

CAPÍTULO

6 TRANSISTOR BIPOLAR DE JUNTURA



6.1. GENERALIDADES:

El tubo de vacío comenzó siendo el dispositivo electrónico de gran interés y desarrollo hasta mediados de la década de los cuarenta, sin embargo la electrónica tenía que esperar la llegada de un nuevo dispositivo de mayores ventajas como es el transistor.

Las ventajas comparativas de este, con relación a los tubos de vacío son:

- Es de construcción sólida
- Son más pequeños y livianos
- No requieren calentamiento previo para su funcionamiento, razón por la cual no experimentan pérdidas debido a este calentamiento.
- Su funcionamiento es instantáneo
- Opera con voltajes muy pequeños
- Consume menos potencia
- Su tiempo de vida útil es grande

6.1.1. ESTRUCTURA Y SIMBOLOGÍA

El transistor es un dispositivo que consta de tres capas de material semiconductor (tipo n o p) de la siguiente manera:

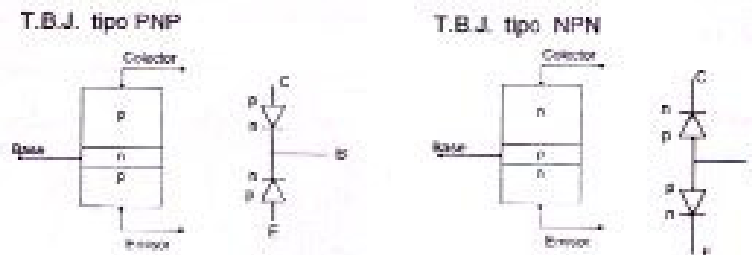


Figura 6.1 Estructura y simbología

Análogamente puede ser considerado como la unión de dos diodos. La simbología es la siguiente:

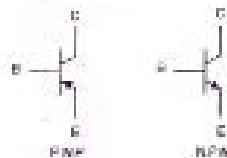


Figura 6.2 Símbolo de los tipos de Transistores

La flecha nos indica por donde fluye la totalidad de la corriente.

6.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS CAPAS SEMICONDUCTORAS

Base.- Es la capa más delgada comparada con la capa del emisor y colector. El ancho de la base es aproximadamente 150 veces más pequeño que el ancho total del transistor; esta capa es pobremente dopada, la conductividad es baja, por lo tanto existe menor cantidad de portadores de carga libre.

Emisor.- Es la capa de dimensión física mayor que la base, y la que se encuentra mayormente dopada.

Colector.- Esta capa tiene dimensiones más grandes que las dos capas anteriores, y esta ligeramente menos dopada que el emisor. Su función es la de recolectar los portadores mayoritarios que salen del emisor. Por ser el de mayor área es donde se disipa la mayor parte de la potencia. Para transistores con encapsulado metálico el colector está conectado a éste, como se muestra en la figura 6.3.



Figura 6.3 Transistor encapsulado

6.1.3. POLARIZACION DEL TRANSISTOR

Para que el transistor actúe como un **AMPLIFICADOR** es necesario una polarización adecuada en cada uno de los terminales, así:

- La juntura Base-Emisor debe estar en polarización directa y la juntura Base-Collector en polarización inversa, como se puede apreciar en la figura 6.4

a.- T.B.J (N.P.N)

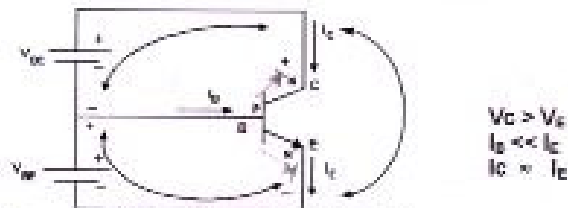


Figura 6.4 Polarización de un Transistor NPN

b.- T.B.J. (P.N.P)

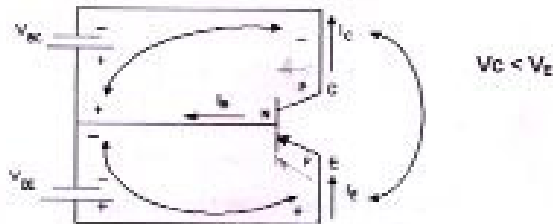


Figura 6.5 Polarización de un transistor PNP

6.1.4. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR BIPOLAR (N.P.N)

Recordemos que:

- El colector n => Portadores Mayoritarios : e-
Portadores Minoritarios : h+
- La base p => Portadores Mayoritarios : h+
Portadores Minoritarios : e-
- El emisor n => Portadores Mayoritarios : e-
Portadores Minoritarios : h+

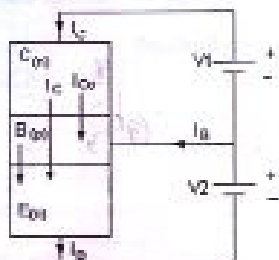


Figura 6.6 Estructura interna de un Transistor

• **Juntura Colector-Base:**

Se encuentra en polarización inversa por lo tanto los portadores minoritarios del colector cruzan la juntura np hacia la base a recombinarse, pero como el número de los portadores minoritarios del colector es mayor que los portadores minoritarios de la base (Debido a que el colector es más grande que la base), entonces en la base sobran huecos generando una corriente de portadores minoritarios llamada Corriente de Fugas (I_{co}), que depende de la temperatura.

• **Juntura Base-Emisor :**

Se encuentra en polarización directa por lo tanto los portadores mayoritarios de la base se desplazan hacia el emisor.

$$h^+ : \text{Base} \Rightarrow \text{Emisor}$$

$$e^- : \text{Emisor} \Rightarrow \text{Base}$$

Como los electrones se desplazan del emisor hacia la base estos se recombinan con la mayoría de los huecos que vienen del colector.

$$I_e = I_c + I_b$$

$$I_c = I_c(\text{mayoritarios}) + I_{co}(\text{minoritarios}) \quad \text{(Ecuación 6.1)}$$

6.1.5. CONFIGURACIONES DEL T.B.J.

a) Emisor Común:

- Terminal de entrada : Base
- Terminal de salida : Colector
- Terminal común : Emisor

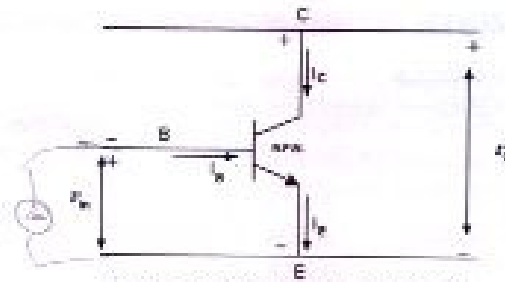


Figura 6.7 Configuración Emisor Común

b) Colector Común : (Seguidor de Emisor)

- Terminal de entrada : Base
- Terminal de salida : Emisor
- Terminal Común : Colector

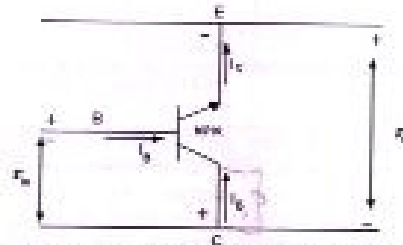


Figura 6.8 Configuración Colector Común

c) Base Común :

- Terminal de entrada : Emisor
- Terminal de salida : Colector
- Terminal Común : Base

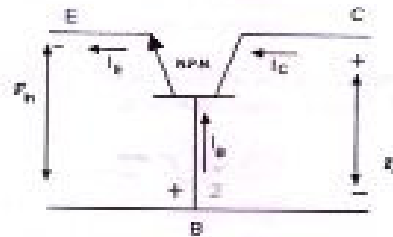


Figura 6.9 Configuración Base Común

De acuerdo a la configuración, el transistor podrá amplificar Voltaje, Corriente o Potencia.

6.1.6. CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL T.B.J.

Analizaremos la característica de entrada:

$$I_b = f (V_{be} , V_{ce})$$

y la característica de salida:

$$I_c = f (V_{ce} , I_b)$$

de un Transistor de Silicio N.P.N.

a) Emisor Común :

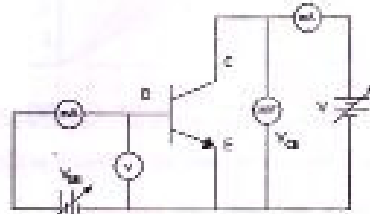


Figura 6.10 Característica estática del TBJ en Emisor Común

1) Característica de Entrada:

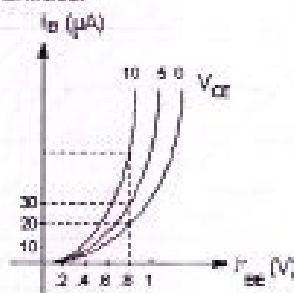


Figura 6.11 Característica de entrada del Transistor en Emisor Común

2) Característica de Salida:

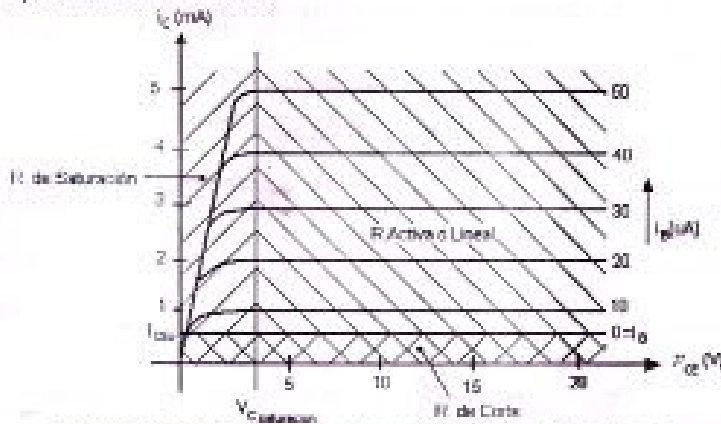


Figura 6.12 Característica de salida del Transistor en Emisor Común

b) Colector Común:
1) Característica de Entrada

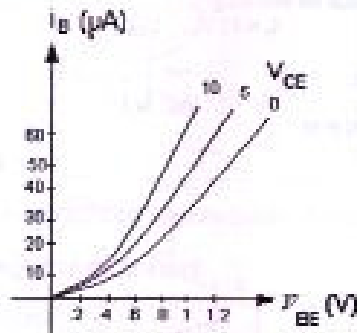


Figura 6.13 Característica de entrada del Transistor en Colector Común

2) Característica de Salida:

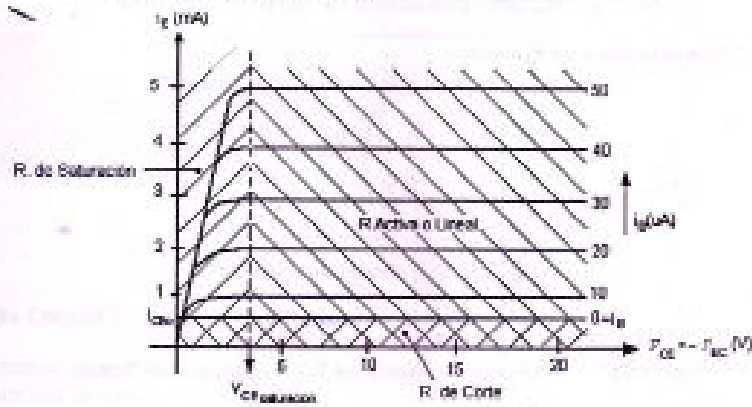


Figura 6.14 Característica de salida del Transistor en Colector Común

c) Base Común:

