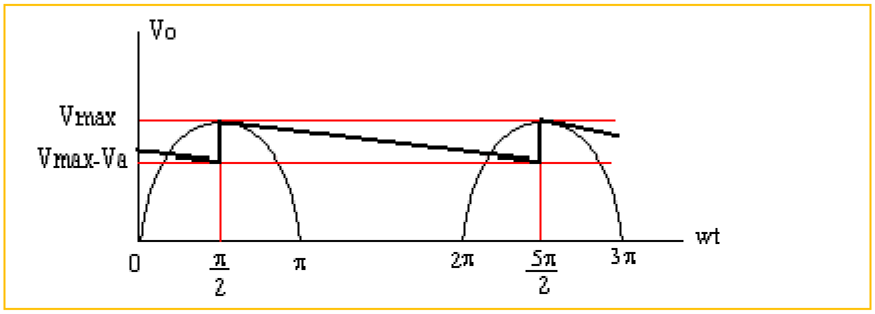
$i_D = i_L + i_C$

La corriente máxima o pico que pasa por el diodo ocurre cuando wt=$\square_1$, (esto supone R_L>>1/wc) y es:

$$I_{dmax} = V_{max}(\text{wc Cos}\phi_1 + \text{sen}\phi_1/R_L)$$

El diodo debe ser capaz de transmitir esta corriente de pico. Si el valor de C aumenta, el descenso de v_O cuando el diodo no conduce disminuirá, pero esto va acompañado de un aumento de I_{Dmax}.

Para analizar los valores continuos y el factor de rizado se aproxima la curva a tramos lineales así:



$$V_{oDC} = V_{max} - V_a/2$$

V_a = Voltaje debido a la variación de la carga almacenada en C. Como el voltaje varía linealmente, entonces la i_C es constante.

$$Va = \frac{1}{C}\int_0^T i_c dt = \frac{I_C T}{C} = \frac{I_C}{fC} \qquad \text{como en la descarga } i_C = i_L$$

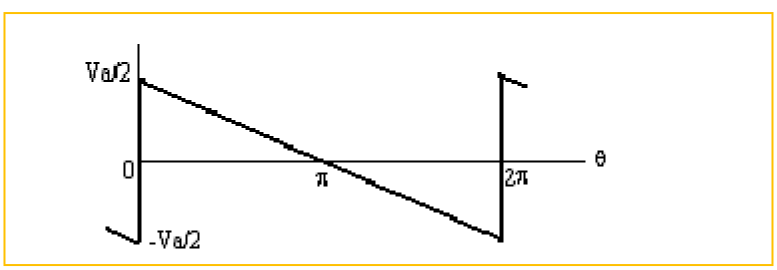
$$Va = \frac{I_{oDC}}{fC} \Rightarrow V_{oDC} = V_{max} - \frac{I_{oDC}}{2fC} = I_{oDC} R_L$$

$$V_{oDC} = \frac{V_{max}}{1 + \dfrac{1}{2fR_L C}}$$

Factor de rizado (γ):

$$\gamma = \frac{V_{oAC}}{V_{oDC}}$$

El ripple o rizado es aproximadamente una forma triangular que varía entre Va/2 y –Va/2, entonces.



$$V_{oAC} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left(-\frac{Va}{2\pi}\theta + \frac{Va}{2}\right)^2 d\theta} = \frac{Va}{2\sqrt{3}}$$

$$Va = \frac{I_{LDC}}{fC} = \frac{V_{oDC}}{fR_L C} \Rightarrow V_{oAC} = \frac{V_{oDC}}{2\sqrt{3}\,fR_L C}$$

$$\gamma = \frac{1}{2\sqrt{3}R_L C}$$

Corriente de pico del diodo: Ocurre cuando wt = θ_1

$$V_{max}\,\text{sen}\,\theta_1 = V_{max} - Va\ ; \quad Va = \frac{V_{ma}(2fR_L C)}{(1+2fR_L C)\,fR_L C} = \frac{2V_{max}}{1+2fR_L C}$$

$$\text{sen}\,\theta_1 = 1 - \frac{2}{1+2fR_L C}$$

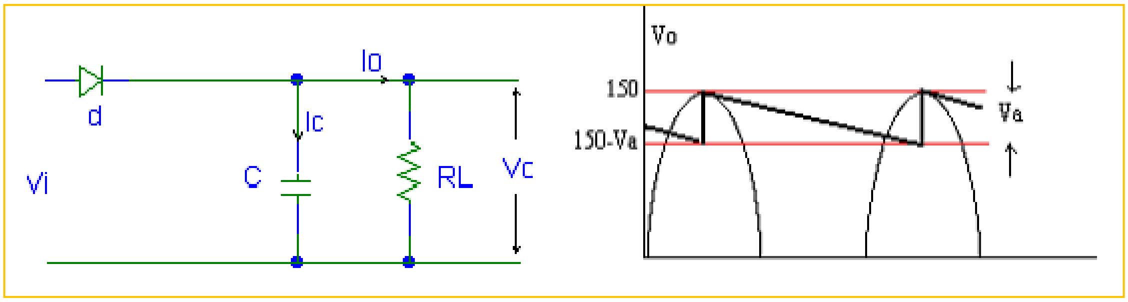
$$\theta_1 = \text{sen}^{-1}\frac{2fR_L C - 1}{2fR_L C + 1}$$

$$I_{Dmax} = V_{max}\left(WC\cos\theta_1 + \frac{\text{sen}\,\theta_1}{R_L}\right)$$

Como el factor de rizado es bastante pequeño, entonces $V_o \approx V_{max}$ y la tensión inversa de pico es $2V_{max}$

Ejemplo:

Un rectificador de media onda con filtro de condensador tiene los siguientes valores: v_i = 150 senwt; C=20μf y R_L=10kΩ. Suponiendo el diodo ideal, calcular: V_{oDC}, I_{aDC}, g, I_{Dmax}, tensión inversa de pico. F = 60Hz.



V_{oDC} = 150 – Va/2

Va = variación del voltaje en el condensador cuando el diodo está en corte

i_C= i_L= cte.

$$Va = \frac{1}{C}\int_0^T i_L\,dt = \frac{I_{ODC}}{fC} = \frac{I_{ODC}}{60\times 20\times 10^{-6}} = 0{,}83 I_{ODC}$$

Igualando: $150 - 0{,}42 I_{LDC} = 10 I_{LDC}$

$I_{ODC} = 150 / 10{,}42 = 14{,}4$ mA $Va = 0{,}83 \times 14{,}4 = 12V$

$V_{ODC} = 10\, I_{ODC} = 144V$

$\gamma = V_{OAC} / V_{ODC}$

$$V_{OAC} = \frac{Va}{2\sqrt{3}} = \frac{12}{2\sqrt{3}} = 3{,}4V$$

$\gamma = 3{,}4/144 = 0{,}024$

$I_{Dmax} = ?$

R_L = 10000Ω; X_C = 1/wc = 1/(377x20x10^{-6}) = 132,5Ω

$R_L >> X_C$, el pico de corriente ocurre cuando el diodo comienza la conducción. (wt = θ_1)

$$I_D = I_C + I_L = C\frac{dv_i}{dt} + \frac{v_i}{R_L} = 150\left(W.C.\cos\theta_1 + \frac{\text{sen}\,\theta_1}{R_L}\right)$$

$I_{Dmax} = 1131\cos\theta_1 + 15\,\text{sen}\theta_1$; $V_{max}\,\text{sen}\,\theta_1 = 150 - V_a \Rightarrow 150\,\text{sen}\theta_1 = 138$

$\text{sen}\theta_1 = 138 / 150 \rightarrow \theta_1 = 67°$

$I_{Dmax} = 1131\cos 67° + 15\,\text{sen}\,67° = 455\text{ mA}$

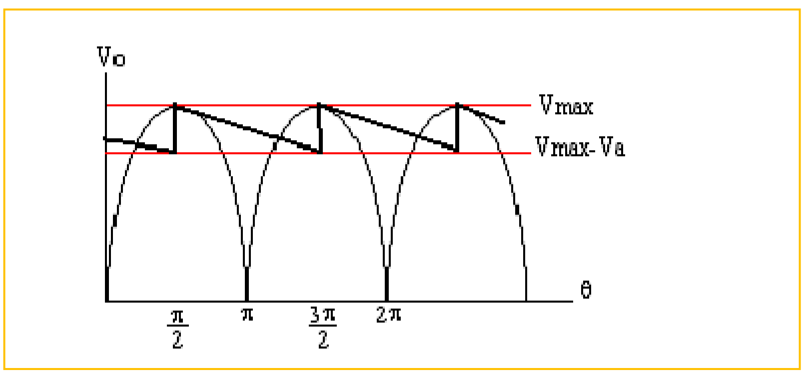
Tensión inversa de pico = $2V_{max}$ = 300V

Ejercicio:

Diseñar una fuente de alimentación utilizando un rectificador de media onda con un filtro de condensador. Las especificaciones para el filtro son:

V_{ODC} = 150V, I_{LDC} =20mA y □ = 0,01. Determinar los valores de C y V_{max} ¿Cuál es el valor de la corriente de pico del diodo? Suponga que el diodo es ideal.

Para la ***rectificación de onda completa*** tenemos:



El procedimiento para hallar las ecuaciones es exactamente igual, excepto que ahora Va es,

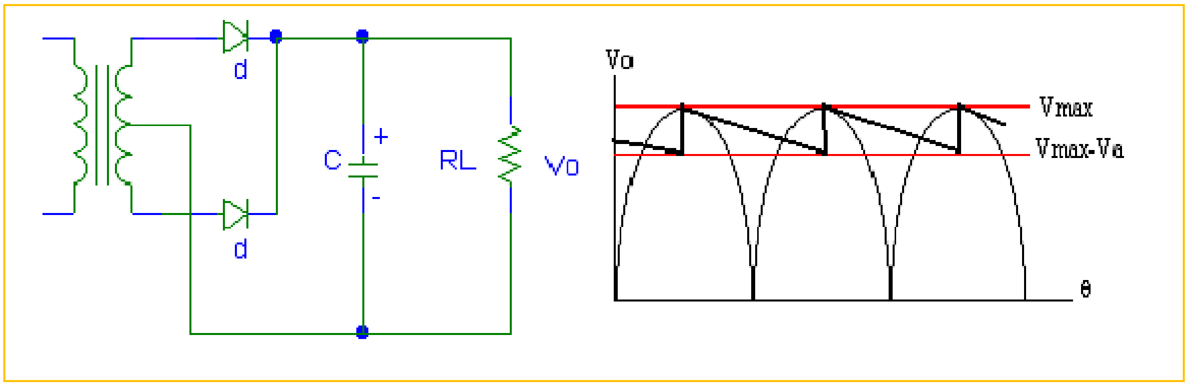
$$Va = \frac{1}{C}\int_0^{\frac{T}{2}} i_L\,dt = \frac{I_{LDC}}{2fC}$$

Como la frecuencia ahora el doble, el valor del condensador es la mitad del valor tomado en la rectificación de media onda.

Ejemplo:

Desarrollar el ejercicio anterior para rectificación de onda completa.

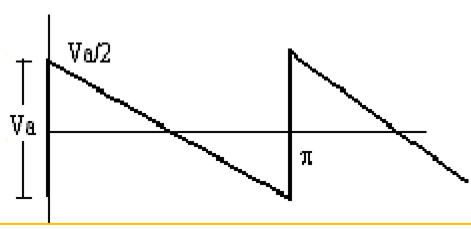
V_{oDC} = 150V; I_{LDC} = 20mA; γ = 0,01



$$V_{oDC} = I_{LDC}\,R_L \rightarrow R_L = 150 / 20 = 7{,}5\text{k}\Omega$$

$$Va = \frac{1}{C}\int_0^{\frac{T}{2}} I_{LDC}\,dt = \frac{I_{LDC}}{2fC}$$

$R_L = 7{,}5\text{k}\Omega$.



$50 \rightarrow V_{oAC} \leq 1{,}5\text{V}$

$$V_{oAC} = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}\left(-\frac{Va}{\pi}\theta + \frac{Va}{2}\right)^2 d\theta}$$

$$V_{oAC} = \frac{Va}{2\sqrt{3}} \leq 1{,}5 \Rightarrow Va \leq 3{,}0\sqrt{3}$$

$$Va \leq 5{,}2V$$

$(I_{LDC}/2fC\ ) \leq 5{,}2V \rightarrow C \geq (20 \times 10^{-3}) / (2 \times 60 \times 5{,}2)$

entonces C ≥ 32 □f.

$V_{max} = 150 + 5{,}2 / 2 = 152{,}6$ V

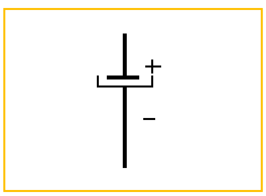
Corriente de pico = ?