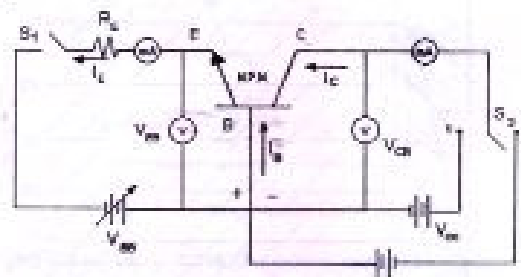


Figura 6.15 Característica estática del Transistor en Base Común

1) Característica de Entrada:

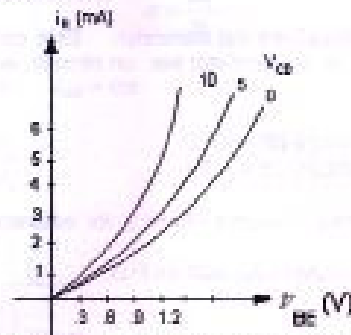


Figura 6.16 Característica de entrada del Transistor en Base Común

2) Característica de Salida:

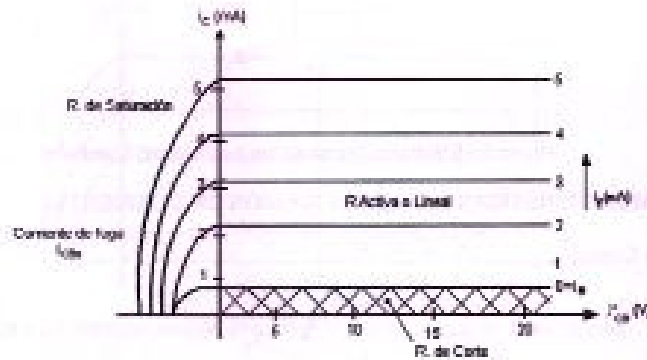


Figura 6.17 Característica de salida del Transistor en Base Común

Región de Saturación:

En esta región las dos junturas están polarizadas directamente:

- Juntura BE (J_{BE}) en Polarización Directa (P.D)
- Juntura BC (J_{BC}) en P.D

Cuando se emplea al transistor como un interruptor, esta región viene a ser el interruptor en corto circuito.

Región de Corte:

Aquí las dos junturas se encuentran en polarización inversa.

- Juntura BE en Polarización Inversa (P.I.)
- Juntura CB en P.I.

Esta región corresponde al interruptor en circuito abierto.

Región Activa :

Esta caracterizada por la linealidad del transistor. Este comportamiento lineal del transistor permite reemplazar al transistor por un circuito equivalente por medio de una fuente de corriente.

- Juntura BE en P.D.
- Juntura CB en P.I.

Aproximadamente el Voltaje Colector - Emisor de saturación es : 0,2-0,3 [V]

Cuando el Transistor está saturado J_{BC} está en P.D.

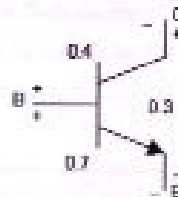


Figura 6.18 Voltajes típicos en las junturas del Transistor

6.1.7. CARACTERISTICAS DE AMPLIFICACIÓN DE CORRIENTE.

- Base Común :

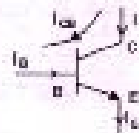


Figura 6.19 Corriente de fuga Colector - Base en Configuración Base Común

Se define a α como el factor de amplificación de corriente en Base Común. O podríamos decir que es la cantidad de portadores mayoritarios que salen del colector y entran al emisor.

$$\alpha = \frac{I_{C(ma)}}{I_E}$$

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CB}}{I_E} \tag{Ecuación 6.2}$$

como : $I_{CB} \ll I_B \ll I_C$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \tag{Ecuación 6.3}$$

a) Análisis en AC

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

cuando: $V_{CB} = cte$

$$\alpha \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (\text{Ecuación 6.4})$$

b) Análisis de DC

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E / V_{CB(sat)}} \quad (\text{Ecuación 6.5})$$

En la práctica $\alpha_{DC} \approx \alpha_{AC}$

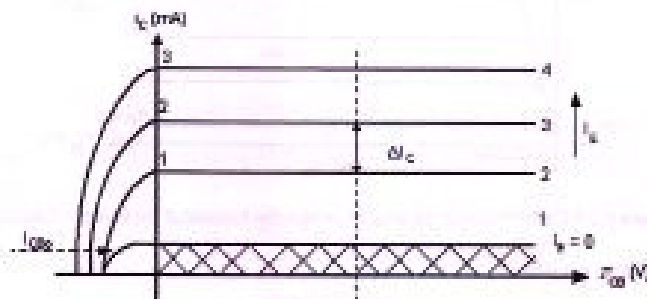


Figura 6.20 Característica de amplificación del Transistor en Base Común

Ejemplo: $\alpha_{AC} = \frac{I[mA]}{I[mA]} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \approx 1 < 1$

En el punto A:

$$\alpha \approx \frac{2[mA]}{2[mA]} \approx 1 < 1$$

Luego para base común no existe ganancia de corriente, $\alpha < 1$

Sea:

1. $I_E = I_C + I_B$
2. $I_C = \alpha I_E$ (Ecuación 6.6)
3. $I_C = I_{C(sat)} + I_{CO}$ (Ecuación 6.7)

Entonces:

$$\begin{aligned} I_C &= \alpha I_E + I_{CO} \\ I_C &= \alpha (I_B + I_C) + I_{CO} \\ I_C(1 - \alpha) &= \alpha I_B + I_{CO} \\ I_C &= \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{CO}}{1 - \alpha} \end{aligned}$$

Si

$$\alpha = 0,99 \text{ y } I_{B} = 0$$

$$I_C = (1 / (1 - 0,99)) I_{CO} = 100 I_{CO}$$

= I_{CO} , corriente de fugas debido a los portadores minoritarios.

Emisor Común :

Se define a β , como el factor de amplificación de corriente en emisor común.

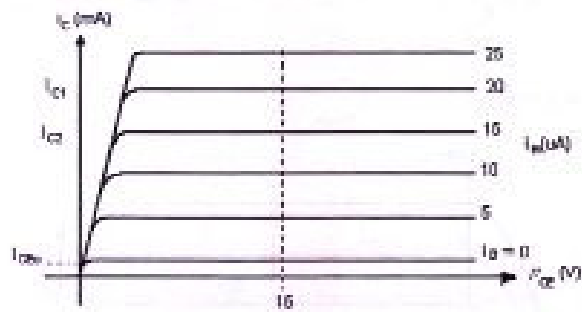


Figura 6.21 Característica de amplificación del transistor en Emisor Común

a) Análisis en AC

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

cuando $V_{CE} = cte$

$$\beta_{AC} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

b) Análisis en DC

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \text{ siendo } V_{CE} = cte \quad (\text{Ecuación 6.8})$$

En la práctica $\beta_{DC} = \beta_{AC}$

Si $20 \leq \beta \leq 600 \Rightarrow$ El T.B.J. de señal tiene una buena amplificación de corriente.

Si $\beta \leq 20 \Rightarrow$ Para transistores de Potencia

• **RELACION ENTRE α y β .**

$$I_E = I_C + I_B$$

$$1 = \frac{I_C}{I_E} + \frac{I_B}{I_E}$$

$$1 = \alpha + \frac{I_B}{I_E}$$

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

$$1 = \alpha \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

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

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{(Ecuación 6.9)}$$

$$\alpha\beta + \alpha = \beta$$

$$\beta(\alpha - 1) = -\alpha$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \text{(Ecuación 6.10)}$$

$$\beta + 1 = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{I_C I_E}{I_B I_C}$$

$$\beta + 1 = \frac{I_E}{I_B}$$

$\beta+1$: Ganancia de corriente para colector común.

EN RESUMEN:

- **Base Común:** $\Delta i \approx \frac{I_C}{I_E} \approx \alpha < 1$, no amplifica corriente. *solo voltaje.*
- **Emisor Común:** $\Delta i \approx \frac{I_C}{I_E} \approx \beta > 1$, si amplifica corriente. *corriente*
- **Colector Común:** $\Delta i \approx \frac{I_E}{I_B} \approx \beta + 1$, si amplifica corriente. *no corriente ni voltaje.*

Ejemplo:

Se tiene el siguiente circuito de polarización del TBJ en configuración de Emisor Común. Si el TBJ es de silicio ($V_C = 0.7 [V]$) con un $\beta=100$ y con $I_{CS}=30 [nA]$; hallar:

- La corriente de polarización de la Base.
- La corriente de polarización del colector.
- Determinar si el transistor trabaja en la región activa.

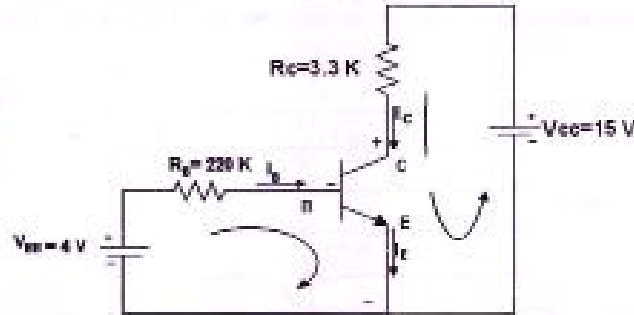


Figura 6.22

La juntura B - E => P.D.

$$\begin{aligned} \text{a) } -V_{BB} + I_B R_B + V_{BE} &= 0 \\ I_B &= (V_{BB} - V_{BE}) / R_B \\ I_B &= (4 - 0,7) / 220 \text{ K} = 15 \mu\text{A} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 6.11)}$$

$$\begin{aligned} \text{b) } I_C &= \beta I_B = 1500 [\mu\text{A}] = I_{C(max)} + I_{CS} \\ I_{C(max)} &= 1500 [\mu\text{A}] - 30 [n\text{A}] = 1,469 [\text{mA}] \\ I_C &= I_{C(max)} \\ I_C &= \beta I_B + (\beta + 1) I_{CS} = 1,503 [\text{mA}] \\ I_C &\text{ no ha variado en nada.} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 6.12)}$$

$$\begin{aligned} \text{c) Si } V_{CE} < 0, &\text{ el transistor no trabaja en la región activa.} \\ \text{Si } V_{CE} > 0, &\text{ el transistor trabaja en la región activa.} \\ V_{CB} + V_{BE} - V_{CC} + I_C R_C &= 0 \\ V_{CE} &= -V_{BE} + V_{CC} - I_C R_C \\ V_{CE} &= -0,7 + 15 - 1,5[\text{mA}] 3,3[\text{K}\Omega] \\ V_{CE} &= 9,35 [V] \end{aligned} \quad \text{(Ecuación 6.13)}$$

Como el $V_{CE} > 0$, => el transistor está en la región activa.

6.1.8. AMPLIFICACION DE VOLTAJE

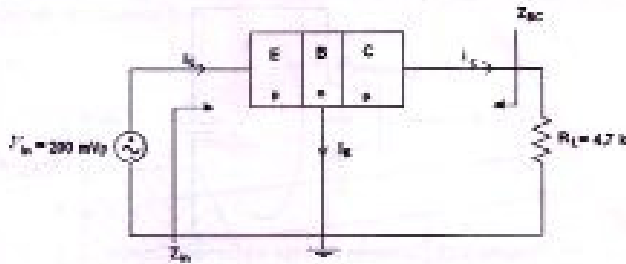


Figura 6.23 Circuito amplificador de voltaje en Base Común

Generalmente: $Z_{in} = Z_{BE} \approx 20 \Rightarrow 200 \Omega$
 $Z_o = Z_{BC} = 100K \Rightarrow 1 M\Omega$

Sea $Z_{in} = 100 \Omega$
 $I_C = V_{in} / Z_{in} = 200mVp / 100\Omega = 2mA$ (Ecuación 6.14)

Debido a que $\alpha \approx 1$
 $\Rightarrow I_C = I_E$
 $I_C = 2[mA]$
 $V_o = I_C R_L$ (Ecuación 6.15)
 $V_o = 2[mA] 4,7[K\Omega]$
 $V_o = 9,4 Vp$

La ganancia de voltaje ($\Delta v = G_v$)

$$\Delta v = V_o / V_{in} = 9,4 Vp / 200 mVp = 47 \quad \text{(Ecuación 6.16)}$$

La acción del transistor es transferir la corriente de una región de baja resistencia a una región de alta resistencia, produciendo el efecto de Amplificación de Voltaje.