$V_{max}\text{Sen } \theta_1 = V_{max} - Va$

$\text{Sen } \theta_1 = (152{,}6-5{,}2) / 152{,}6) \rightarrow \theta_1 = 75º.$

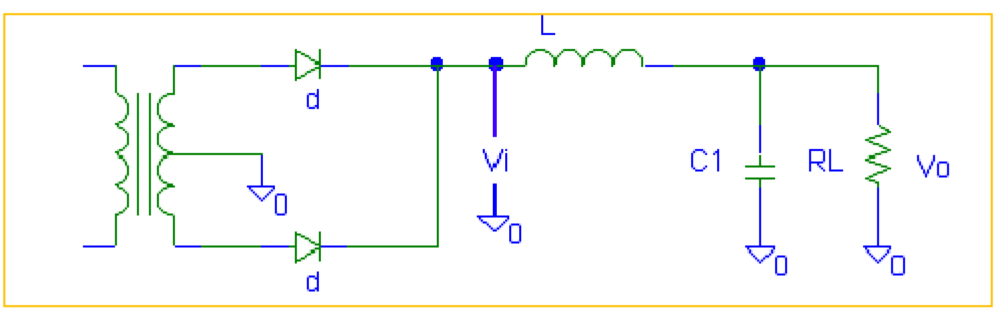
$$I_{Dmax} = V_{max}\left(wc\cos\theta_1 + \frac{\text{sen }\theta_1}{R_L}\right) = 493{,}6mA$$

Es de anotar que los condensadores usados en los filtros son electrolíticos, o sea, polarizados y se debe conectar el positivo de él al positivo de la salida y el negativo de él al negativo de la salida. Su símbolo es:



Filtro con bobina de entrada:

Si se requiere una muy buena filtración con un rizado muy pequeño se necesitaría un condensador demasiado grande que haría el diseño más costoso y el filtro demasiado pesado. Además la corriente de pico sería grande que llevaría a conseguir el diodo de una gran capacidad de corriente. En tales casos, es aconsejable diseñar otra clase de filtro como el de la figura siguiente:



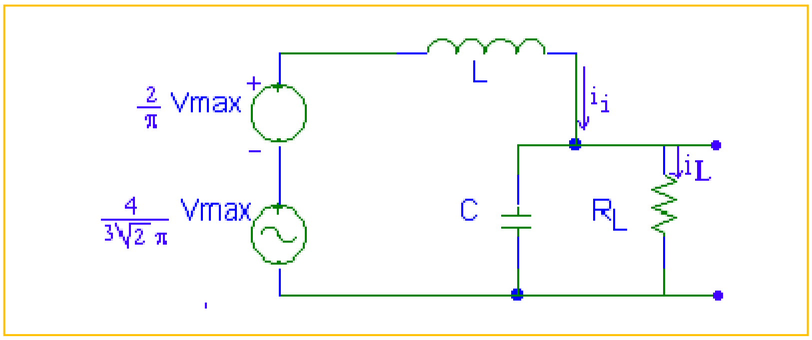
Despreciando la caída de tensión en los diodos, la salida de un rectificador de onda completa se puede desarrollar según la serie de fourier, así:

$$v_i = \frac{2}{\pi} V_{max} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2wt - \frac{2}{15} \cos 4wt - ...... \right)$$

Para el estudio de los parámetros del filtro solo intervienen con gran importancia los dos primeros términos, así tenemos:

$$v_i \approx \frac{2}{\pi} V_{max} - \frac{4}{3\pi} V_{max} \cos 2wt \quad (1)$$

En general, R_L >> 1/wc y wL >>1/wc



La tensión continua en la salida es

$$V_{oDC} = \frac{2V_{max}}{\pi} - I_{LDC} R$$

$R = R_F + r_L$

Donde r_L es la resistencia de la bobina.

La componente alterna en la salida es:

$$V_{oAC} = \frac{4V_{max}}{3\sqrt{2}\pi} \times \frac{\frac{1}{2wc}}{2wL - \frac{1}{2wC}} = \frac{4V_{max}}{3\sqrt{2}\pi(4w^2LC - 1)}$$

como wL >> 1/wC → $4w^2LC >> 1$;

$$V_{oAC} = \frac{V_{max}}{3\sqrt{2}\pi w^2 LC}$$

Suponiendo $R_F + r_L \approx 0$

$\gamma = V_{oAC} / V_{oDC}$ entonces:

$$\gamma = \frac{1}{6\sqrt{2}w^2 LC}$$

De la relación (1) podemos derivar que (wL >> 1/wC) :

$$i_i = \frac{2V_{max}}{\pi R_L} - \frac{4V_{max}}{3\pi.2wL}\cos(2wt+\phi); \quad \phi = \text{águlo de fase.}$$

Como en el filtrado i_i □ 0, entonces:

$$\frac{2V_{max}}{\pi R_L} \geq \frac{4V_{max}}{6\pi wL} \Rightarrow L \geq \frac{R_L}{3w}$$

El valor de $L_C = R_L / 3w$, corresponde al valor crítico por debajo del cual al disminuir la corriente de carga aumenta el voltaje de salida, perdiéndose por lo tanto la regulación. Si el valor de R_L es grande, el valor de la inductancia crítica será excesivo. En estos casos puede agregarse una resistencia en paralelo llamada *resistencia de escape* que además limitar el valor de R_L y de L_C sirve como un medio de descarga del condensador cuando se quita la alimentación.

Filtro con condensador de entrada:

Si al filtro de bobina de entrada se le adiciona un condensador en paralelo, el factor de rizado se reducirá.

La tensión continua en la salida es igual a la tensión continua en C_1 (filtro de condensador) menos la caída en la resistencia en la bobina.

$$V_{ODC} = V_{max} - \frac{I_{LDC}}{4fC} - I_{LDC}R$$

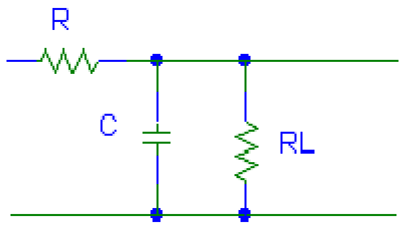
como $I_{LDC} = V_{oDC} / R_L$, tenemos:

$$V_{oDC} = \frac{V_{max}}{1 + \frac{1}{4fR_L C} + \frac{R}{R_L}}$$

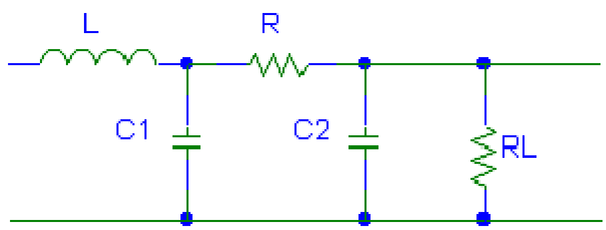
$$\gamma = \frac{1}{4\sqrt{2}R_L w^2 C_1 C_2 L}$$

$$wL >> 1/wC_1 ; \quad wL >> 1/wC_2 ; \quad R >> 1/wC_2$$

Existen otras clases de filtros como los siguientes:



Filtro RC



Filtro con bobina de entrada y filtro RC

7. REGULACIÓN

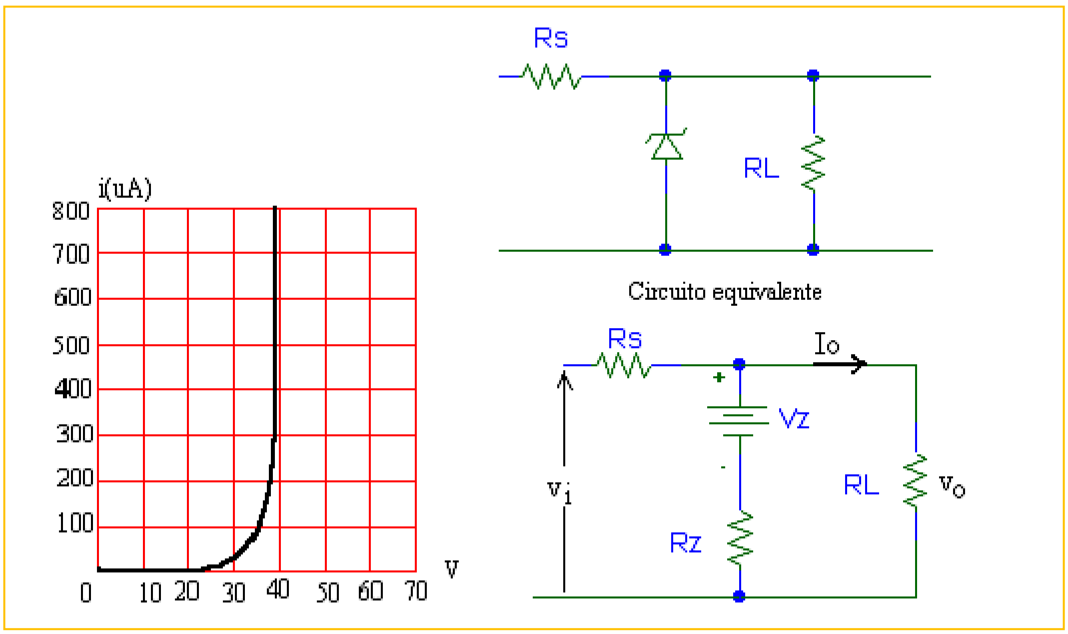
La salida de un filtro no es igual para varios valores de resistencia de carga y esto se debe a que su resistencia de salida no es cero. La regulación de voltaje se define de la siguiente manera:

$$\%R = \frac{\text{Voltaje sin carga - Voltaje con carga}}{\text{Voltaje con carga}}$$

El elemento electrónico semiconductor que nos permite regular el voltaje se denomina *"diodo zéner"*

Diodo Zener

Cuando la tensión de un diodo aumenta lo suficiente se produce la ruptura. La característica tensión – corriente al producirse la ruptura es tal que la tensión a través del diodo es casi independiente de la corriente que pasa por él, por tanto puede utilizarse en esta región como regulación de tensión.

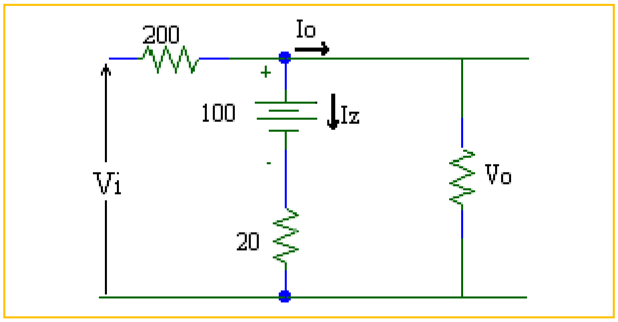


En la figura se tiene la curva característica del diodo Zener. En ella se observa que existe para cualquier corriente un voltaje aproximadamente constante. Este voltaje se llama "voltaje zener". Un sencillo regulador de voltaje con diodo Zener consiste de una resistencia en serie R_S con el Zener y esta serie en paralelo con la resistencia de carga R_L. El voltaje V_i es la salida de corriente directa del rectificador con filtro. La función del regulador es mantener V_o casi constante con cambios en Vi o Io. En la región de operación el diodo Zener consiste de una combinación en serie de una fuente de voltaje constante V_Z y una pequeña resistencia r_Z. El siguiente ejemplo ilustra la operación.

Ejemplo:

Una carga consume una corriente que varía de 10 a 100mA a un voltaje nominal de 100V. El regulador consiste de R_S =200Ω y un diodo Zener representado por V_Z=100V y r_Z = 20Ω.

(a) Para I_O= 50mA, determinar la variación en Vi que corresponda al 1% de la variación de Vo.



suponiendo I_Z = 10mA

Vo = 100+10mA(20) = 100,2V

Vi = Vo + (Io+Iz)200

Vi = 100,2 + (0,05+0,01)200 = 112,2V

Si Vo aumenta el 1%, entonces V'_O=101,2V

$$I_Z' = \frac{V_o' - V_Z}{V_Z} = \frac{101{,}2 - 100}{20} = 0{,}06A \Rightarrow I_Z \quad \text{aumentó a } 60\text{mA}$$

Vi'=Vo' + (Io+I_Z')200 = 101,2 + (0,05+0,06)200 = 123,2V

Entonces, un cambio de ΔVi = 11V produce un ΔVo = 1V

(b) Para Vi constante, determinar □V_O que corresponda a una □Io de 50 mA a 10mA.

Para I_O = 50mA, se tiene V_O = 100,2 V; V_i = 112,2V; Io' = 10mA

Vi = 200 (Io'+I_Z') + 100 + 20 I_Z' → 112,2' – 100 = 220I_Z' + 200Io'

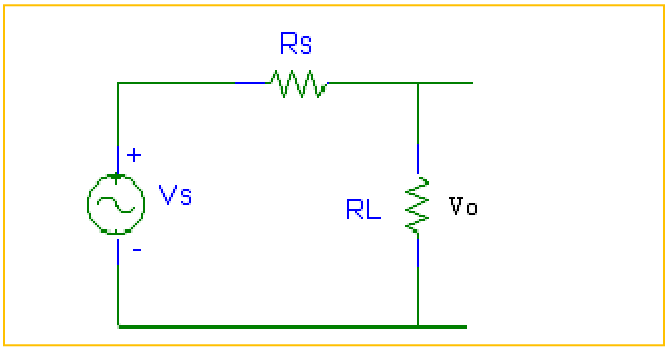
I_Z' = (12,2V – 200x0,01) / 220 = 0,046 A = 46mA

V_O' = 100+ 20I_Z' = 100 + 20(0,046) ≈ 100.9 V

Un ΔIo = 40mA produce un cambio ΔVo = 0,7V

Ejercicios:

1. Una fuente de voltaje de CD consiste de V_S = 22V y R_S = 20□ como se indica en la figura. Calcular la regulación (%ΔVo) si R_L varía de 200 a 400Ω.



2. Un regulador de diodo Zener tiene los siguientes valores: V_Z = 30V, r_Z = 10Ω, R_S = 20Ω, I_{Zmax} = 300mA.

a) Para V_L =33v e I_o = 100mA, calcular R_L, V_i.

b) Si R_L permanece constante y Vi tiene una caída del 10% encontrar ΔVo.

c) Si Vi permanece constante al valor de (a) e Io aumenta a 200mA, calcular el nuevo valor de Vo.

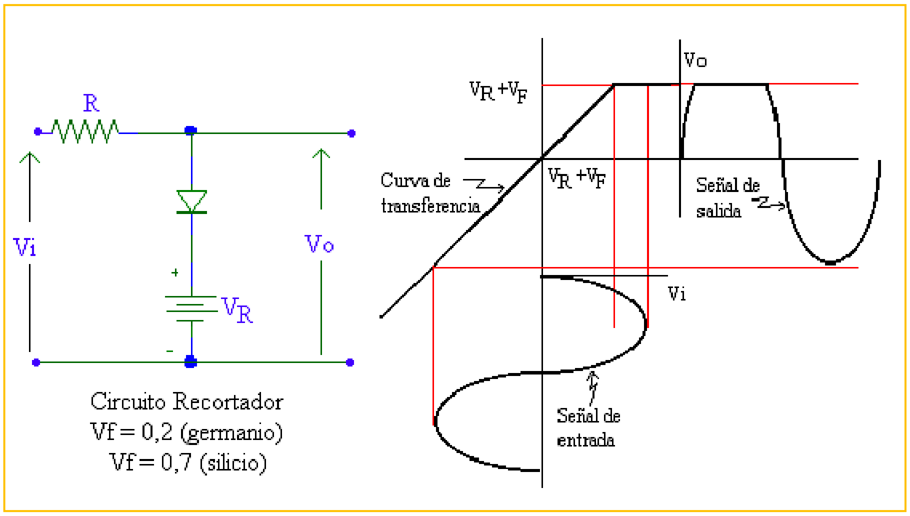
8. EL DIODO COMO RECORTADOR

Los circuitos recortadores se emplean cuando se requiere seleccionar la parte de una onda arbitraria que queda por encima o por debajo de un determinado nivel de tensión que se toma como referencia. A estos circuitos también se le denominan “Limitadores”.

Para analizar un circuito cortador como el de la figura se hace necesario construir la curva de transferencia Vo = f(Vi) y con ésta. graficar la señal de salida. En este análisis se supone para el diodo $R_F \approx 0$ $R_r \rightarrow \infty$

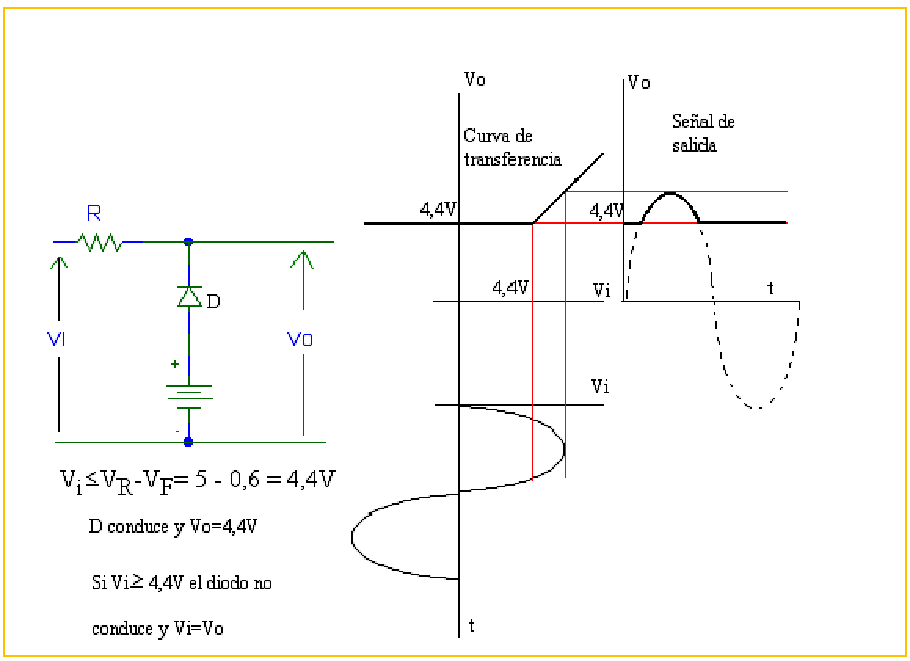
Para Vi ≥ $V_R + V_F$ el diodo conduce y entonces Vo = $V_R + V_F$
Vi ≤ $V_R + V_F$ el diodo está cortado y por lo tanto V_o = Vi.

Curva de transferencia



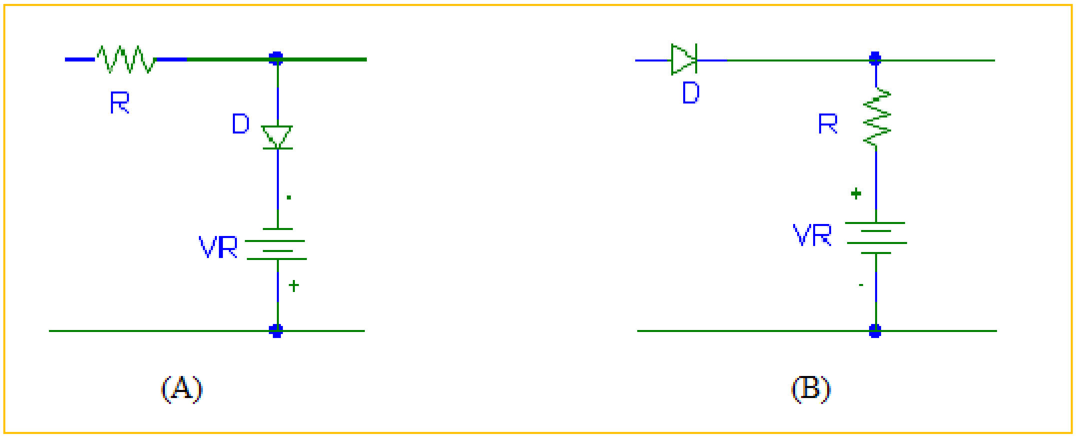
Ejemplo:

Obtener la curva de transferencia y la señal de salida para el circuito de la figura. El diodo es de silicio.

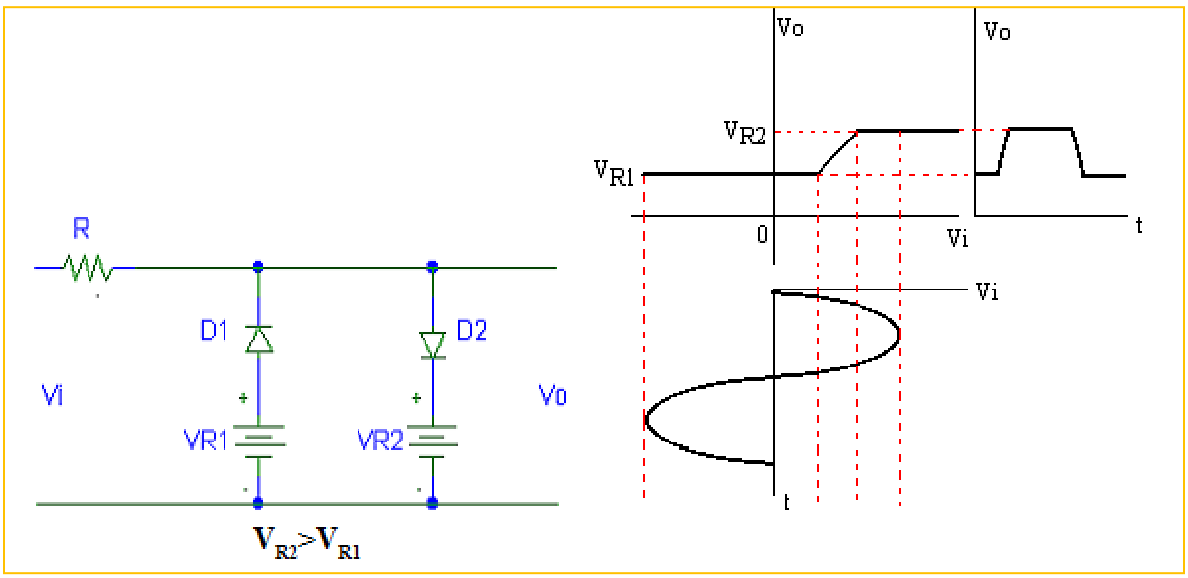


Ejercicio:

Obtener la curva de transferencia y la señal de salida de los circuitos siguientes:



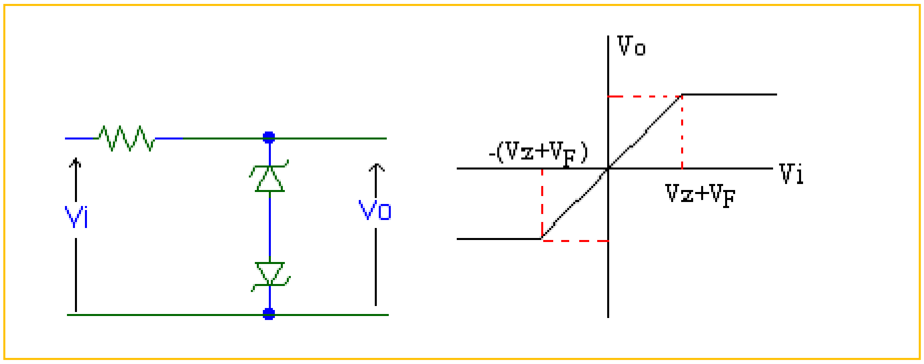
Doble recortador:



Suponiendo $V_F = 0$ tenemos:

Entrada V_i	Estado de los diodos	Salida Vo
$Vi \leq V_{R1}$	D1 conduce, D2 corte	$Vo = V_{R1}$
$V_{R1} < Vi < V_{R2}$	D1 corte, D2 corte	Vo = Vi
$Vi \geq V_{R2}$	D1 corte, D2 conduce	$Vo = V_{R2}$

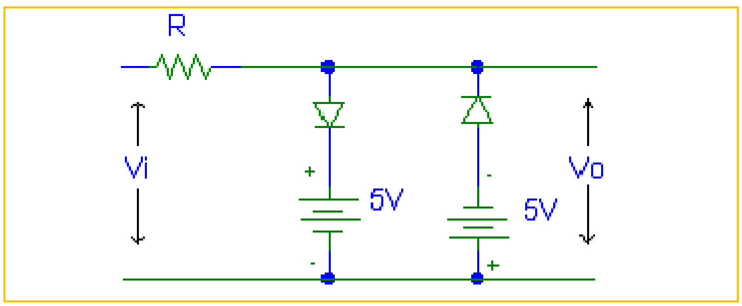
En la figura se muestran dos diodos Zener en oposición constituyendo otra forma de cortador. Si los diodos son idénticos se obtiene un recortador simétrico.



Ejercicio:

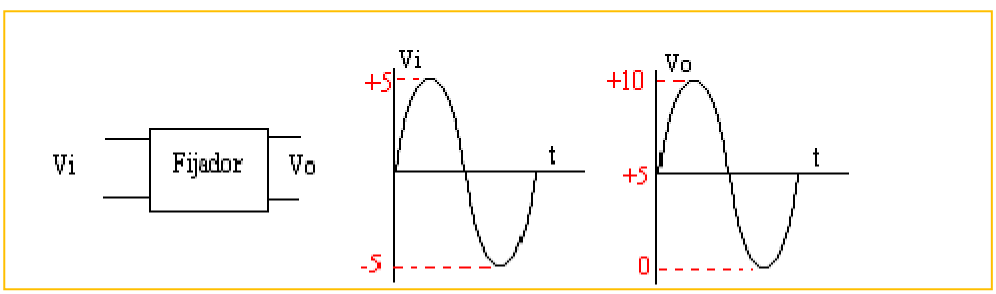
Encontrar la curva de transferencia y la señal de salida del circuito.

V_F = 0,6V
Vi = 10 sen wt

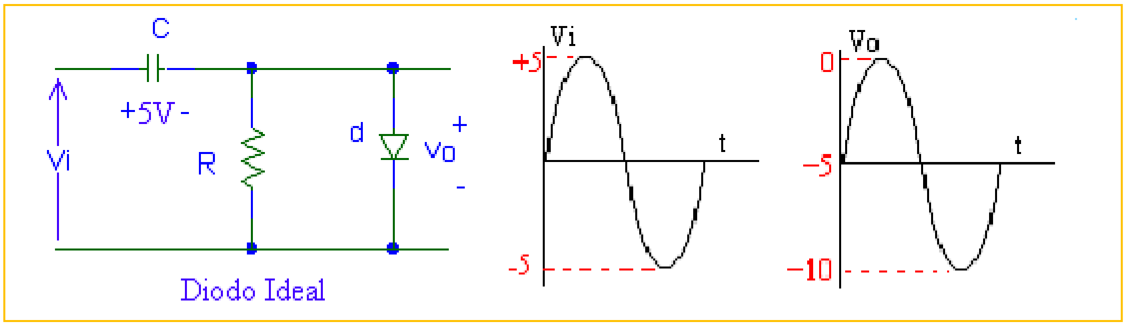


9. EL DIODO COMO FIJADOR

Un circuito de fijación es el que deja a un nivel constante de referencia V_R el pico positivo o negativo de una señal.



Como se aprecia la señal de salida está fijada por debajo (pico negativo) a 0V y además tiene un valor de C.C (5V) que en la entrada no aparecía. Debido a esto, se le llama también “restaurador de C.C.”



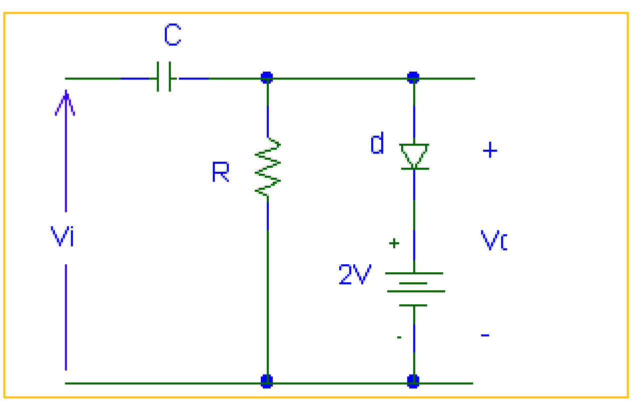
Inicialmente cuando D conduce el condensador se carga al valor máximo de V_C = 5v con la polaridad indicada. Con este voltaje almacenado en el condensador (suponiendo RC>>T) el diodo no volverá a conducir y por lo tanto, cuando..