6.1.9. CORRIENTES DE FUGA.

Para un N.P.N

a) Base Común : $I_{CBO} = I_{CE}$

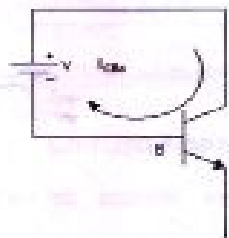
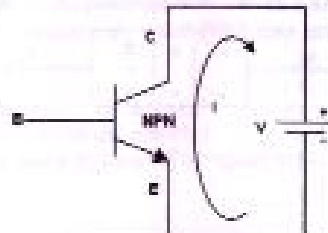


Figura 6.24 Corriente de fuga en Base Común

b) Emisor Común : $I_{CE0} = (\beta + 1) I_{CB0}$



$$I_{CE0} = (\beta + 1) I_{CB0}$$

Figura 6.25 Corriente de fuga en Emisor Común

c) Colector Común:

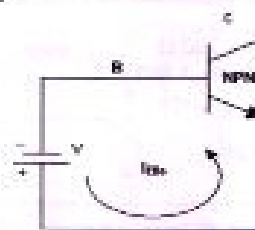


Figura 6.26 Corriente de fuga en Colector Común

Las corrientes de fuga dependen de la temperatura:

- I_{CB0} : Corriente Colector-Base con emisor abierto.
- I_{CE0} : Corriente Colector-Emisor con base abierta.
- I_{EB0} : Corriente Emisor-Base con colector abierto.

Para un transistor del tipo P.N.P :

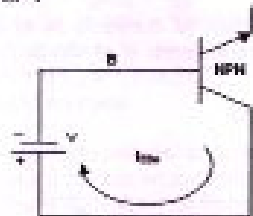


Figura 6.27 Corriente de fuga en Emisor Común (PNP)

6.1.10. ESPECIFICACIONES MAXIMAS DEL T.B.J

Constituyen las especificaciones técnicas del constructor para seleccionar un transistor:

- I_{Cmax} = máxima corriente de colector
- V_{CEmax} = voltaje C-E máximo
- V_{BEmax} = voltaje B-E máximo
- V_{CBmax} = voltaje C-B máximo
- P_{max} = potencia máxima de disipación del T.B.J

El análisis lo haremos en la configuración de Emisor Común.
 Los parámetros que no deberán excederse son: I_{Cmax} , V_{CEmax} , y la P_{Cmax} .
 Teniendo en cuenta que:

$$I_C V_{CE} < P_{Cmax}$$

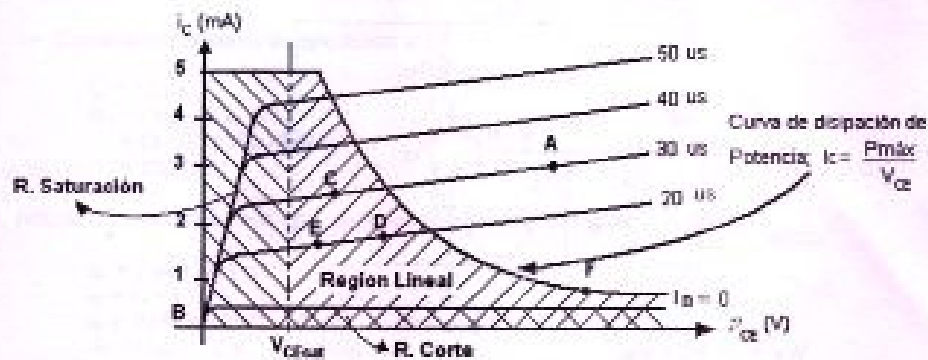


Figura 6.28 Regiones de Corte y Saturación en Emisor Común

- Los puntos A, F, B, E, no son puntos de trabajo buenos.
- Los puntos C, D, son puntos de trabajo del T.B.J.

Por Ejemplo sea:

$$P_{Cmax} = 30 \text{ [mW]}$$

$$V_{CEmax} = 20 \text{ [V]}$$

$$I_{Cmax} = 6 \text{ [mA]}$$

a) Si $I_C = 6 \text{ mA}$

$$V_{CE} \leq \frac{P_{Cmax}}{I_C} \quad (\text{Ecuación 6.17})$$

$$= \frac{30 \text{ [mW]}}{6 \text{ [mA]}}$$

$$= 5 \text{ [V]}$$

b) Si $V_{CE} = 20 \text{ V}$

$$I_C \leq \frac{P_{Cmax}}{V_{CE}}$$

$$= \frac{30 \text{ [mW]}}{20 \text{ [V]}}$$

$$= 1,5 \text{ [mA]}$$

6.1.11. POLARIZACION Y ESTABILIDAD TERMICA DEL T. B. J.



Figura 6.29 Polarización del Transistor NPN y PNP

Suponiendo un circuito de polarización como el siguiente:

- Si $V_{CC} = 30 [V]$
- $R_C = 3,8 [K\Omega]$
- $V_{BE} = 3 [V]$
- $R_B = 153 [K\Omega]$

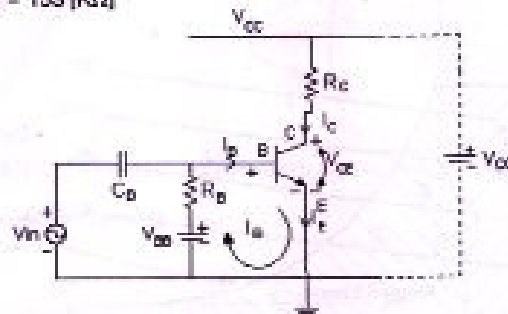


Figura 6.30

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

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{: Ecuación de la recta de carga.} \quad \text{(Ecuación 6.18)}$$

Si $V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = V_{CC} / R_C = 30[V] / 3,8[K\Omega] = 7,89[mA] \approx 8 [mA]$

Si $I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} = 30 [V]$

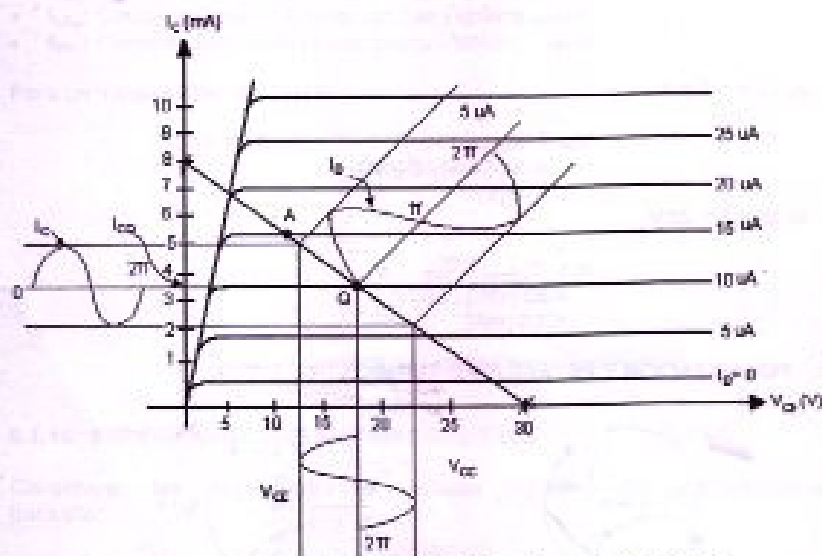


Figura 6.31 Señales de salida del Transistor en Emisor Común

$$-V_{BE} + I_B R_B + V_{CE} = 0$$

$$\Rightarrow I_B = (V_{BE} - V_{CE}) / R_B \quad (\text{Ecuación 6.18})$$

$$= (3 - 0,7) \text{ [V]} / 150 \text{ [K}\Omega\text{]} \quad (\text{Para el punto A})$$

$$= 15 \text{ [}\mu\text{A}\text{]}$$

El punto A de operación no conviene puesto que aún no entra a la región lineal.

\(\Rightarrow\) Cambiamos el punto de operación al Q :

$$I_B = 10 \text{ }\mu\text{A}$$

$$R_B = (V_{BE} - V_{CE}) / I_B \quad (\text{Ecuación 6.20})$$

$$= (3 - 0,7) \text{ [V]} / 10 \text{ [}\mu\text{A}\text{]}$$

$$= 230 \text{ [K}\Omega\text{]}$$

Ahora si suponemos que una señal de entrada de alterna es:

$$i_b = 5 \text{ sen } \omega t \text{ (}\mu\text{A)}$$

$$I_B = I_B + i_b$$

$$I_B = 10 + 5 \text{ sen}(\omega t) \text{ (}\mu\text{A)}$$

$$\text{Si } V_{CEQ} = 15 \text{ V (Gráfico)}$$

$$I_{CQ} = (30 - 15) \text{ [V]} / 3,8 \text{ [K}\Omega\text{]} = 3,94 \text{ [mA]} \approx 4 \text{ [mA]}$$

Observando en el gráfico obtenemos que:

$$I_{C\text{max}} = 5,4 \text{ [mA]}$$

$$I_{C\text{min}} = 2,2 \text{ [mA]}$$

$$\Delta I_C = 3,2 \text{ [mA]}$$

$$\Delta I_B = 10 \text{ [}\mu\text{A}\text{]}$$

$A_i = G_i = \Delta I_C / \Delta I_B = 3,2 \text{ [mA]} / 10 \text{ [}\mu\text{A}\text{]} = 320$ Ganancia de corriente obtenida con los datos del gráfico 6.31

CARACTERÍSTICA DE ENTRADA

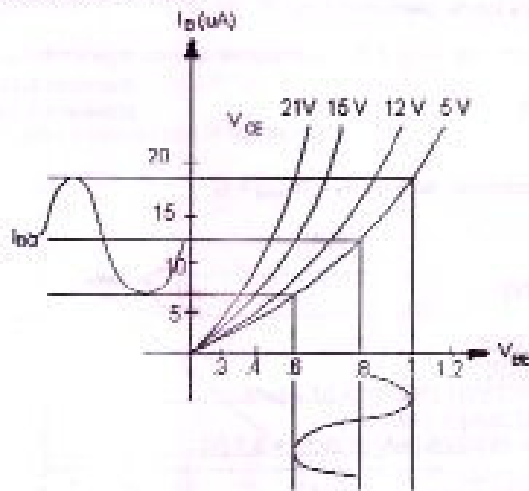


Figura 6.32 Característica de entrada en Emisor Común

$$\begin{aligned} \Delta V_{BE} &= 1 - 0,6 = 0,4 \text{ V} \\ \Delta V_{CE} &= 21 - 12 = 9 \text{ V} \\ A_v = G_v &= \Delta V_{CB} / \Delta V_{BE} = 9 \text{ [V] / } 0,4 \text{ [V]} \\ &= 22,5 : \text{ Ganancia de voltaje a partir de los datos del gráfico 6.32} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \Delta V_{BE} / \Delta I_B = 0,4 \text{ [mA] / } 10 \text{ [}\mu\text{A]} = 40 \text{ [K}\Omega\text{]} \quad (\text{Ecuación 6.21}) \\ Z_o &= \Delta V_{CE} / \Delta I_C = 9 \text{ [V] / } 3,2 \text{ [mA]} = 2,8 \text{ [K}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

6.2. CIRCUITO DE AUTOPOLARIZACIÓN.

Consiste en polarizar al T.B.J con una sola fuente.