Vi = + 5V	Vo = Vi – V_C = 5 - 5 = 0
Vi = 0V	Vo = 0 - 5 = - 5V
Vi = - 5V	Vo = - 5 - 5 = - 10V

La señal de salida variará entre 0 y –10V, queda fijado a 0V con un nivel de V_{CC} = - 5V

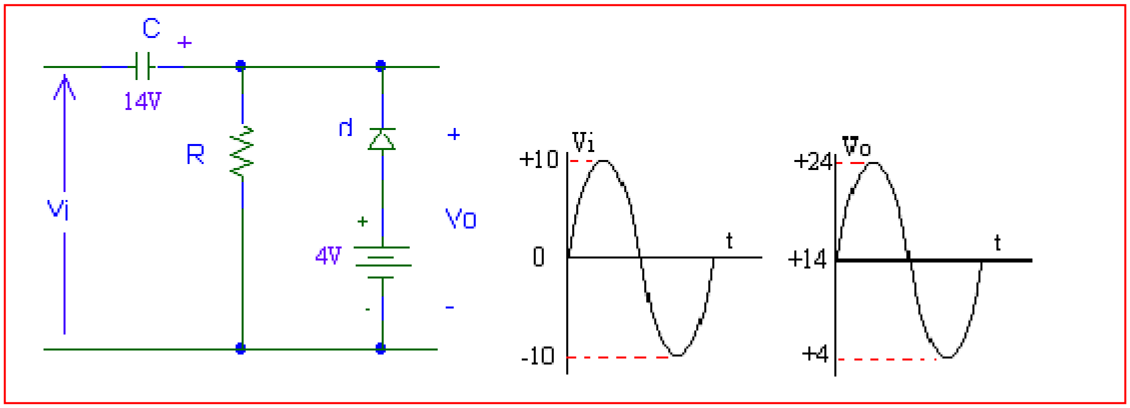
Ejercicio:

Para el circuito determinar la señal de salida (diodo ideal: V_F =0; R_F = 0; $R_r = \infty$), v_i = 10sen*wt.*



Ejemplo:

Determinar la señal de salida del circuito (Diodo ideal) si Vi = 10 sen wt.



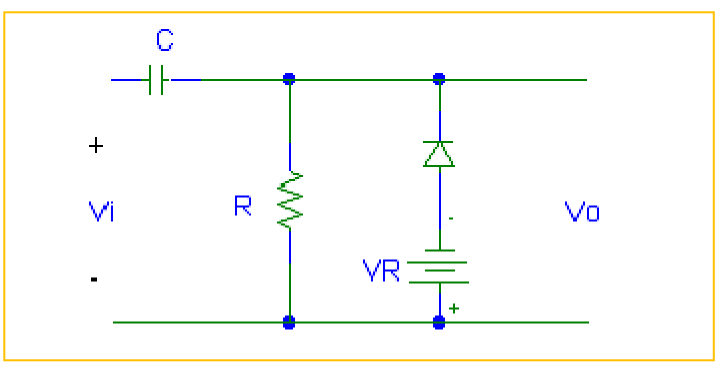
Inicialmente cuando Vi < 4V el diodo conduce y el condensador se comienza a cargar con la polaridad indicada hasta un valor máximo de V_C = 10+4 = 14V. Con este voltaje almacenado en el condensador el diodo no volverá a conducir. Esto es:

Cuando	V_i = +10	Vo = Vi+Vc = 10+14 = 24V
	Vi = 0	Vo = 0+14 = 14V
	Vi = -10	Vo = -10+14 = 4V

La salida queda fijada por encima de V_R=4V.

Ejercicio:

Determinar la salida del circuito. Suponga diodo ideal. Vi = 5 sen wt, V_R = 2V.



11. EL TRANSISTOR

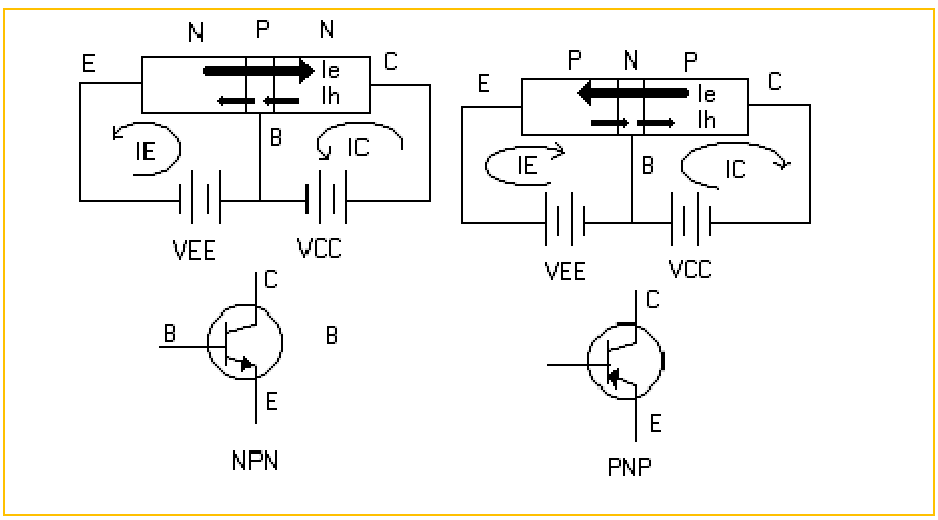
11.1 CONFIGURACIONES

Está formado por dos junturas PN tal como se muestra en la figura. Una juntura está polarizada directamente y la otra está polarizada inversamente. Tiene tres terminales: Emisor, base y colector. La juntura polarizada en directo es EB y la polarizada en inverso es la juntura BC. El transistor puede ser PNP o NPN. En cualquiera de los dos casos, la base es muy delgada con el fin de que los portadores mayoritarios del emisor no se recombinen con los de la base en forma significativa y entonces así pasar la mayoría al colector.

I_C = corriente de colector.
I_E = Corriente de emisor

$I_C = \alpha I_E \quad \alpha < 1$

La pequeña recombinación que existe en la base forma la corriente de base I_B.



En cualquiera de los casos NPN o PNP se tiene que:

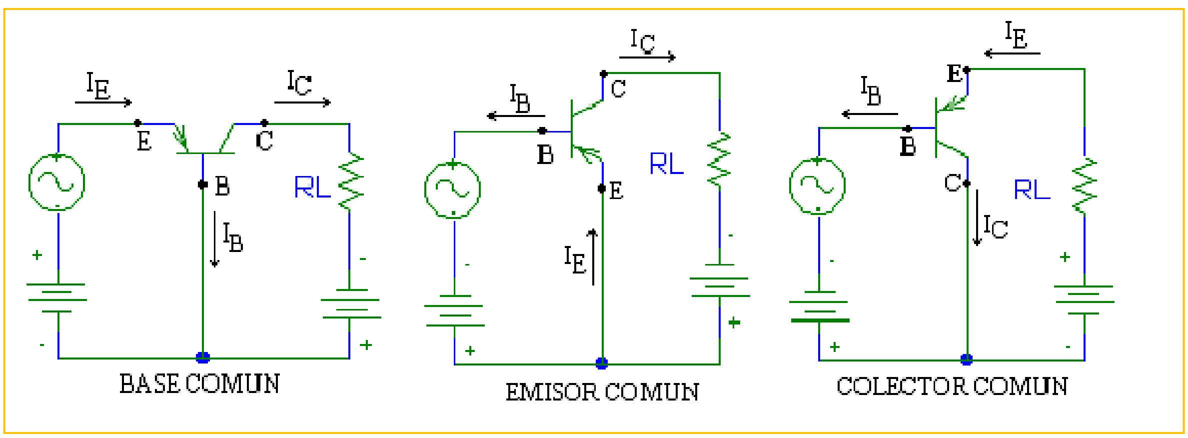
$$\mathbf{I_E=I_B+I_c}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$\gamma = \frac{I_E}{I_B}$$

α = ganancia de corriente en base común
β = ganancia de corriente en emisor común
γ = ganancia de corriente en colector común.



$$I_E = I_B + I_C$$

$$\frac{I_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\beta} + I_C \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha - 1}$$

$$\gamma = \beta + 1$$

Ejemplo:

Un transistor tiene a=0,98. Calcular la corriente de base I_B para una corriente de emisor de 2 mA y también calcular β y γ

$I_c=\alpha I_E=0.98 \times 2mA = 1{,}96mA$

$I_B=I_E-I_C=2{,}00-1{,}96=0{,}04mA=40\mu A$

$\beta=I_C/I_B=1{,}96/0{,}04=49$ o también,

$\beta=\alpha/(1-\alpha) = 0{,}98/(1-0{,}98)=0{,}98/0{,}02=49$

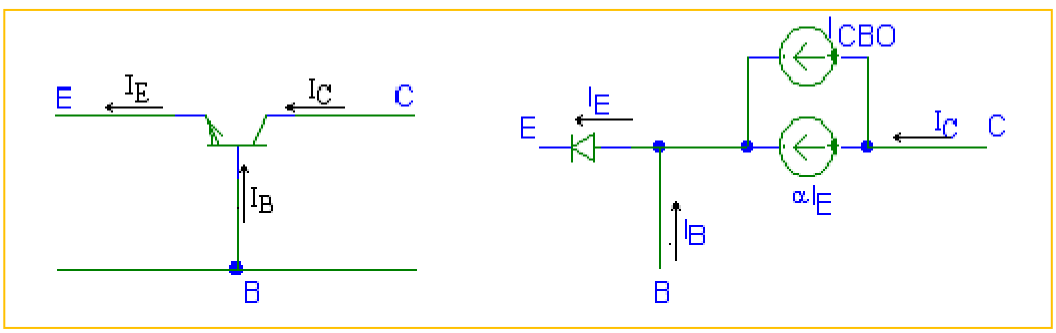
$\gamma=\beta+1=49+1=50$

Ejercicio:

En un transistor conectado en base común I_B=0,1mA e I_C=5mA. Determinar α, β, y γ.

11.2 MODELO EBERS–MOLL

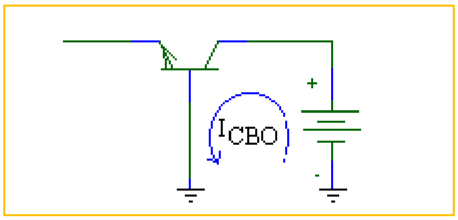
El modelo Ebers Molls es un modelo general del transistor que sirve para analizar sus características tanto en C.A como en C.C. A continuación se dará el modelo utilizado para C.C. y para C.A. en bajas frecuencias y más adelante se estudiará el modelo en altas frecuencias.



En el modelo se presenta la juntura EB que está polarizada en directo por medio de un diodo en conducción y la juntura CB polarizada en inverso con dos fuentes de corriente en paralelo que indica la corriente de colector tomando en cuenta la corriente inversa que fluye de colector a base (I_{CBO}).

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

I_{CBO} se define como corriente de fuga hacia el colector desde la base con el emisor en circuito abierto.



$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} = \alpha(I_c + I_B) + I_{CBO}$$

$$\Rightarrow I_c(1-\alpha) = \alpha I_B + I_{CBO} \Rightarrow I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1-\alpha}$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta+1) I_{CBO};$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CBO}$$

$$I_{CEO} = (\beta+1) I_{CBO}$$

Ejemplo:

Un transistor tiene I_{CBO} = 50mA cuando se mide en la configuración base común. Si β=100, hallar I_{CEO}

I_{CEO}= (β+1) I_{CBO}=101x50mA ≈ 5 mA

Ejercicio:

Si la corriente de fuga inversa medida en BC es 10mA y en EC 0,5mA, determinar el valor de β

I_{CEO}= (β+1) I_{CBO} β+1 = (0,5mA)/(10mA) = 50

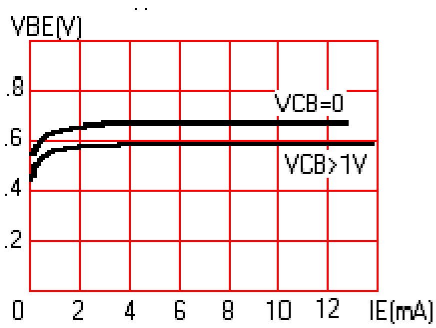
β = 50 -1   β = 49

12. CIRCUITOS TRANSISTORIZADOS

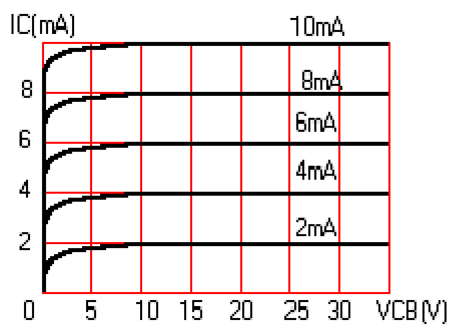
12.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Las “curvas características estáticas” definen las relaciones de régimen permanente entre sus salidas y sus entradas de voltaje y corriente. Constituyen la base para comprender la operación del transistor.

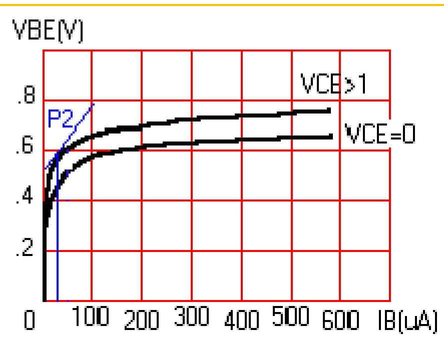
Cada configuración, base común, emisor común y colector común tiene sus características de entrada y salida diferentes. A continuación se dan estas curvas características para el transistor 2N929.