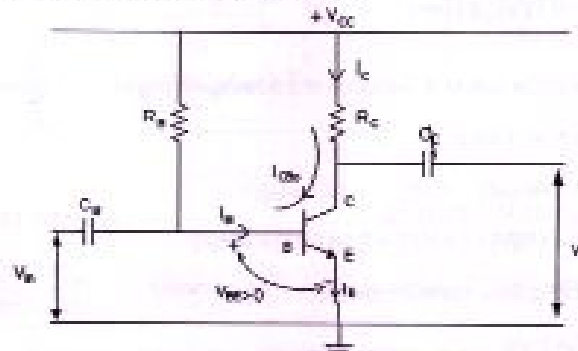


Figura 6.33 Circuito de autopolarización del TBJ

Entrada :

$$V_{cc} = I_B R_1 + V_{BE} \quad (\text{Ecuación 6.22})$$

$$I_B = (V_{cc} - V_{BE}) / R_1 - V_{cc} R_2 \text{ La } I_B \text{ es constante si fijamos } V_{cc} \text{ y } R_1.$$

$$V_{BE} = V_{BE} : \begin{matrix} 0,7 \text{ para transistores de silicio,} \\ 0,3 \text{ para los de germanio.} \end{matrix}$$

Salida :

$$V_{cc} = I_C R_C + V_{CE} \quad (\text{Ecuación 6.23})$$

$$V_C = V_{CE} = V_C - I_C R_C \quad (\text{Ecuación 6.24})$$

$$I_C \approx \beta I_B$$

Despreciando la corriente de fuga: $I_C = I_{C(\text{base})} + I_B$

EJEMPLO 1:

$$\begin{aligned} \text{Si } V_{cc} &= 15 \text{ [V]} \\ \beta &= 50 \\ R_1 &= 250 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ R_2 &= 2,2 \text{ [K}\Omega\text{]} \\ I_B &= (15 - 0,7) \text{ [V] / } 250 \text{ [K}\Omega\text{]} = 57,2 \text{ [}\mu\text{A]} \\ I_C &= 50 (57,2 \mu\text{A}) = 2,86 \text{ [mA]} \\ V_{CE} = V_C &= 15 - 2,86 \text{ [mA]} (2,2 \text{ [K}\Omega\text{]}) = 8,7 \text{ [V]} \end{aligned}$$

El transistor está en la región lineal.

EJEMPLO 2:

Sea :

$$V_{CC} = 25 \text{ [V]}$$

$$R_C = 4.1 \text{ K}$$

$$I_B = 35 \text{ [}\mu\text{A]}$$

$$I_C = 4 \text{ [mA]}$$

$$\beta = I_C / I_B = 4 \text{ [mA]} / 35 \text{ [}\mu\text{A]} = 114$$

$$V_{CE} = 25 - 4 \text{ [mA]} (4.1 \text{ K}\Omega) = 9 \text{ [V]}$$

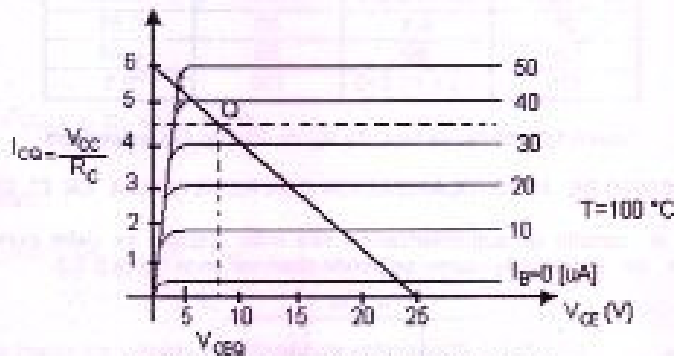


Figura 6.34 Punto de trabajo del Transistor (Q)

Este circuito por efectos de la temperatura se vuelve muy inestable, por tres razones:

- a) La I_{CBO} varía con la temperatura
 Si la Temperatura \uparrow la I_{CBO} \uparrow
 La temperatura \uparrow en $10^\circ\text{C} \Rightarrow$ la I_{CBO} se duplica.
- b) El voltaje V_{BE} disminuye con la temperatura, 2.5 [mV] por grado centígrado de temperatura.
- c) El β del transistor aumenta con la temperatura.

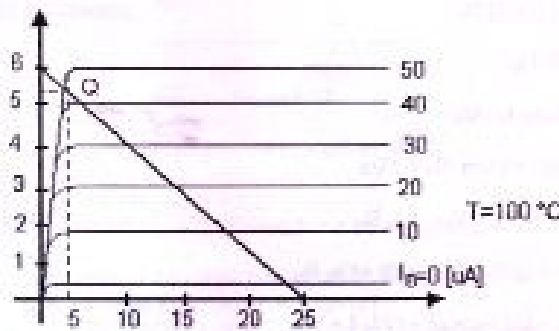


Figura 6.35 Relación del β con respecto a la temperatura

El punto Q se desplaza a la región de saturación, distorsionando los niveles de voltaje. Si el T.B.J se calienta puede, hasta destruirse. Este circuito no se utiliza a menos que se mantenga constante la temperatura.

A continuación se muestra en la tabla 6.1. los valores de temperatura, de la corriente de colector debido a los portadores minoritarios, y otras características de un T.B.J de silicio:

T °C	I_{CBO}	β	V_{BE} (V)
-65	$0,2 \times 10^{-3}$	20	0,85
25	0,1	50	0,65
100	20	80	0,48
175	$3,3 \times 10^{-3}$	120	0,3

Tabla 6.1. Corrientes de fuga, β y V_{BE} de acuerdo a la temperatura

6.2.1. CIRCUITO DE AUTOPOLARIZACIÓN CON RESISTENCIA EN EL EMISOR.

Para que el circuito de autopolarización sea más estable se debe poner una resistencia de emisor R_E como se puede observar en la figura 6.2.3.

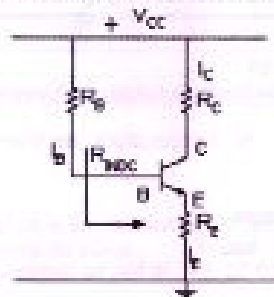


Figura 6.36 Circuito de autopolarización con R en el emisor

R_{nec} : Es la resistencia vista desde la base.

$$R_{nec} = (\beta + 1) R_E \tag{Ecuación 6.25}$$

$$\beta + 1 = I_E / I_B$$

$$V_{in} = R_{nec} I_B, \quad V_o = I_C R_C$$

$$R_{nec} = [(\beta + 1) V_{in} R_C] / V_o$$

$$\Rightarrow V_{cc} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E \tag{Ecuación 6.26}$$

$$= I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

$$= I_B [R_B + (\beta + 1) R_E] + V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E} \tag{Ecuación 6.27}$$

$$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_B + (\beta + 1)R_C}$$

I_B es menor que en el circuito de polarización anterior, que no tenía la resistencia en el emisor. Con esto se reduce al máximo la influencia de I_{CQ} , ya que se disminuye la I_B .

$$\Rightarrow V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E$$

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{Si despreciamos } I_B \text{ puesto que es muy pequeña,}$$

tenemos:

$$I_E \approx I_C$$

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

En resumen:

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

$$V_E = I_C R_E$$

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

Ejemplo: Hallar los voltajes y corrientes de polarización del circuito.

Si $V_{CC} = 18 \text{ [V]}$

$R_B = 390 \text{ [K}\Omega\text{]}$

$R_C = 2,2 \text{ [K}\Omega\text{]}$

$R_E = 1 \text{ [K}\Omega\text{]}$

$\beta = 100$

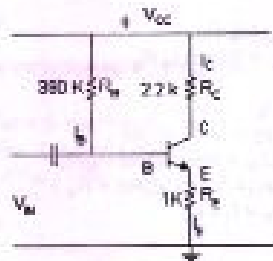


Figura 6.37

$$I_B = V_{CC} / [R_B + (\beta + 1)R_C] = 18 / (390\text{K} + (101)\text{K})$$

$$I_B = 36,6 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 (36,6 \mu\text{A}) = 3,66 \text{ [mA]} = I_E$$

$$V_E = V_{BE} + V_C = V_{BE} + I_C R_C = 0,7 + 3,66 \text{ [mA]}(1\text{K}\Omega)$$

$$V_E = 4,36 \text{ V}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 18 - 3,66 \text{ [mA]}(2,2\text{K}\Omega) = 9,94 \text{ [V]}$$

$$V_E = I_E R_E = 3,66 \text{ [mA]} (1\text{K}\Omega) = 3,66 \text{ [V]}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 9,94 - 3,66 = 6,3 \text{ [V]} \quad ; \quad \text{el transistor está en la región activa.}$$

6.2.2. CIRCUITO DE POLARIZACIÓN TOTAL

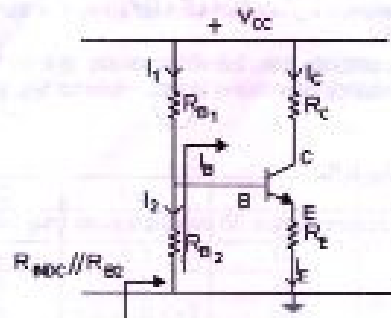


Figura 6.38 Circuito de polarización completa del Transistor

Para que toda la corriente de I_1 se vaya por R_{B2} se debe cumplir que $R_{B2} \ll R_{B1}$, es decir $I_2 \gg I_B$

Como:

$$I_1 = I_2 - I_B \quad \text{(Ecuación 6.28)}$$

$$\Rightarrow I_1 \approx I_2$$

Y entonces se cumple que:

$$V_B = V_{CC} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2}) \quad \text{(Ecuación 6.29)}$$

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

$$I_C = V_C / R_C \quad \text{(Ecuación 6.30)}$$

$$V_B = V_{BE} + I_C R_C$$

$$V_B = V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_E$$

Si consideramos: $I_C \approx I_E$

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

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_C R_E$$

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

$$I_B = I_1 - I_2$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_{B2}}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B1}} \left(\frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{R_{B1}} \right)$$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_{B1}} - V_B \left(\frac{1}{R_B} \right)$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_B}{R_B}$$

$$I_B = \frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{R_E (\beta + 1) I_E}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_B}}{1 + \frac{(\beta + 1) R_E}{R_B}} \quad \text{(Ecuación 6.31)}$$

a) ANALISIS DE LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA.

Si la temperatura varía ↑ de tal manera que:

$$I_{CBO} \text{ (varia) } \uparrow$$

$$\beta \text{ (varia) } \uparrow$$

⇒ Tenemos una variación de la $I_C \approx I_E$ que también ↑

Es decir:

$$\text{Si } \beta \uparrow \text{ ó } I_{CBO} \uparrow \Rightarrow I_C \approx I_E$$

$$V_C \uparrow$$

$$V_B = \text{cte} \Rightarrow V_{BE} \downarrow \Rightarrow I_B$$

Consideremos el V_{BE} con sus variaciones $\pm \Delta V_{BE}$

$$V_C = V_B - V_{BE} \pm \Delta V_{BE} = I_C R_C$$

$$I_C = (V_B - V_{BE} \pm \Delta V_{BE}) / R_C$$

$$I_E = (V_E \pm \Delta V_{BE}) / R_E$$

Si queremos mantener $I_C = \text{cte}$

$$\Rightarrow V_C \gg \pm \Delta V_{BE}$$

$$\text{Sea: } \Delta V_{BE(\text{max})} = 0,1 \text{ [V]}$$

$$V_C \approx 10 (0,1) = 1 \text{ [V]}$$

Entonces se tomará $V_C > 1 \text{ [V]}$ como criterio de diseño de un amplificador.

b) $V_B = \text{cte}$

Se debe cumplir que $I_C \gg I_B$

Para diseño se puede tomar $I_C \approx 10 I_B$

$$I_{B(\text{máx})} = I_C / \beta(\text{mín})$$

$$I_C \gg I_{B(\text{máx})}$$

6.2.3. EJERCICIOS RESUELTOS:

Ejercicio 1: Sea $R_{B1} = 40 \text{ [K}\Omega]$, $R_{B2} = 4 \text{ [K}\Omega]$, $R_C = 10 \text{ [K}\Omega]$, $R_E = 1,5 \text{ [K}\Omega]$, $\beta = 140$, $V_{CC} = 22 \text{ [V]}$. Hallar los voltajes y corrientes de polarización.

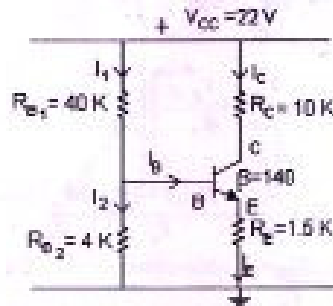


Figura 6.39

$$R_{tecc} = (\beta + 1)R_E = (141) 1,5K = 211 \text{ [K}\Omega]$$

$$R_{tecc} \gg R_{B2}$$

$$\Rightarrow I_2 \gg I_B \text{ y } I_1 \approx I_2$$

$$V_B = (V_{CC} R_{B2}) / (R_{B1} + R_{B2}) = 2,2V \cdot 4K / 44K = 2 \text{ [V]}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} \approx 1 \text{ [V]}$$

Por lo tanto se cumple con los requerimientos de estabilidad térmica

$$I_E = V_E / R_E = 1,3V / 1,5K = 0,86 \text{ [mA]}$$

$$I_C \approx I_E = 0,86 \text{ [mA]}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 22 \text{ [V]} - 10K (0,86\text{mA}) = 13,4 \text{ [V]}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 13,4 - 1,3 = 12,1 \text{ [V]} > V_{CEsat}$$

\Rightarrow El transistor trabaja en la región lineal.

$$\Rightarrow I_B = I_C / \beta = 6,143 \text{ [}\mu\text{A]}$$

Utilizando el Teorema de Thevenin en el VB respecto a la referencia, nos queda:

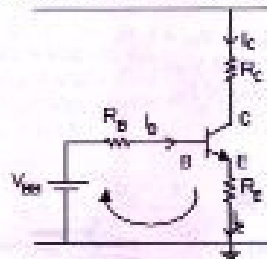


Figura 6.40

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

$$R_B = R_{B1} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$$

$$R_B = 40K \cdot 4K / (40 + 4)K\Omega$$

$$R_B = 3,636 \text{ [K}\Omega]$$

$$V_{th} = V_{CC} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2})$$

$$V_{th} = 2 \text{ [V]}$$

Cálculo de la IB sin aplicar: $I_B = I_C / \beta$

$$\begin{aligned}
 -V_{BE} + I_B R_B + V_{BE} + I_C R_C &= 0 \\
 -V_{BE} + I_B R_B + V_{BE} + (\beta + 1) I_B R_C &= 0 \\
 I_B = (V_{BE} - V_{BE}) / [R_B + (\beta + 1)R_C] \\
 &= (2 - 0,7) / (3,636K + (141)1,5K) \\
 &= 6,042 \mu A \\
 I_C = \beta I_B = 140 (6,0442 \mu A) &= 0,884 \text{ [mA]} \\
 V_C = V_{CC} - I_C R_C = 22 - 0,84 \text{ [mA]} (10 \text{ K}) &= 13,8 \text{ [V]} \\
 V_E = I_B R_E = 1,26 \text{ [V]} \\
 V_{CE} = V_C - V_E = 12,3 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$

Ejercicio 2 : Dado un transistor con un $\beta=50$, $R_{B1}=15 \text{ K}\Omega$, $R_{B2} = 6,8 \text{ K}\Omega$, $R_E = 56 \Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 16 \text{ V}$. Hallar las corrientes de polarización.

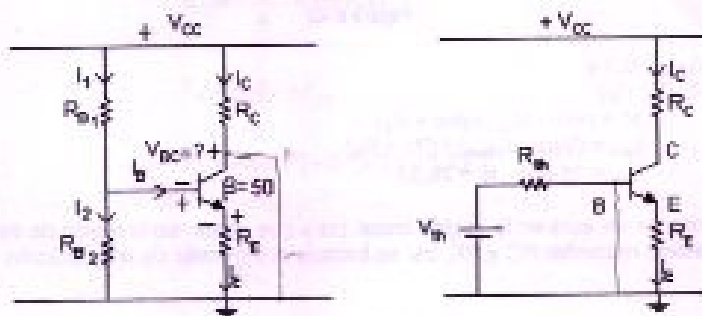


Figura 6.41

$$\begin{aligned}
 R_{TH} &= R_{B1} // R_{B2} \\
 R_{TH} &= 4,68 \text{ K} \\
 V_{TH} &= V_{CC} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2}) \\
 V_{TH} &= 4,99 \text{ [V]} \\
 I_B &= (V_{TH} - V_{BE}) / (R_{TH} + (\beta + 1)R_C) = 50 * 0,57 \text{ mA} = 28,53 \text{ [mA]} \quad 0,57 \text{ mA} \\
 I_C &= \beta I_B = 50 (0,57 \text{ mA}) = 28,53 \text{ [mA]} \\
 I_E &= I_C + I_B = 29,1 \text{ [mA]} \\
 V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E \\
 V_{CE} &= 16 - 28,56 \text{ mA} (1,056 \text{ K}) = -14,2 \text{ [V]} \\
 -V_{CC} - V_{BE} - V_{CE} &= 0 \\
 V_{CE} &= -V_{CE} - V_{BE} = 14,12 - 0,7 = 13,42 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$

El circuito no está en la región lineal porque este debe cumplir:

$$\begin{aligned}
 V_{CC} &> V_{CE(saturación)} \\
 I_C &< I_{C(saturación)}
 \end{aligned}$$

$$V_{CE} = -V_{CE} - V_{BE} + V_{CC}$$

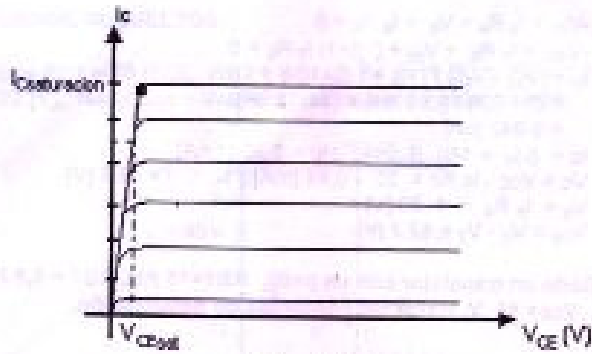


Figura 6.42

Si $V_{ce} = V_{CEsat} = 0,3 \text{ V}$
 $V_{ce} = V_{cc} - I_c (R_c + R_e)$
 $\Rightarrow I_c = (V_{cc} - V_{ce}) / (R_c + R_e)$
 $I_{csat} = (V_{cc} - V_{CEsat}) / (R_c + R_e)$
 $I_{csat} = 14,86 > I_c = 28,53$

\Rightarrow El transistor no está en la región lineal, para que entre en la región de trabajo se hace necesario rediseñar R_c y R_e , así se sacaría al transistor de la saturación.

$$R_c + R_e > (V_{cc} - V_{CEsat}) / I_{csat}$$

Ejercicio 3 : Dado un circuito de polarización con $V_{cc} = -24 \text{ V}$, $R_c = 3,9 \text{ K}\Omega$, se requiere que el punto de trabajo presente una $I_{CQ} = 4 \text{ mA}$, $V_{CEQ} = -6 \text{ V}$ y un $\beta = 100$ para un transistor P.N.P de silicio.

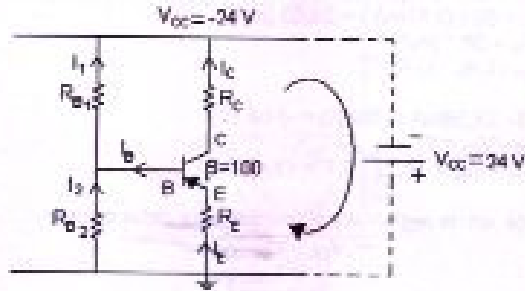


Figura 6.43

$$V_{CE} = I_E R_E + V_{CE} + I_C R_C$$

$$V_E = V_{CE} + V_{CE} + I_C R_C = 24 + (-6) - 4[mA](3.9K)$$

$$V_E = -24[V]$$

$$I_E = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4[mA]}{100} = 4 \times 10^{-5}[A]$$

$$R_E = \frac{2.4K}{4} = 600[\Omega]$$

$$V_E = I_E R_E + V_{E2}$$

$$V_E = -2.4[V] - 0.7[V] = -3.1[V]$$

$$I_2 = \frac{V_E}{R_{E2}} \Rightarrow I_2 \gg I_E$$

$$I_2 \approx 10I_E$$

$$I_2 = 10(4 \times 10^{-5}) = 0.4[mA]$$

$$I_1 = 0.4 + 0.04[mA] = 0.44[mA]$$

$$R_{E2} = \frac{V_E}{I_2}$$

$$R_{E2} = \frac{3.1[V]}{0.4[mA]} = 7.75[K\Omega]$$

$$R_m = \frac{(V_{CE} - V_E)}{I_1}$$

$$R_m = \frac{(-24 + 3.1)}{-0.44[mA]} = 47.5[K\Omega]$$

Ejercicio 4 :

Determinar los voltajes y corrientes de polarización si $V_{CC} = 20\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CEQ} = 8\text{ V}$, $\beta_{min} = 80$.

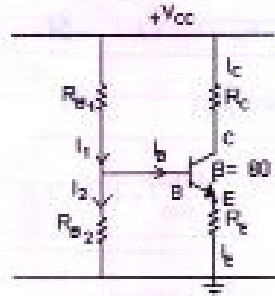


Figura 8.44

Se puede asumir $V_{RE} = V_{CC} / 5 = V_{CC} / 10$, pero siempre que $V_{RE} > 1\text{ V}$.
Sea

$$V_E = 2[V]$$

$$R_E = \frac{2[V]}{10[mA]} = 200[\Omega]$$

$$R_C = \frac{(V_{CC} - V_{CE} - V_E)}{I_C}$$

$$R_C = \frac{(20 - 8 - 2)}{10[mA]} = \frac{10}{10[mA]} = 10[K\Omega] = 1K\Omega$$

$$V_B = V_{CE} + V_E = 0.7 + 2 = 2.7[V]$$

$$I_{Bmin} = \frac{I_C}{\beta_{min}} = \frac{10[mA]}{80} = 0.125[mA]$$

$$I_2 \gg I_B : I_2 = 10I_B = 1.25[mA]$$

$$I_1 = 1.25 + 0.125 = 1.375[mA]$$

$$R_{B1} = \frac{2.7}{1.25} = 2.16[K\Omega]$$

$$R_{B2} = \frac{(V_{CC} - V_B)}{I_1} = \frac{(20 - 2.7)}{1.375} = 12.5[K\Omega]$$

6.3. CIRCUITOS EQUIVALENTES DEL TRANSISTOR, ANALISIS AC

6.3.1. PARAMETROS [Y]

El circuito equivalente del transistor con parámetros [Y], (Admitancias) es el más adecuado cuando se trabaja en altas frecuencias .