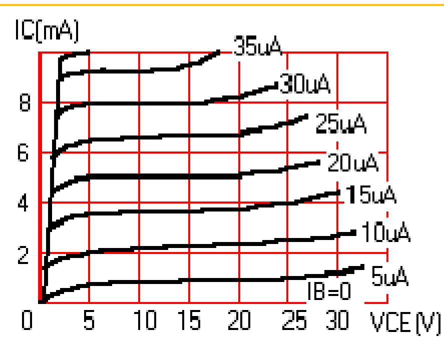
Característica de entrada
Base Común



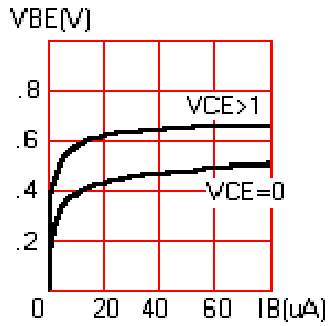
Característica de salida
Base Común



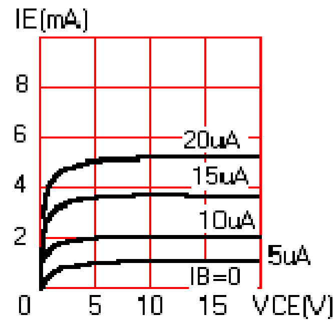
Característica de entrada
Emisor Común



Característica de salida
Emisor Común



Característica de entrada
Colector Común



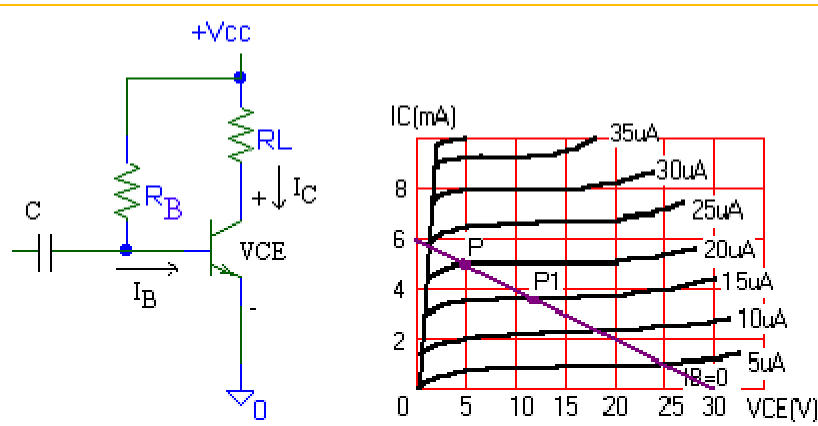
Característica de Salida
Colector Común

Con estas curvas se define un punto de operación del transistor, por ejemplo, para la configuración emisor común si I_B = 20mA, V_{CE}= 20V se tiene que $I_C \approx$ 5,2mA. (punto P_1) y el voltaje base–emisor es V_{BE}= 0,6V (punto P_2).

Ejercicio:

El punto de operación de un circuito con el transistor 2N929 con el emisor común es I_C= 5,6 mA, V_{CE}= 20V. Encontrar: I_B, I_E, $V_{BE.}$

LINEA DE CARGA



La línea de carga es la que resulta al graficar sobre curvas características la ecuación dada por el circuito de salida. Para el caso de emisor común tenemos:

$V_{CC}= V_{CE} + I_C R_L$

si $I_C=0$ entonces $V_{CE}= V_{CC}$
si $V_{CE}=0$ entonces $I_C= V_{CC}/R_L$

Las dos expresiones anteriores dan los puntos de corte de la recta de carga.

Si $V_{CC}= 30V$, $R_L= 5000\Omega$, transistor = 2N929, tenemos:

$30 = V_{CE} + 5\ I_C$; cuando $I_C= 0$ entonces $V_{CE}= 30$ V
cuando $V_{CE}=0$ entonces $I_C= 30/5 = 6$ mA.

El punto de operación o de trabajo es el punto de corte entre la línea de carga y la corriente de base que se seleccione.

Ejemplo:

a) Si $I_B= 20mA$, ¿cuál es el punto de operación?

De las curvas tenemos que el punto de corte nos da:

$I_C=5mA$ y $V_{CE}=5V$ (punto P).

b) Encontrar la potencia disipada en el colector.

$P_C= V_{CE}\ I_C= (5V)(5mA) = 25$ mW.

c) El voltaje de C.C. en la carga y la potencia P_L disipada.

$V_L= V_{CC} - V_{CE}= 30 - 5 = 25V$.

$P_L = I^2{}_C\ R_L = (5mA)^2 \times 5000\Omega = 125$ mW

d) La potencia P_B de entrada a la base, $P_B= V_{BE}\ I_B$, de la curva característica se tiene que para $I_B= 20\ \mu A$ y $V_{CE} > 1V$, entonces, $V_{BE} = 0,6$ V.

$P_B = 0,6\ V \times 20\ \mu A = 12\ \mu W$.

e) La variación de los parámetros I_C, V_{CE}, V_L si se reduce I_B en 5 μA.

Ahora $I_B = 20 - 5 = 15\ \mu A$, de la curva tenemos:

V_{CE}= 12V, I_C= 3,8 mA (punto P_1)

V_L= V_{CC} – V_{CE} = 30 – 12 = 18 V.

ΔV_{CE} = 12 - 5 = 7 V

ΔI_C = 3,8 - 5 = - 1,2 mA

ΔV_L=18 - 25= - 7 V.

f) La variación de los parámetros V_{BE} , P_B y P_L:

De la característica de entrada tenemos que según la pendiente en P_2 la variación del V_{BE} con respecto a I_B es aproximadamente 2mV/µA.

Luego, ΔV_{BE} = 10mV para un ΔI_B = 5 µA entonces V_{BE2} = 0,61V
ΔP_B = V_{BE2} I_{B2} - $V_{BE1}I_{B1}$ = 0,61 x 15 – 0,6 x 20 = -2,85 µW
ΔP_L=P_{L2} - P_{L1}
P_{L2}= $I^2{}_C R_L$ = $(3,8)^2$ x 5000 = 72,2 mW.
ΔP_L=72,2 -125= - 52,8mW.

g) Ganancia de corriente continua y ganancia de corriente incremental.

Ganancia de corriente continua = I_C/I_B = 5mA/20µA = 250 = h_{FE}
Ganancia de corriente incremental = $\Delta I_C/\Delta I_B$ = -1,2mA/-5µA =240 = h_{fe}

h) Resistencia de entrada continua

V_{BE} / I_B = 0,6V/20µA = 30kΩ

Resistencia de entrada incremental

$\Delta V_{BE}/\Delta I_B$ = -10mV/5µA= 20KΩ

i) ganancia de potencia estática

P_L/P_B = 125 mW / 12µW = 10417

Ganancia de potencia incremental

$\Delta P_L/\Delta P_B$ = - 52,8 mW / -2,85 μW =18526

j) Encontrar la ganancia incremental de voltaje

$\Delta V_L/\Delta V_{BE}$ = - 7V/ - 0,01V = 700

k) Encontrar la impedancia estática e incremental de salida

Impedancia estática de salida = V_{CE}/ Ic = 5V/5mA = 1/h_{OE} = 1000Ω;

Impedancia incremental de salida

$\Delta V_{CE}/\Delta I_C$ = 7V / 1,2 mA= 1/h_{oe} = 5833Ω

l) Encontrar la impedancia estática e incremental de entrada.

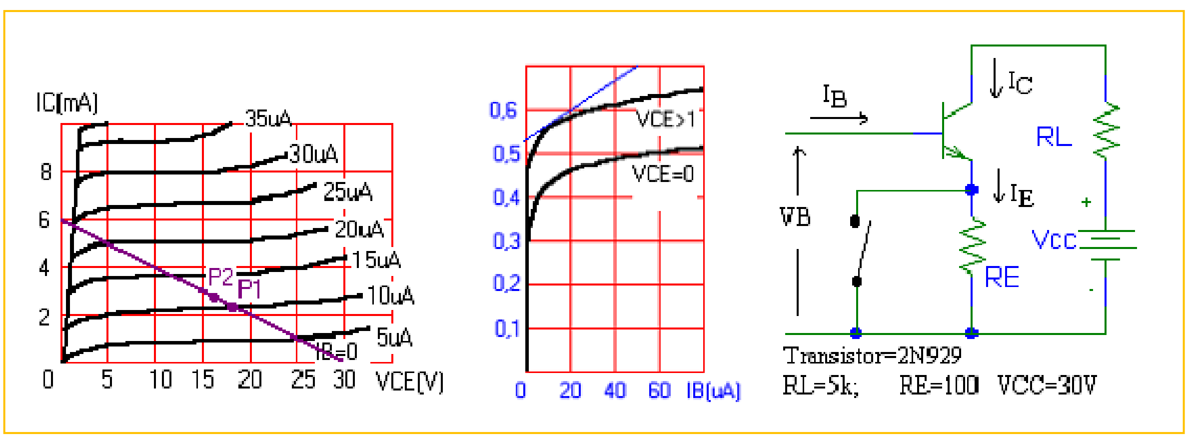
Impedancia estática de entrada = V_{BE}/I_B = h_{iE} = 0,6V/20□A = 30kΩ

Impedancia incremental de entrada = $\Delta V_{BE}/\Delta I_B$ = h_{ie}=10mV/5μA = 2kΩ

Ejemplo

En el circuito de la figura supóngase que el punto de operación está en I_B=10μA. Determinar la ganancia incremental de voltaje para un cambio de +10mV en V_{BE} si

(a) El interruptor está cerrado (b) el interruptor está abierto.



De las curvas de entrada, tenemos que la pendiente de la recta tangente en el punto en el punto I_B=10μA es aproximadamente 3,5 mV/μA entonces si

ΔV_{BE}= 10mV $\rightarrow \Delta I_B$ = 3μA
Si I_{B1}= 10μA $\rightarrow I_{B2}$ = 13μA.

De las curvas de salida:

En P_1 : I_B= 10μA, I_C = 2,4 mA, V_{CE}= 18V.
En P_2: I_B = 13μA, I_C = 2,8mA, V_{CE}=16V
ΔI_B= 3□A, ΔI_C= 0,4 mA, ΔV_{CE}=-2V

La ganancia de voltaje:

$A_V = \Delta V_{CE}/\Delta V_{BE}$ = - 2000mV/10mV= - 200.

b) La ecuación en el circuito de salida es ahora:

$V_{CC} = V_{CE} + (R_C+R_E)\, I_C$

Como $R_C >> R_E$ entonces la recta de carga se puede considerar la misma del punto a).

Para $\Delta V_B = \Delta V_{BE} + \Delta I_C R_E$ = 10mV+0,4mA x 100Ω = 50mV.

A_V=-2000mV/50mV = - 40

La ganancia se reduce sustancialmente a consecuencia de la introducción de R_E.

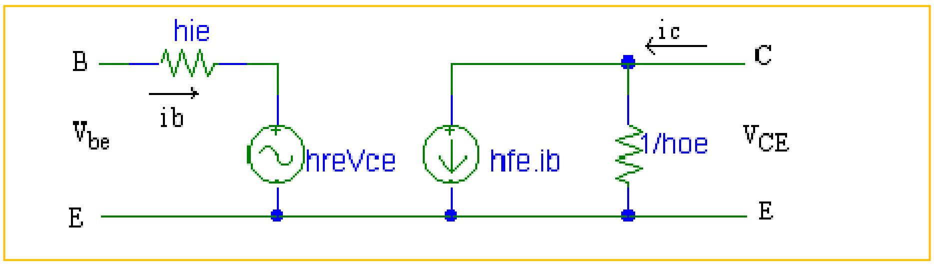
Ejercicio

Para el circuito con el emisor común que utiliza el transistor 2N929 con una carga de 6 kΩ, V_{CC}= 30V, encontrar:

a) I_B requerida para operar en I_C= 5mA
b) La P_C disipada en la juntura del colector
c) El voltaje de c.c. V_L y la potencia en la carga P_L
d) La potencia P_B de c.c. de entrada.
e) La variación de los parámetros I_C, V_{CE} y V_L si se disminuye I_B en 5□A.
f) Los cambio en V_{BE}, P_B y P_L
g) La ganancia de corriente estática e incremental.

h) La resistencia de entrada estática e incremental.
i) La ganancia de potencia estática e incremental en la carga.
j) La ganancia de voltaje incremental.

12.2 CIRCUITO EQUIVALENTE HÍBRIDO



Las definiciones de los parámetros *h* son las siguientes:

hie: Resistencia de entrada (ohm) = $\Delta V_{BE}/\Delta I_B$ cuando V_{CE} = cte

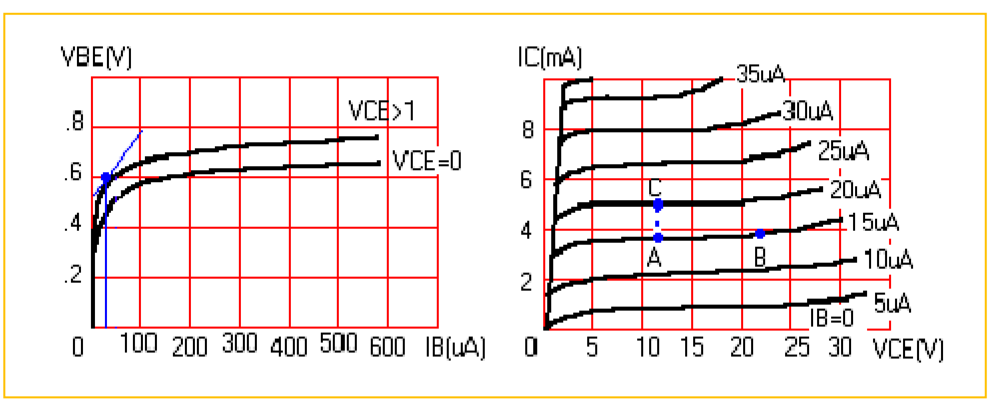
hfe: Ganancia de corriente hacia delante = $\Delta I_C/\Delta I_B$ cuando V_{CE}= cte

hre: ganancia de voltaje hacia atrás = $\Delta V_{BE}/\Delta V_{CE}$ cuando I_B= cte

hoe: conductancia de salida = $\Delta I_C/\Delta V_{CE}$ cuando I_B = cte.