- El transistor como cuadripolo :

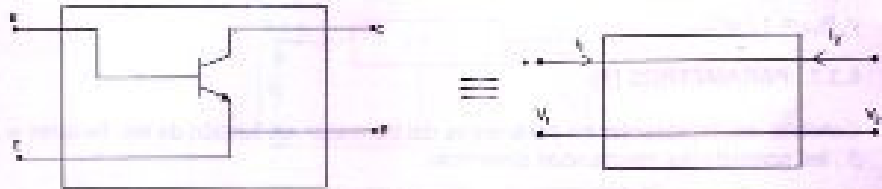


Figura 6.45 Esquema del Transistor como cuadripolo

$$i_1 = f_1 (V_1, V_2)$$

$$i_2 = f_2 (V_1, V_2)$$

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

$$i_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2$$

$$i_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2$$

El circuito equivalente es:

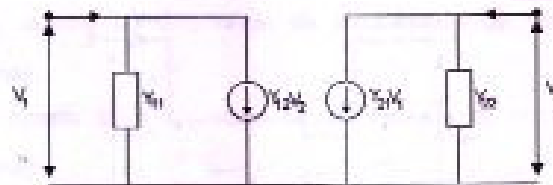


Figura 6.46 Circuito equivalente con parámetros [Y]

Donde: $Y_{11} = \frac{i_1}{V_1}$ cuando $V_2=0$; A. Entrada

$Y_{12} = \frac{i_2}{V_1}$, cuando $V_2 = 0$; A. Transferencia

$Y_{21} = \frac{i_1}{V_2}$, cuando $V_1 = 0$ directa y reversa

$Y_{22} = \frac{i_2}{V_2}$, cuando $V_1 = 0$; A. Salida

Donde: $Y_{res} = G_{res} + jB_{res}$ es la admitancia compleja.

En altas frecuencias se debe considerar las capacidades parásitas del transistor:

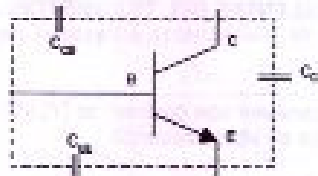


Figura 6.47 Capacitores para altas frecuencias del Transistor

y: $B_{T_{dB}} = 1 / \omega C_{T_{dB}}$

6.3.2. PARAMETROS [T].

Consiste en representar los parámetros del transistor en función de los factores α y β , así como de las resistencias dinámicas.

a) Base Común :

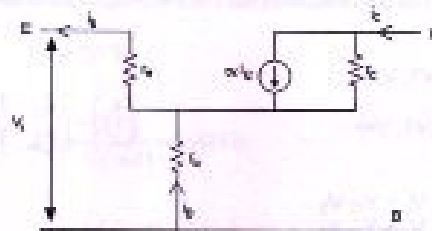


Figura 6.48 Circuito equivalente con parámetros [T] en Base Común

b) Colector Común

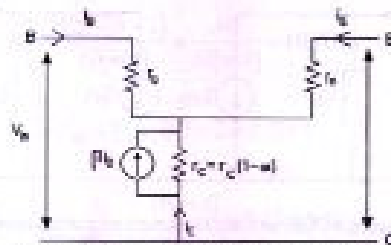


Figura 6.49 Circuito equivalente con parámetros [T] en Colector Común

c) Emisor Común

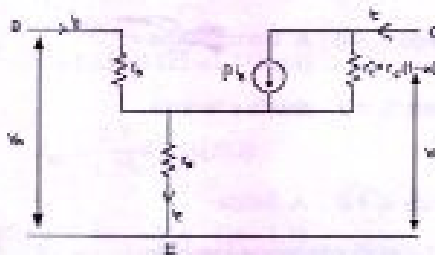


Figura 6.50 Circuito equivalente con parámetros [T] en Emisor Común

- $r_e = 26mV / I_C \Rightarrow$ Resistencia dinámica de la juntura Base-Emitor.
- $r_b \Rightarrow$ Del orden de las decenas de ohmios *Despreciable
- $r_o, r_c \Rightarrow$ Del orden de las decenas y centenas de megas de ohmios
- \Rightarrow Circuito Abierto.

PARAMETROS [H : Híbridos]

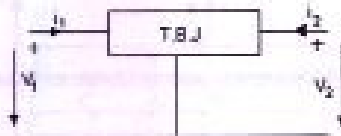


Figura 6.51 TEJ con parámetros [H]

$$\begin{aligned} V_1 &= f_1(i_1, V_2) \\ i_2 &= f_2(i_1, V_2) \\ V_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}V_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}V_2 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_2 \end{pmatrix}$$

- $h_{11} = \frac{V_1}{i_1}$, cuando $V_2 = 0$; impedancia de entrada en ohmios [Ω].
- $h_{12} = \frac{V_1}{V_2}$, cuando $i_1 = 0$; razón de transferencia de voltaje INVERSO, (Adimensional).
- $h_{21} = \frac{i_2}{i_1}$, cuando $V_2 = 0$; razón de transferencia de corriente DIRECTA, (Adimensional).
- $h_{22} = \frac{i_2}{V_2}$, cuando $i_1 = 0$; admitancia de salida en ohmios.

6.3.3.1. CIRCUITOS EQUIVALENTES HÍBRIDOS

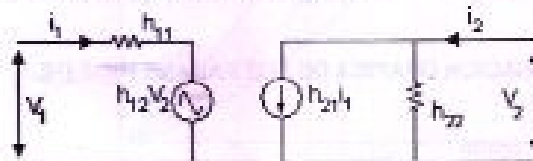


Figura 6.52 Circuito equivalente híbrido

- $h_{11} = h_i$: Resistencia de entrada (input)
- $h_{12} = h_r$: Transferencia de voltaje (reverso)
- $h_{21} = h_f$: Transferencia de corriente (forward)
- $h_{22} = h_o$: Admitancia de salida (out)

Para N.P.N:

- Base Común

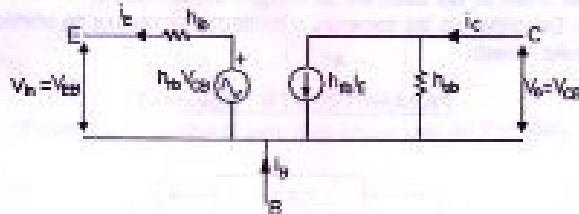


Figura 6.53 Circuito equivalente híbrido en Base Común

- Emisor Común

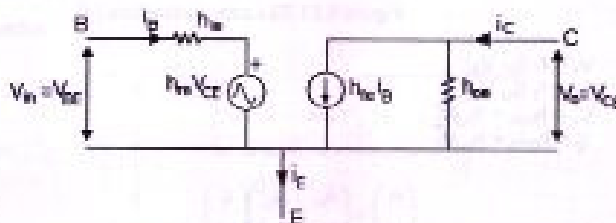


Figura 6.54 Circuito equivalente híbrido en Emisor Común

- Colector Común

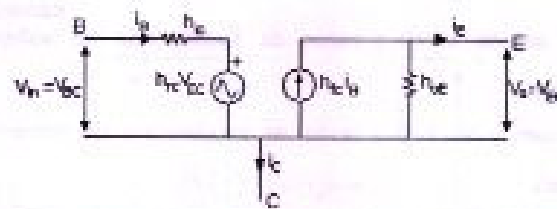


Figura 6.55 Circuito equivalente híbrido en Colector Común

Para un P.N.P las configuraciones son iguales solo hay que cambiar el sentido de las corrientes.

6.3.3.2. DETERMINACION GRAFICA DE LOS PARAMETROS [H].

- Para Emisor Común

$$h_{ie} = \frac{\partial v_1}{\partial i_1} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_b} \approx \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_b}, \quad \text{con } v_{CE} = \text{cte.} \quad (\text{Ecuación 6.32})$$

$$h_{re} = \frac{\partial v_1}{\partial v_2} = \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \approx \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}}, \quad \text{con } i_b = \text{cte.} \quad (\text{Ecuación 6.33})$$

$$hfe = \frac{\partial i_c}{\partial i_b} = \frac{\partial i_c}{\partial i_b} \approx \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b} \quad \text{con } V_{CE} = \text{cte.} \quad \text{(Ecuación 6.34)}$$

$$hoe = \frac{\partial i_c}{\partial v_{CE}} = \frac{\partial i_c}{\partial v_{CE}} \approx \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{CE}} \quad \text{con } i_b = \text{cte.} \quad \text{(Ecuación 6.35)}$$

Para determinar: hfe, hoe

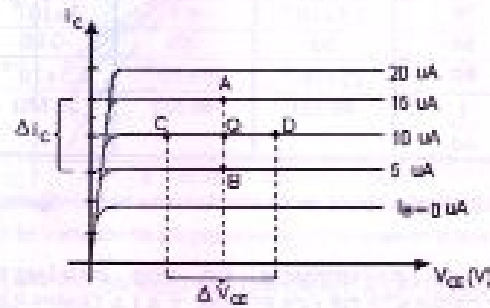


Figura 6.56 Determinación de los hfe y hoe de acuerdo a la característica de salida del Transistor

- i. $hfe = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b}$; $V_{CE} = \text{cte}$ puntos A, B.
- ii. $hoe = \frac{\Delta i_c}{\Delta v_{CE}}$; $i_b = \text{cte}$ puntos C, D.+++

Para determinar : hie, hre

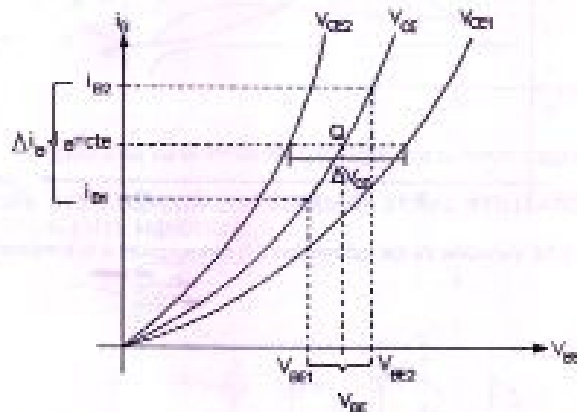


Figura 6.57 Determinación de los hie y hre de acuerdo a la característica de entrada del Transistor

- i. $hie = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_b}$, con $V_{CE} = \text{cte.}$

II. $h_{re} = \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}}$, con $i_B = cte.$

Para un TBJ (De silicio típico).