Ejemplo

Para el transistor 2N929, calcular los parámetros de la conexión emisor común en el punto: I_B=15 μA, V_{CE}=12V.



De A → B

hoe = $\Delta I_C/\Delta V_{CE}$ = 0,3 mA/10V = 30 m mhos
hre = $\Delta V_{BE}/\Delta V_{CE}$ = 0

De A→ C:

hie = $\Delta V_{BE}/\Delta I_B$ = 0,4V / 180 μA = 2,2kΩ
hfe = $\Delta I_C/\Delta I_B$ = 1,8 mA/5μA = 360

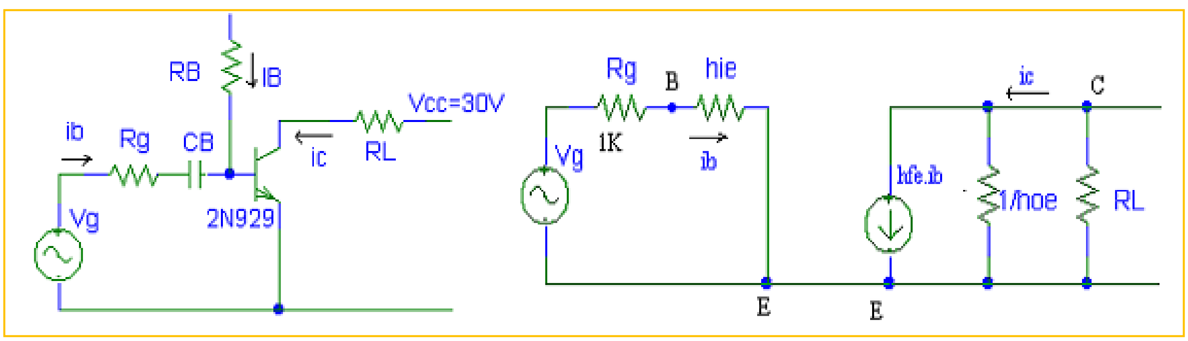
Ejercicio

Encontrar los parámetros h del transistor 2N929 en conexión emisor común en el punto V_{CE}=10V e I_C= 2mA.

Ejemplo

Para el circuito de la figura cuyas condiciones de operación y parámetros son los mismos del ejemplo anterior, determinar:

a) Para una señal de entrada Vg =10mV RMS, las corrientes i_b, i_c, y el voltaje y la potencia en R_L, si R_L = 5k.



Del circuito equivalente:

$$i_b = \frac{Vg}{Rg + hie} = \frac{10mV}{1k + 2.2k} = 3{,}1\mu A$$

$$i_c = h_{fe} i_b \left(\frac{1/hoe}{R_L + 1/hoe} \right) = \frac{h_{fe} i_b}{1 + h_{oe} R_L} = \frac{360x3{,}1x10^{-3} mA}{1 + 30x10^{-6} x5x10^{3}} = 0{,}97mA$$

$$v_L = i_C R_L = -0{,}97mAx5k = -4{,}85V$$

$$P_L = v_L i_C = 4{,}85Vx0{,}97mA = 4{,}7mW$$

b) Calcular la ganancia de corriente $A_i = i_c/i_b$

$A_i = i_c/\ i_b = 0{,}97mA\ /\ 3{,}1\mu A = 313$

c) La ganancia de voltaje $A_V = V_{ce}/V_{be}$

$A_V = V_L/V_{be} = V_L/\ h_{ie} i_b = -\ 4{,}85V/(2{,}2k\Omega x3{,}1x10^{-3}mA) = -\ 711$

El menos es debido a que el voltaje de salida está desfasado 180º con respecto al voltaje de entrada.

d) La ganancia de potencia,

Potencia en la carga = 4,7mW

Potencia de entrada = $i_b\ V_{be}$ = 3,1 μA x 6,82mV = 21 x 10^{-6} mW.

Ganancia de potencia = 4,7mW/21x10^{-6}mW = 224000 o también, A_P = Ai Av = 313 x 711 = 222543.

e) La resistencia de entrada

Ri = Vbe / i_b = hie = 2,2kΩ

f) La resistencia de salida

R_0 = 1/hoe = 1/(30x10^{-6} mhos) → Ro = 33333Ω=33kΩ.

12.3 CIRCUITO EQUIVALENTE T

Ecuaciones Equivalente T

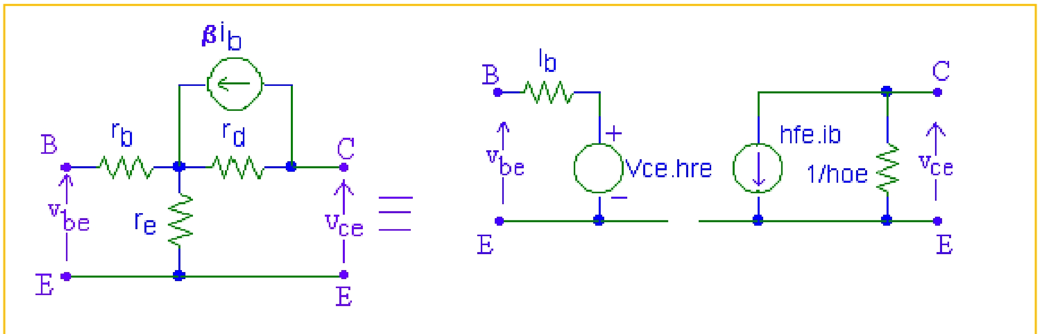
$$R_i = \frac{v_{be}}{i_b}\Big|_{vce=0} = r_b + (\beta+1)\frac{r_e r_d}{r_e + r_d}$$

$$R_o = \frac{v_{ce}}{i_c}\Big|_{i_b=0} = r_d + r_e$$

Ecuaciones Equivalente Híbrido

$$R_i = \frac{v_{be}}{i_b}\Big|_{vce=0} = h_{ie}$$

$$R_o = \frac{v_{ce}}{i_c}\Big|_{i_b=0} = \frac{1}{h_{oe}}$$



Equivalente T   Equivalente Híbrido

Razón de voltaje hacia atrás

$$v_{be} = v_{ce}\frac{r_e}{r_e + r_d}$$

Razón de voltaje hacia atrás

$$h_{re} = \frac{v_{be}}{v_{ce}}\Big|_{i_b=0} = h_{re}$$

$$v_{be} = h_{re}.v_{ce}$$

Ganancia de corriente hacia delante,

$v_{ce} = 0.$

Corriente en, $r_d = (\beta+1)i_b \cdot \frac{r_e}{r_e + r_d}$

$$i_c = \beta \cdot i_b - (\beta+1)i_b \cdot \frac{r_e}{r_e + r_d}$$

como $r_e << r_d \Rightarrow i_c \approx \beta.i_b$

Ganancia de corriente hacia delante

$= h_{fe.}$

$$h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}\Big|_{v_{ce}=0}$$

$$\boldsymbol{i_c = h_{fe}.i_b}$$

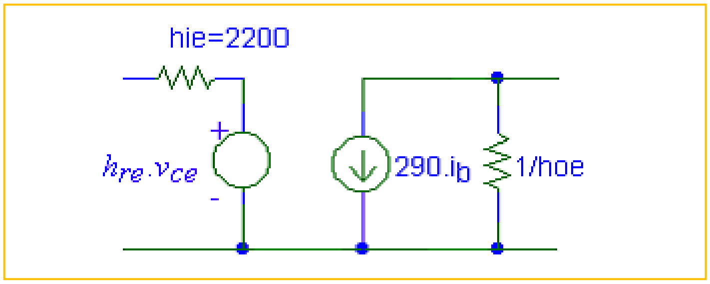
De las cuatro ecuaciones anteriores se puede concluir que :

1) $r_b = h_{ie} - (h_{fe} + 1)(1 - h_{re})/h_{oe}$; como $h_{re} << 1$ $r_b = h_{ie} - (1 + h_{fe})h_{re}/h_{oe}$
2) $r_d = (1 - h_{re})/h_{oe} \approx 1/h_{oe}$
3) $r_e = h_{re}/h_{oe}$
4) $\beta = h_{fe}$

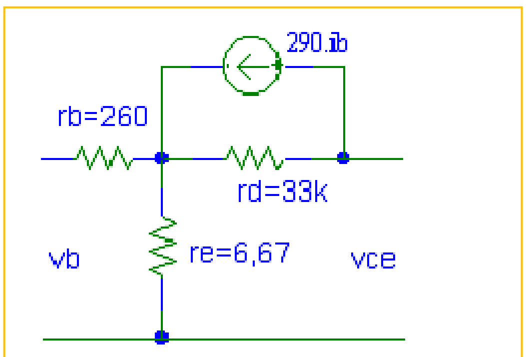
Con las anteriores cuatro ecuaciones se puede reemplazar un equivalente híbrido a un equivalente T.

Ejemplo

Obtener el circuito equivalente T a partir del modelo híbrido siguiente:



$h_{ie} = 2200\Omega$
$h_{oe} = 30x10^{-6}$ ℧
$h_{re}=2x10^{-4}$
$h_{fe} = 290$



Equivalente T

$\beta = h_{fe}=290$
$r_d = 1/h_{oe}=33000\Omega$
$r_e = h_{re}/h_{oe}=6{,}67\Omega$
$r_b = h_{ie} - (h_{fe}+1)h_{re}/h_{oe}=259$

Determinar la R_i, R_o., A_i, Av y Ap de las tres configuraciones (EC, BC, CC) si R_g = 1k y R_L=5k V_g=10 mVrms.

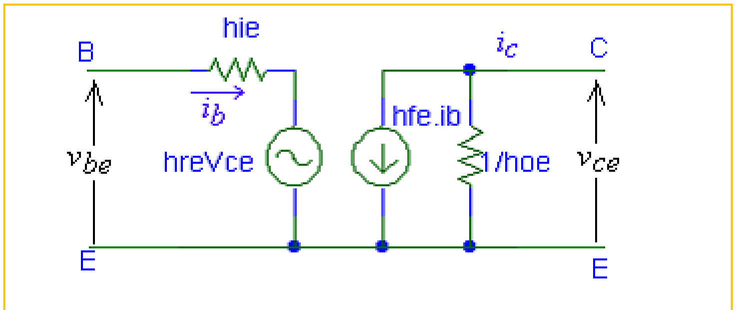
Además:

En EC : $h_{ie} = 2200\Omega$; $h_{fe} = 290$; $h_{re} = 2x10^{-4}$; h_{oe} =$30x10^{-6}$ ℧

En BC: $h_{ib} = 7{,}6\Omega$; $h_{fb} = -0{,}99$; $h_{rb} = 0{,}27x10^{-4}$; $h_{ob} = 0{,}1x10^{-6}$ ℧

Los anteriores parámetros son para el transistor 2N929 en el punto I_C=4mA y V_{CE}=12V.

12.4 CIRCUITO EQUIVALENTE HÍBRIDO π

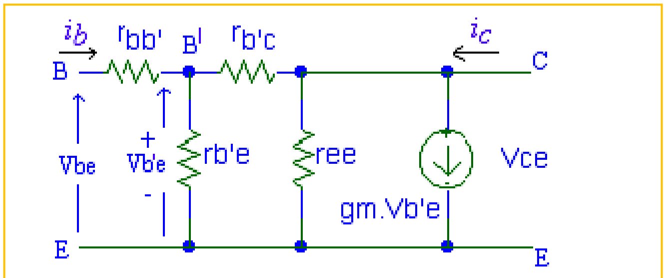


Equivalente Híbrido

Para Vce = 0 se tiene :

Equivalente híbrido: ic =hfe . i_b

Híbrido π:



Equivalente Híbrido π

$$i_c = \text{gm}\, v_{b'e}$$
$$v_{b'e} = i_b(r_{b'e} \,||\, r_{b'c})$$
$$i_c = i_b(\text{gm}.r_{b'e} \,||\, r_{b'c})$$

Por comparación:

$$\text{gm}=h_{fe}/(r_{b'e} \,||\, r_{b'c}) = h_{fe}/r_{eq} \quad (1)$$

De igual forma para la salida cortocircuitada, se tiene,

$R_i' = r_{bb}' + r_{eq}$

$R_i = h_{ie}$, entonces, $h_{ie} = r_{bb'} + r_{eq}$ (2)

Con la entrada en circuito abierto, se tiene:

Hibrido: $v_{be} = h_{re}.v_{ce}$ Hibrido π: $v_{be} = r_b'v_{ce} / (r_{b'e} + r_{b'c}) = r_{eq.}v_{ce}/r_{b'c}$

o sea, $r_{b'c} = r_{eq} / h_{re}$ (3)

Para estas mismas condiciones:

$h_{re} = r_{b'e} / (r_{b'e} + r_{b'c})$ (4)

De estas cuatro condiciones, se tiene: de (1) y (2):

$gm = h_{fe}/(h_{ie} - r_{bb'})$

de (2) y (3):

$r_{b'c} = (h_{ie} - r_{bb'})/h_{re}$, $r_{b'e} = (h_{ie} - r_{bb'})/(1 - h_{re}) \approx h_{ie} - r_{bb'}$.

También con entrada en circuito abierto,

$v_{b'e} = v_{ce}\,(r_{b'e}/(r_{b'e} + r_{b'c}))$;

Sumando corrientes en el nodo C del híbrido π.

$$i_c = v_{ce}\left(gm\frac{r_{b'e}}{r_{b'e}+r_{b'c}} + \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{b'e}+r_{b'c}}\right)$$

$$\frac{i_c}{v_{ce}} = \frac{h_{fe}h_{re}}{h_{ie}-r_{bb'}} + \frac{h_{re}(1-h_{re})}{h_{ie}-r_{bb'}} + \frac{1}{r_{ce}}$$

Por definición:

$$\frac{i_c}{r_{ce}} = h_{oe}$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = h_{oe} - h_{re}\left(\frac{1+h_{fe}-h_{re}}{h_{ie}-r_{bb'}}\right) \approx h_{oe}$$

Ejemplo

Encontrar los parámetros del híbrido π si : h_{ie} = 2200Ω; h_{re}=2x10^{-4} ; hfe = 290 ; h_{oe}= 30μ y además $r_{bb'}$=255Ω.

$$gm = \frac{290}{2200-255} = 0{,}149 \ ℧$$

$$r_{b'c} = \frac{2200-255}{2x10^{-4}} = 9{,}73M\Omega$$

$$r_{b'e} = \frac{2200-255}{1-2x10^{-4}} = 1945\Omega$$

$$\frac{1}{r_{ce}} = 30x10^{-6} - 2x10^{-4}.\frac{1+290-2x10^{-4}}{2200-255} \approx 0 \ ℧ \qquad \Rightarrow r_{ce} \to \infty$$

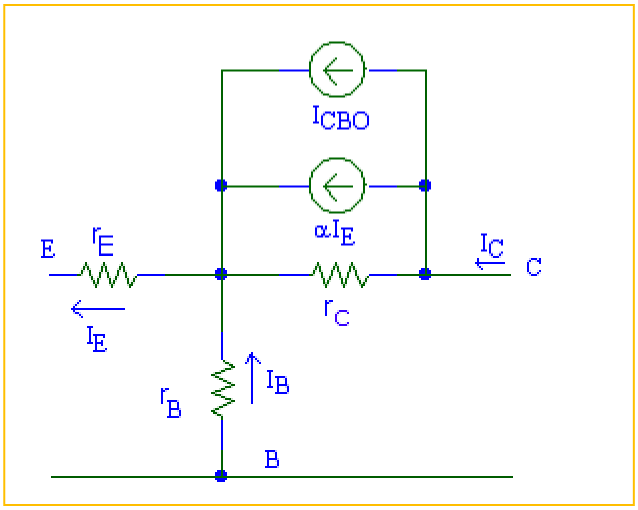
12.5 POLARIZACIÓN Y ESTABILIDAD.

Lograr que el punto de funcionamiento de un transistor sea estático, es mucho más difícil que en un tubo de vacío debido a que las corrientes de fuga en un transistor son extremadamente sensibles a la temperatura.

Los transistores de Germanio son aún más sensibles a la temperatura que los de silicio.

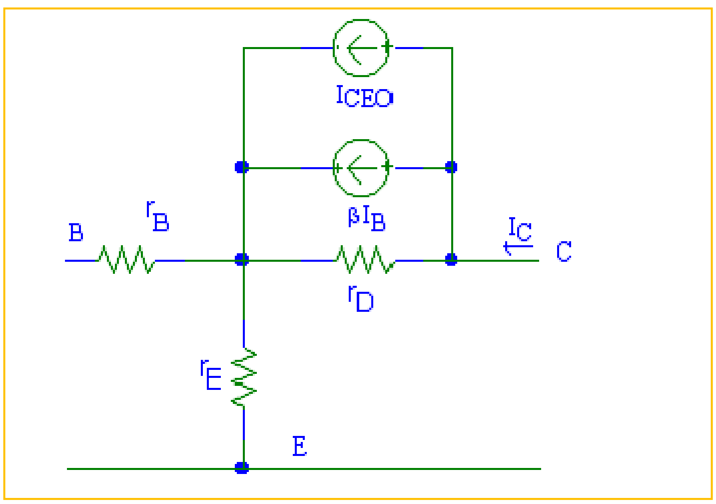
Corrientes de fuga

Realizando el circuito equivalente T, para base – común, se tiene,



I_{CBO} = corriente de fuga de colector a base con el emisor en circuito abierto. (I_E= 0).

Circuito equivalente T para emisor común.



I_{CEO} = fuga entre colector y emisor

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO,} \quad I_C = (I_{CBO} - \alpha I_B)/(1+\alpha)$$

$$\text{como } \beta = \alpha/(1-\alpha) \rightarrow I_C = (\beta+1)I_{CBO} + \beta I_B \Rightarrow I_{CEO} = (\beta+1)I_{CBO}$$

Al variar I_{CBO} o I_{CEO} con la temperatura varían también las curvas características y por lo tanto, el punto de funcionamiento.

Ejemplo

Para el circuito de la fig (a) determinar R_B a 25ºC de manera que I_C=19mA en el punto de funcionamiento. b) Encontrar el nuevo punto de funcionamiento a 70ºC.

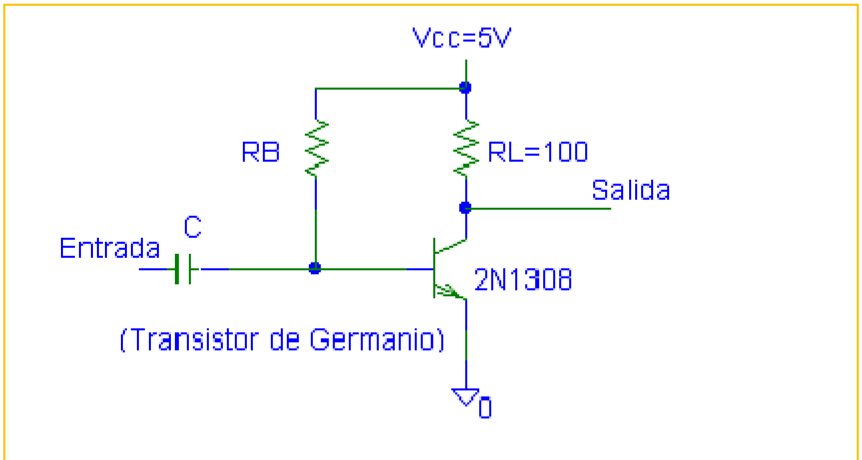
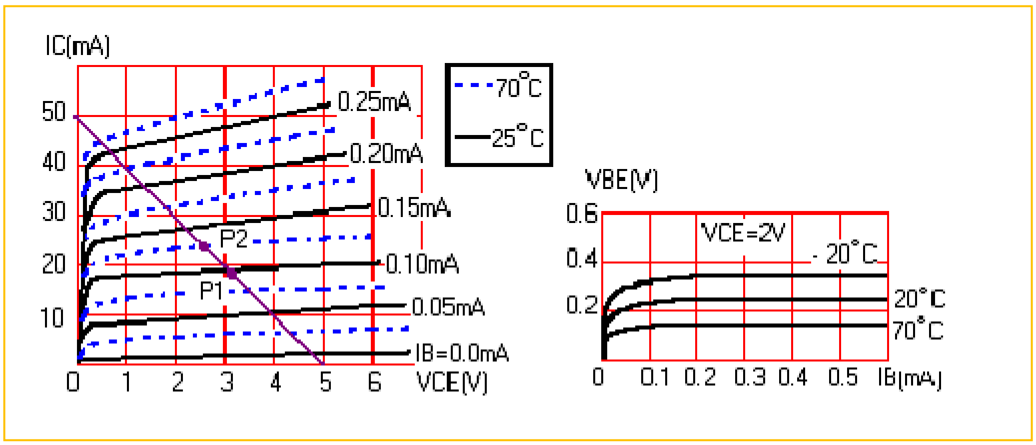


fig (a)



Recta de carga:

V_{CE}= 5V, I_C =0
I_C= 5V/100Ω = 50mA si V_{CE}=0

a) Punto de funcionamiento: I_C=19 mA, V_{CE}= 3.2 V; I_B=0.10 mA; V_{BE}= 0.22 V.

R_B= (V_{CC}-V_{BE}) / I_B = (5-0.22)/0.1mA = 47.8KΩ

b) I_C(70ºC) = 23 mA

V_{BE}= ha disminuido a 0.12V, $I_{B.}$=(5-0,12) / 47.8KΩ = 0.102 mA

V_{CE}= 2,8V

El punto de funcionamiento se corrió de P1 a P2

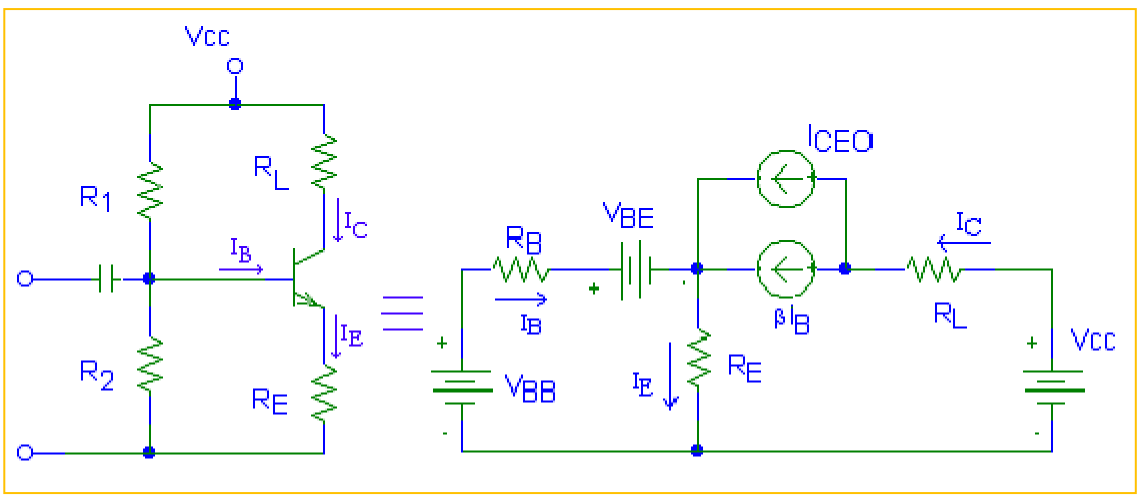
12.6 FACTOR DE ESTABILIDAD

El factor de estabilidad S mide la sensibilidad de la corriente de colector I_C respecto de los cambios en la corriente de fuga I_{CBO}. Mientras más bajo sea el valor de S, más estable es el circuito. El factor de estabilidad M mide la sensibilidad de la corriente de colector I_C respecto de los cambios de V_{BE}. El factor de estabilidad N mide la sensibilidad de la corriente de colector I_C respecto de los cambios de a.

$S= \Delta I_C/\Delta I_{CBO}$

$M=\Delta I_C/ \Delta V_{BE}$

$N=\Delta I_C/\Delta\alpha$



En el modelo simplificado se ha supuesto $r_D = \infty$, $r_E = 0$

$I_C= \beta I_B+I_{CEO}=\beta I_B+(\beta+1)I_{CBO} \approx\beta(I_B+I_{CBO})$

Del circuito $V_{BB} = V_{CC}(R_2/(R_1+R_2))$, $R_B=R_1R_2/(R_1+R_2)$

Del circuito equivalente, $V_{BB}-V_{BE} = R_BI_B+R_EI_E$

$V_{BB}-V_{BE}= R_B(I_C/\beta-I_{CBO})+R_EI_C= I_C(R_B/\beta+ R_E)-R_BI_{CBO}$

Derivando:

$0=\Delta I_C(R_B/\beta+R_E)-R_B\Delta I_{CBO}\rightarrow\Delta I_C/\Delta I_{CBO}=R_B/(R_B/\beta+R_E)$

$\mathbf{S= \beta R_B/(R_B+\beta R_E)}$

$V_{BB}- V_{BE} = R_BI_B+\beta R_EI_B\rightarrow V_{BB}-V_{BE}=I_B(R_B+\beta R_E)$

$V_{BB}- V_{BE} = (I_C/\beta)(R_B+\beta R_E)\rightarrow\beta(V_{BB}-V_{BE})=I_C(R_B+\beta R_E)$

Derivando:

$\Delta\beta(V_{BB}-V_{BE})= \Delta I_C(R_B+\beta R_E)+I_C\Delta\beta R_E$

$\Delta\beta(V_{BB}-V_{BE}-R_EI_C)=\Delta I_C(R_B+\beta R_E)$

$\Delta\beta(R_BI_B) = \Delta I_C\beta R_B/S$

$\Delta I_C/\Delta\beta=R_BI_B/(\beta R_B/S)=SI_C/\beta^2$

$\Delta I_C/\Delta\alpha=(\Delta I_C/\Delta\beta)(\Delta\beta/\Delta\alpha)$ $\beta=\alpha/(1-\alpha)\rightarrow\beta(1-\alpha)=\alpha$

$\Delta\beta(1-\alpha)-\beta\Delta\alpha=\Delta\alpha\rightarrow\Delta\beta/\Delta\alpha=(\beta+1)/(1-\alpha)=(\beta+1)/(\alpha/\beta))=\beta(\beta+1)/\alpha\approx\beta^2/\alpha$

$\Delta I_C/\Delta\alpha=(SI_C/\beta^2)(\beta^2/\alpha)\rightarrow \mathbf{N=SI_C/\alpha}$

$V_{BB}-V_{BE}=R_BI_B+R_EI_E\approx R_BI_B+\beta R_EI_B=(R_B+\beta R_E)I_B$

$V_{BB}-V_{BE}=(R_B+\beta R_E)\Delta I_C/\beta\rightarrow\Delta I_C/\Delta V_{BE}=-\beta/(R_B+\beta R_E)=-S/R_B$

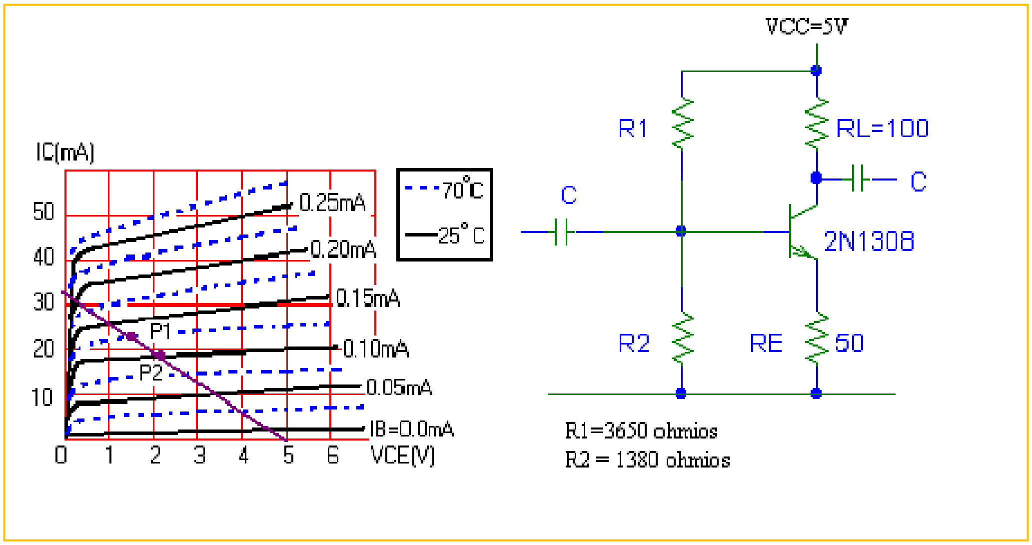
$\mathbf{M=\Delta I_C/\Delta V_{BE}= -S/R_B}$

Obsérvese en las fórmulas que si R_E= 0, entonces S= β aumenta y por lo tanto, lo hacen también M y N.