	E.C	C.C	C.C
h_i	1 K Ω	1 K Ω	20 Ω
h_r	2.5×10^{-4}	≈ 1	3×10^{-4}
h_f	50	-50	-0.98
h_o	25×10^{-6}	25×10^{-6}	0.5×10^{-4}
$\frac{I}{h_o}$	40 K Ω	40 K Ω	20 M Ω

Tabla 6.2: Valores típicos de los híbrido en las tres configuraciones

6.3.3.3.VARIACION O DEPENDENCIA DE LOS PARÁMETROS [H] CON RESPECTO A LA CORRIENTE DE COLECTOR Y A LA TEMPERATURA

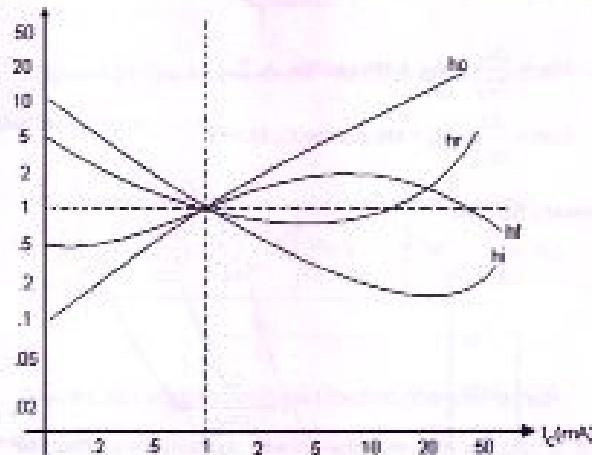


Figura 6.58 Variación de los parámetros [H] con respecto a la temperatura e I_C

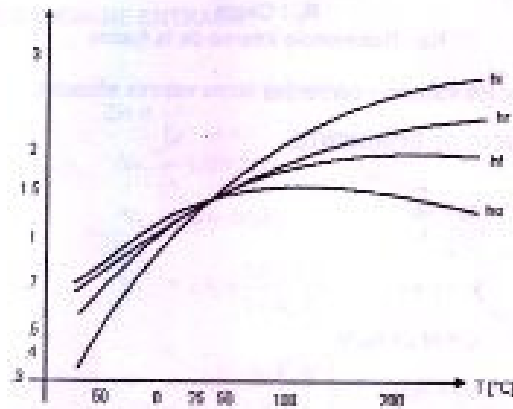


Figura 6.58 Variación de los parámetros [H] de acuerdo a la temperatura

VARIACION DE $h_{fe} = \beta$ CON RESPECTO A LA I_C Y A LA TEMPERATURA.

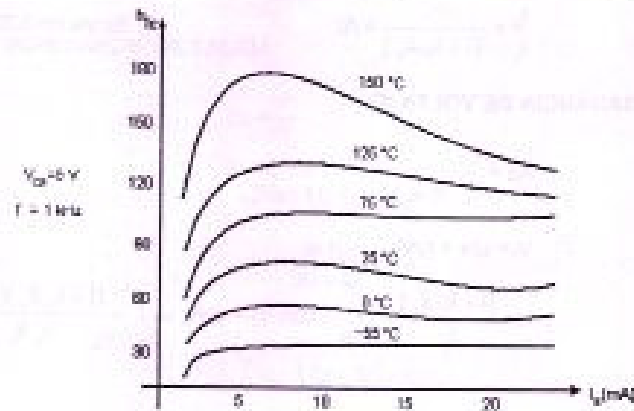


Figura 6.60 Variación de h_{fe} con respecto a la temperatura e I_C

6.3.3.4. ANALISIS DEL T.B.J CON UNA PEQUEÑA SEÑAL UTILIZANDO EL CIRCUITO EQUIVALENTE HIBRIDO H

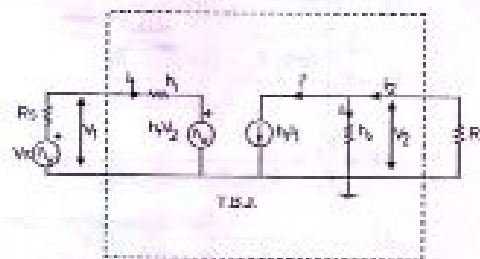


Figura 6.61 Circuito equivalente híbrido para pequeñas señales

R_L : Carga R_s : Resistencia interna de la fuente

Si consideramos a los voltajes y corrientes como valores eficaces.

I. GANANCIA DE CORRIENTE:

$$A_i = \frac{i_2}{i_1}$$

$$i_2 = i + i_c$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o V_2$$

$$V_2 = -i_2 R_L$$

$$i_2 = h_f i_1 - h_o i_2 R_L$$

$$i_2 [1 + h_o R_L] = h_f i_1$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{h_f}{[1 + h_o R_L]} = A_i \quad \text{(Ecuación 6.36)}$$

II. GANANCIA DE VOLTAJE:

$$A_v = \frac{V_2}{V_1}$$

$$V_1 = i_1 h_i + h_r V_2$$

$$i_1 = \frac{[1 + h_o R_L]}{h_f} \quad \text{con } V_2 = -i_2 R_L \Rightarrow i_1 = \frac{(1 + h_o R_L)(-V_2)}{h_f R_L}$$

$$V_1 = \left(\frac{1 + h_o R_L}{h_f} \right) \left(-\frac{V_2}{R_L} \right) h_i + h_r V_2$$

$$V_1 = V_2 \left[h_r - \frac{(1 + h_o R_L) h_i}{h_f R_L} \right]$$

$$V_1 = V_2 \left[\frac{h_r h_f R_L - (1 + h_o R_L) h_i}{h_f R_L} \right]$$

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{h_f R_L}{h_f h_f R_L - h_i h_o h_i R_L}$$

$$A_v = \frac{h_f R_L}{h_i + R_L (h_i h_o - h_r h_f)} \quad \text{(Ecuación 6.37)}$$

iii. IMPEDANCIA DE ENTRADA

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1}$$

$$V_1 = i_1 h_i + h_r v_2$$

$$V_1 = i_1 h_i - h_r i_2 R_L$$

$$V_1 = i_1 h_i - \frac{h_r h_f R_L i_1}{1 + h_o R_L}$$

$$V_1 = i_1 \left[\frac{h_i - h_r R_L h_f}{1 + h_o R_L} \right]$$

$$Z_{in} = h_i \frac{h_i - h_r R_L h_f}{1 + h_o R_L} \quad \text{(Ecuación 6.38)}$$

iv. IMPEDANCIA DE SALIDA

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

Si $V_s = 0$

$$i_1 (R_s + h_i) + h_r V_2 = 0$$

$$i_1 = - \frac{h_r V_2}{R_s + h_i}$$

$$I_2 = \frac{h_f h_r V_2}{(R_s + h_i) + h_o V_2}$$

$$I_2 = V_2 \left[\frac{h_o - h_f h_r}{R_s + h_i} \right]$$

$$Z_o = \frac{1}{h_o - \frac{h_f h_r}{R_s + h_i}} \quad \text{(Ecuación 6.39)}$$

v. GANANCIA DE POTENCIA

$$A_p = \frac{P_2}{P_1}$$

P_L : potencia promedio en la carga.

$$P_1 = -V_1 I_1$$

$$P_i = V_i i_i$$

$$A_p = \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \left(\frac{i_o}{i_i} \right) = A V_i A i$$

$$A_p = \frac{h_f^2}{(1 + h_o R_c) [h_i + (h_i h_o - h_f h_r) R_c]} \quad \text{(Ecuación 6.40)}$$

CONFIGURACION EMISOR COMUN.

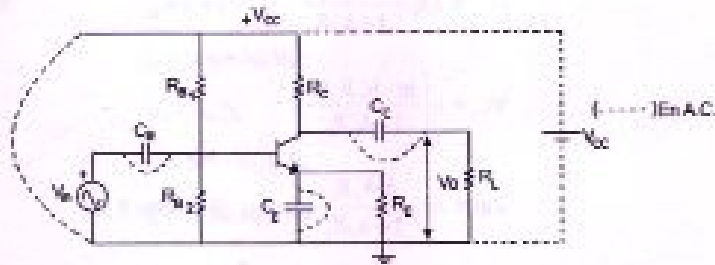


Figura 6.62 Circuito en Emisor Común con sus respectivos capacitores

- C_C : El capacitor de colector es empleado para bloquear la componente continua en la carga R_L , ya que nuestro requerimiento es una señal alterna pura en la carga R_L .

⇒ El CC para AC es un corto circuito.

- C_E : Capacitor de Emisor, permite controlar la ganancia de voltaje, se comporta como un corto circuito para AC y como un circuito abierto para DC.
- C_B : Capacitor de Base, bloquea la componente DC de la fuente V_{cc} que puede estar presente en el generador.

ANÁLISIS UTILIZANDO PARAMETROS [H].

CON CAPACITOR DE EMISOR.-

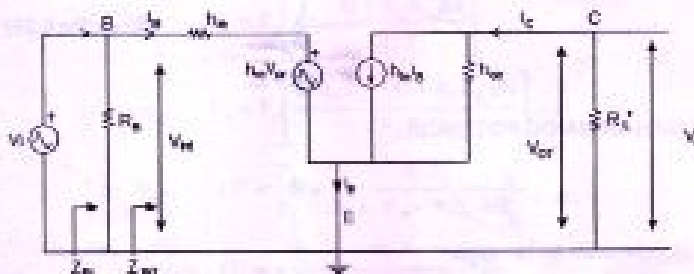


Figura 6.63 Análisis utilizando parámetros [H] con capacitor de emisor

donde: $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$; $R'_L = R_C \parallel R_L$

i. Ganancia de corriente:

$$Ai = \frac{i_{out}}{i_{in}} = \frac{i_c}{i_b}$$

$$i_c = i_b h_{\beta} + h_{re} V_{out}$$

$$V_{out} = V_D - i_c R'_L$$

$$i_c = i_b h_{\beta} - h_{re} i_c R'_L$$

$$i_c (1 + h_{re} R'_L) = i_b h_{\beta}$$

$$Ai = \frac{h_{\beta}}{1 + h_{re} R'_L} \quad \text{(Ecuación 6.41)}$$

ii. Ganancia de voltaje:

$$Av = V_{out} / V_{in}$$

$$V_{out} = i_b h_{ie} + h_{re} V_{out}$$

$$V_{out} = -i_c R'_L$$

$$i_b = i_c (1 + h_{re} R'_L) / h_{ie}$$

$$V_{in} = \frac{i_c h_{ie} (1 + h_{re} R'_L)}{h_{ie}} - h_{re} i_c R'_L$$

$$V_{in} = i_c \left[\frac{h_{ie} (1 + h_{re} R'_L)}{h_{ie}} \right] - h_{re} R'_L$$

$$V_{in} = V_{out} \left[\frac{h_{ie} (1 + h_{re} R'_L) - h_{re} h_{\beta} R'_L}{h_{\beta} R'_L} \right]$$

$$Av = - \frac{R'_L h_{\beta}}{h_{ie} + h_{ie} h_{re} R'_L - h_{re} h_{\beta} R'_L} \quad \text{(Ecuación 6.42)}$$

iii. Impedancia de entrada:

$$Z_{inT} = \frac{V_{in}}{i_{in}} = \frac{V_{in}}{i_b}$$

$$V_{in} = h_{ie} i_b - h_{re} i_c R_L$$

$$i_c = \frac{i_b h_{fe}}{1 + h_{oe} R_L}$$

$$V_{in} = i_b i_b - \frac{h_{re} h_{fe} R_L i_b}{1 + h_{oe} R_L}$$

$$V_{in} = i_b \left[h_{ie} - \frac{h_{re} h_{fe} R_L}{1 + h_{oe} R_L} \right]$$

$$Z_{inT} = h_{ie} - \frac{h_{re} h_{fe} R_L}{1 + h_{oe} R_L} \quad \text{(Ecuación 6.43)}$$

$$Z_{in} = R_B \parallel Z_{inT}$$

(Ecuación 6.44)

iv. Impedancia de salida:

$$Z_{out} = \frac{V_o}{i_c} \quad , \text{ con } V_{in} = 0$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} V_o$$

$$V_{in} = 0 \Rightarrow V_{be} = -h_{re} V_{ce}$$

$$i_b = -h_{re} \frac{V_o}{h_{ie}}$$

$$i_c = \frac{h_{fe} h_{re} V_o}{h_{ie} + h_{oe} V_o}$$

$$i_c = V_o \left[h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie}} \right]$$