Ejemplo

Para el circuito de la figura, I_{CBO} = 3 μA, V_{BE}= 0,22v en 25ºC. Determinar:

a) El punto de funcionamiento



Recta de carga:

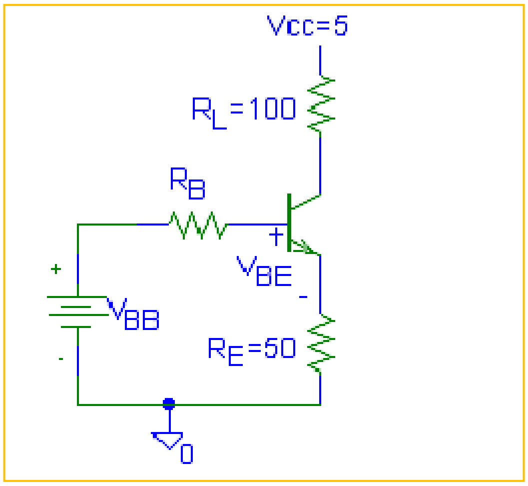
$Vcc = V_{CE} + (R_L+R_E)\ I_C$

$I_C= 0 \quad V_{CE} = V_{CC}= 5V$

$V_{CE} = 0 \quad I_C=5/150 = 33mA$

$V_{BB}=R_2V_{CC}/ (R_1+R_2) = 1380x5 / (1380+3650) = 1.37V$

$R_B=R_1R_2 / (R_1+R_2) = 1380x3650 / (1380+3650)= 1000\Omega$



V_{BB}-V_{BE} = $R_B I_B$+$R_E I_E$

Como una primera aproximación se desprecia $R_B I_B$

$I_C \approx I_E$= (V_{BB}-V_{BE}) /R_E = (1,37-0,22)/50 =23mA, punto $P_1 \rightarrow I_B$= 0,125mA

1.37- 0,22 = 1kΩ x 0,125mA + 50$I_C \rightarrow I_C$= (1,15-0,125)/50 = 20,5mA

Punto P_2 : I_C = 20,5 mA I_B=0,12 mA

Punto de funcionamiento: I_C=20,5mA, I_B=0,12mA; V_{CE}=1,8 V

b) Calcular S, M, y N

S = βR_B/ (R_B+bR_E)

S = (171x1kΩ)/(1kΩ+171x0,05kΩ) = 18

N = (SI_C/ α) α = β / (β+1) = 171/177 = 0,994
N = 18 x 20,5 / 0,994 = 0,37

M = - S / R_B = - 18/1kΩ = - 18 mmhos

M = - 0,018 mA / mV

c) ¿ Cuál es el cambio en I_C debido al cambio en I_{CBO} cuando la temperatura aumenta a 30ºC?

La corriente I_{CBO} aumenta con la temperatura en forma exponencial de la siguiente forma:

Germanio: $\Delta I_{CBO} = e^{0,069x\Delta T}$

Silicio : $\Delta I_{CBO}=e^{0,0368x\Delta T}$

Como $\Delta T = 5ºC \rightarrow \Delta I_{CBO} = e^{0,069x5} = 1,4$ veces

$I'_{CBO} = 1,4 \times 3\ \mu A = 4,2\ \mu A \rightarrow \Delta I_{CBO} = 1,2\ \mu A.$

$\Delta I_C = S\ \Delta I_{CBO} = 18 \times 1.2\ \mu A = 21,6\ \mu A.$

si no hubiera $R_E \rightarrow \Delta I_C = \beta \Delta I_{CBO} = 205,2 \mu A.$

d) Encontrar el aumento de I_C con respecto al cambio de V_{BE} cuando la temperatura sube a 30ºC.

$\Delta V_{BE}/\Delta T = -2,2\ mV/ºC, \ \ \Delta V_{BE} = -2,2x5 = -11mV.$

$\Delta I_C = M\Delta V_{BE} = -18\mu A./mV\ (-11) = 198\mu A. \approx 0,2mA.$

e) Si β se reduce en un factor de 0,9 ¿ cuál es el cambio correspondiente en I_C?

$\Delta I_C = N\ \Delta\alpha$

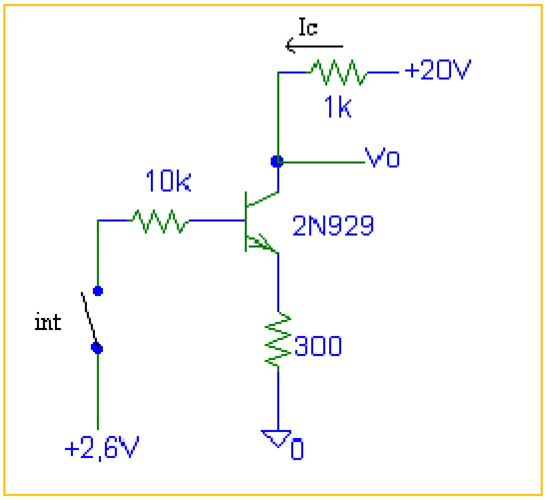
$N = 0,37\ A$	$\beta = 171$	$\alpha = 171 / 172 = 0,9942$
$\beta' = 171 \times 0,9 = 154$	$\beta' = 154$	$\alpha' = 154 / 155 = 0,9935$

$\Delta\alpha = -0,0007$

$\Delta I_C = -0,37 \times 0,0007 = -0,26\ mA$

Ejemplo

Para el circuito de la figura encontrar I_C y V_o cuando (a) Int esta abierto (b) Int está cerrado. b = 100 I_{CBO}



(a) Int abierto:

Como $I_B = 0 \rightarrow I_C = I_{CEO} = (\beta+1)\ I_{CBO}$

$I_C = (101) \times 10\mu A \approx 1mA$

$V_o = 20 - I_C(1k) = 19V$

(b) Int cerrado:

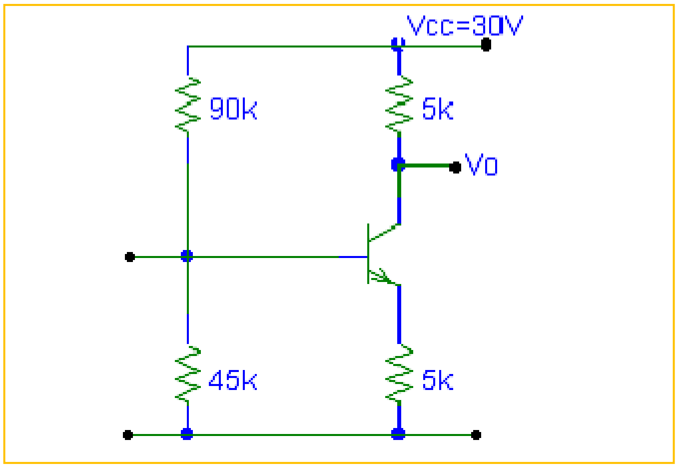
$2,6 - 0,6 = 10,3I_B + 3,00I_C = 10,3I_B + 0,3\beta I_B$
$2,0 = (10,3 + 30)I_B \quad I_B \approx 50\mu A \qquad I_C = 5mA$
Componente I_C debida a I_{CBO}:

$\Delta I_C = S\Delta I_{CBO} \quad S = \beta R_B/(R_B + \beta R_E) \ = (100x10)/(10+100x0,3) = 25$

$I_C \approx 25 \times 10\mu A = \ 0,25mA$
$I_C = 5\ mA + 0,25\ mA = 5,25mA$
$V_o = 20 - 5,25\ (1) = 14,75V$

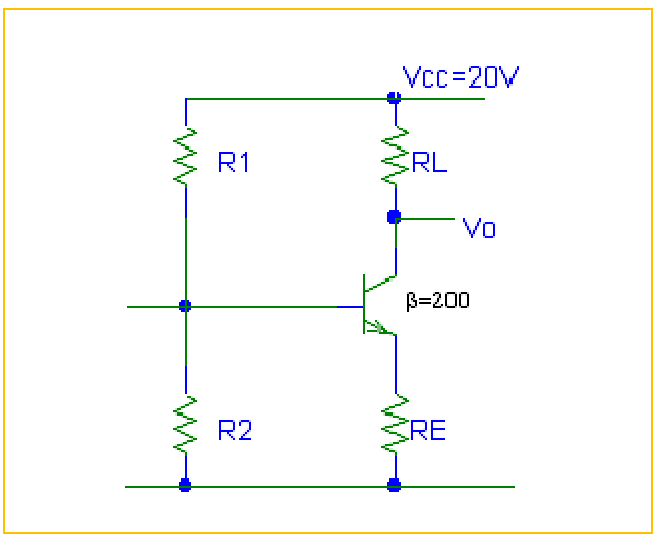
Ejercicio

Para el circuito de la figura, I_{CBO},= 10 μA, β = 100. Transistor de silicio. Calcular I_C y V_o



Ejemplo

Determine el valor de las resistencias del circuito para que I_C = 5mA , V_{CE} = 8V, V_E = 6V, S = 10.

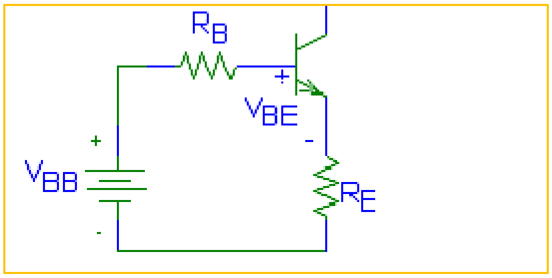


$R_E \approx V_E / I_C = 6V / 5mA = 1{,}2\ K$

$S = 10 = \beta R_B / (R_B+\beta R_E) = 200R_B/(R_B+240)$

$10R_B + 2400 = 200R_B \quad R_B = 2400/190 = 12{,}6K$

$V_{RL} = 20\text{-}V_{CE} - V_E = 20\text{-}8\text{-}6 = 6V \rightarrow R_L = 6/5 = 1{,}2K$



$V_{BB} - V_{BE} = (R_B + \beta R_E) I_B$

$I_B = I_C / \beta = 5mA/200 = 25\mu A$

$V_{BB} = 0{,}6 + (12{,}6K + 240K)\ 25\mu A$

$V_{BB} = 6{,}9V$

$V_{BB} = V_{CC} R_2 / (R_1 + R_2)$

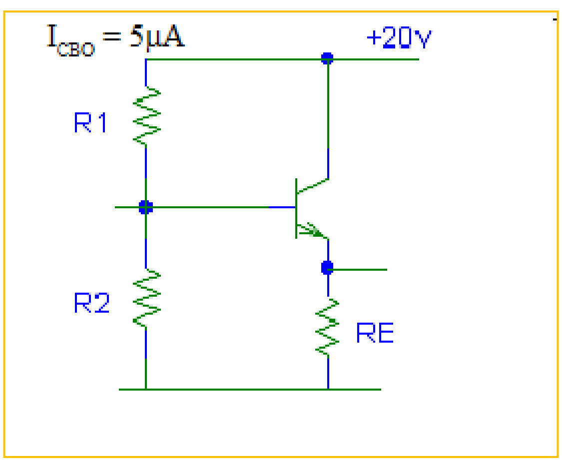
$R_B = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \rightarrow V_{BB} = V_{CC} R_B / R_1$

$6{,}9 = (20 \times 12{,}6k) / R_1 \rightarrow R_1 = 36{,}5k\Omega$

$6{,}9 = 20R_2 / (36{,}5k + R_2) \rightarrow R_2 = 19{,}2\ k\Omega$

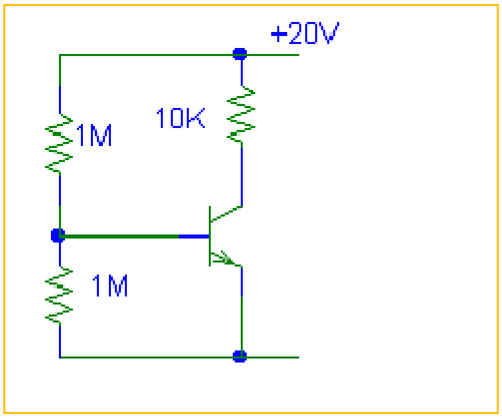
Ejercicio

1. Para el seguidor - emisor de la figura: ¿ qué valor de resistencia se requiere para un punto de funcionamiento I_C = 1mA, V_{CE} = 10V, S = 5? β = 100



Sugerencia: como I_C es pequeña use $I_C = \beta (I_B + I_{CBO})$

2. En el circuito de la fig, calcular la disipación de potencia en el transistor.
   β = 100;



Sugerencia : $P_D = V_{CE}\ I_C$