(Ecuación 6.45)

$$Z_{out} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{fe} h_{re}}{h_{ie}}}$$

Los parámetros híbridos para la configuración de Emisor Común son aproximadamente del siguiente orden:

h_{fe}	50
h_{ie}	1 K Ω
h_{re}	$2,5 \times 10^{-4}$
h_{oe}	$2,5 \times 10^{-6} \text{ 1}/\Omega$

Tabla 6.3 Parámetros [h] para Emisor Común

Despreciando los parámetros h_{re} y h_{oe} , tenemos:

$$A_i \approx h_{fe}$$

$$A_v \approx -R'_L \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$Z_{inT} \approx h_{ie}$$

$$Z_{oT} \approx 1 / h_{oe}$$

Ejemplo :

Determinar A_i , A_v , Z_{inT} , Z_{oT} ; utilizando los valores de los parámetros híbridos que se muestran .

$$h_{ie} = 1 \text{ K}\Omega$$

$$h_{re} = 2 \times 10^{-4}$$

$$h_{fe} = 50$$

$$h_{oe} = 2,5 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\Omega} \right)$$

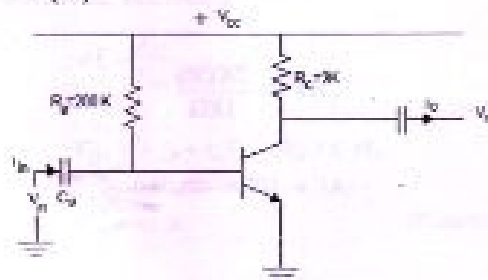


Figura 6.64

$$R'_L = R_L \parallel R_C$$

$$R'_L = 2 \text{ K}\Omega$$

$$A_i = \frac{50}{1 + (2.5 \times 10^{-4})(2K)}$$

$$A_i = 49.75$$

$$A_V = -\frac{(2K)(50)}{1K + [1K(20 \times 10^{-4}) - (2 \times 10^{-4})(50)]2K}$$

$$A_V = -98.04$$

$$Z_{out} = 1K - \frac{2 \times 10^{-4}(50)2K}{1 + 20 \times 10^{-4}(2K)}$$

$$Z_{out} = 980.77[\Omega]$$

$$Z_{out} = \frac{1}{20 \times 10^{-4} - \frac{2 \times 10^{-4}(50)}{1K}}$$

$$Z_{out} = 100[K\Omega]$$

Si empleamos fórmulas aproximadas, tenemos:

$$A_i \approx h_{fe}$$

$$A_i \approx 50 \approx 49.75$$

$$A_V \approx -\frac{R_L h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$A_V \approx -\frac{2K(50)}{1K\Omega}$$

$$A_V \approx -100 \approx -98.04$$

$$Z_{in} \approx h_{ie}$$

$$Z_{in} \approx 1(K\Omega) \approx 980.77(\Omega)$$

$$Z_{out} \approx \frac{1}{h_{oe}}$$

$$Z_{out} \approx \frac{1}{20 \times 10^{-4}}$$

$$Z_{out} \approx 50(K\Omega) \approx 100(K\Omega)$$

Se puede asegurar que la diferencia no es mucha.

b) SIN CAPACITOR DE EMISOR.

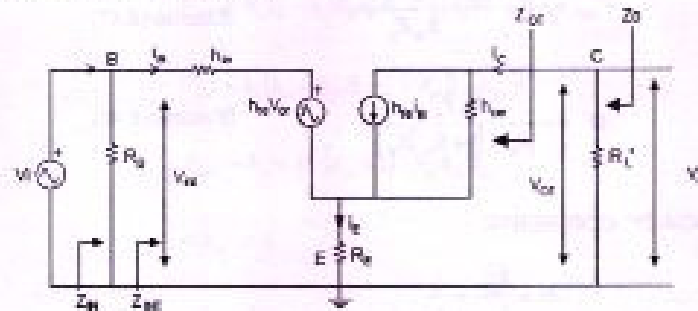


Figura 6.65 Análisis utilizando parámetros [H] sin capacitor de emisor

GANANCIA DE VOLTAJE

$$AV = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$V_{out} = h_{fe} i_b + h_{oe} V_{ce} + (i_b + i_c) R_E$$

$$V_{ce} = -i_c R_L' \tag{Ecuación 6.46}$$

$$i_c = i_b h_{fe} + h_{oe} (V_{ce} - V_{be})$$

Si $h_{oe} \approx 0$
 $h_{fe} \approx 0 \Rightarrow i_c = i_b h_{fe}$

$$V_{ce} = h_e i_b + R_e i_c + i_c R_L$$

$$V_{ce} = -h_e i_b R_L$$

$$V_{ce} = i_b (h_e + R_e) + i_c R_L$$

$$V_{ce} = -\frac{V_{ce} [h_e + R_e]}{h_e R_L} - \frac{V_{ce} R_L}{R_L}$$

$$V_{ce} = -V_{ce} \left[\frac{h_e + R_e}{h_e R_L + R_L} \right]$$

$$V_{ce} = -V_{ce} \frac{(h_e + R_e + R_e h_e)}{h_e R_L} \quad \text{(Ecuación 6.47)}$$

$$AV = -\frac{h_e R_L}{[h_e + (1 + h_e) R_e]} \quad \text{(Ecuación 6.48)}$$

a) GANANCIA DE CORRIENTE.

$$AI = \frac{i_{ce}}{i_b} = \frac{i_c}{i_b}$$

$$i_c = h_e i_b + (V_{ce} - V_{ce}) h_{ce}$$

$$i_c = h_e i_b + (V_{ce} - (i_c + i_b) R_e) h_{ce}$$

$$V_{ce} = -i_c R_L \quad \text{(Ecuación 6.49)}$$

$$i_c = h_e i_b - i_c R_e h_{ce} - i_c R_e h_{ce} - i_b R_e h_{ce}$$

$$i_c (1 + R_e h_{ce} + R_e h_{ce}) = i_b (h_e - R_e h_{ce})$$

$$\frac{i_c}{i_b} = AI = \frac{h_e - R_e h_{ce}}{1 + h_{ce} (R_e + R_e)} \quad \text{(Ecuación 6.50)}$$

Si no ponemos capacitor de emisor CE, la ganancia de voltaje es función de $1/R_C$; si ponemos RE sin un capacitor de emisor se consigue que la ganancia de voltaje sea más pequeña.

Si $h_{oe} \rightarrow 0$, entonces $A_i = h_{fe} = \beta$

b) IMPEDANCIA DE ENTRADA

$$Z_{ENT} = \frac{V_{ENT}}{I_{ENT}} = \frac{V_{ENT}}{I_B}$$

$$V_{ENT} = h_{ie} I_B + h_{re} V_{OUT} + (I_B + I_C) R_E \tag{Ecuación 6.51}$$

$$I_C = h_{\beta} I_B - \beta I_{BQ} \Rightarrow 0$$

$$V_{OUT} = h_{\beta} I_B - h_{re} h_{\beta} I_B R'_E + h_{\beta} I_B R_C + I_B R_C$$

$$V_{ENT} = I_B (h_{ie} - h_{re} h_{\beta} R'_E + R_C (1 + h_{\beta}))$$

$$Z_{ENT} = h_{ie} + R_C (h_{\beta} + 1) - h_{re} h_{\beta} R'_E$$

$$\text{si } h_{re} \rightarrow 0$$

$$Z_{ENT} = \frac{V_{ENT}}{I_B} = h_{ie} + R_C (h_{\beta} + 1)$$

c) IMPEDANCIA DE SALIDA

$$Z_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_O} = \frac{V_{OUT}}{I_C} = \frac{V_{OUT}}{I_C |_{V_{ENT}=0}} \tag{Ecuación 6.52}$$

$$I_B h_{ie} + h_{re} V_{OUT} + (I_B + I_C) R_E = 0$$

$$I_C = h_{\beta} I_B + (V_{OUT} - (I_B + I_C) R_E) h_{re}$$

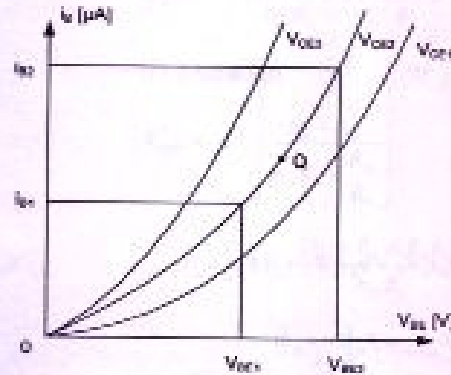
$$\text{si } h_{re} \Rightarrow 0$$

- $I_C = h_{fe} I_B$
- $I_B (h_{ie} + R_E) = - h_{re} V_{OUT} - I_C R_C$
- $I_B (h_{ie} + R_E) = - h_{re} V_{OUT} - h_{fe} I_B R_C$
- $I_B (h_{ie} + R_E + h_{fe} R_C) = h_{re} V_{OUT}$

$$\frac{v_{ov}}{i_c} = \frac{-((h_{ie} + (1 + h_f)R_E))}{h_{fe}}$$

$$\frac{v_{ov}}{i_c} = \frac{-((h_{ie} + (1 + h_f)R_E))}{h_{fe}h_{fe}} = Z_{ov} \quad \text{(Ecuación 6.53)}$$

6.3.3.5 RELACION ENTRE h_{ie} Y r_e



$$V_{ce} = h_{ie} I_b + h_{re} V_{ce}$$

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} V_{ce}$$

$$h_{ie} = \Delta V_{ce} / \Delta I_b | V_{ce} = cte$$

$$r_e = \Delta V_{be} / \Delta I_b = 26 \text{ mV} / I_b = h_{ie}$$

$$I_c = (\beta + 1) I_b$$

$$h_{ie} = 26 \text{ mV} (\beta + 1) / I_c$$

$$h_{ie} = r_e (\beta + 1)$$

Figura 6.56 Relación de I_b y V_{ce} de h_{ie}

6.3.3.6 EXPRESIONES DE GANANCIA DE CORRIENTE Y VOLTAJE USANDO PARAMETROS [T] DEL TRANSISTOR.

Considerando que:

$$r_c \rightarrow \infty \text{ y } r_b \approx 0$$

a) Circuito equivalente en emisor común.

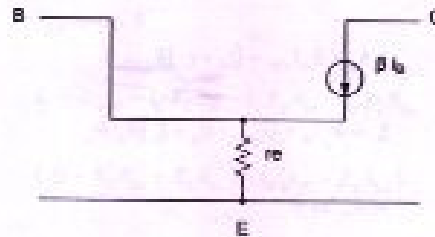


Figura 6.67 Circuito equivalente con parámetros [T] para la ganancia de voltaje y corriente

a1) Análisis con C_E

$$A_i = h_{fe}$$

$$A_i = \beta$$

$$A_v = -h_{fe} R_L' / h_{ie}$$

$$A_v = \beta R_L' / (\beta + 1) r_e$$

$$A_v = R_L' / r_e (\beta = \beta + 1)$$

$$Z_{ENT} = h_{ie} \parallel (\beta + 1) r_e$$

$$Z_{IN} = R_B \parallel Z_{ENT} \quad \text{(Ecuación 6.54)}$$

$$Z_{OT} > 1 / h_{oe} \quad \text{(Ecuación 6.55)}$$

Z_{OT} es una impedancia bastante alta

$$Z_O = Z_{OT} \parallel R_L'$$

Si $Z_{OT} \gg R_L' \rightarrow Z_O = R_L'$

a2) Análisis sin C_E

$$A_i = h_{fe} = \beta$$

$$A_v = -h_{fe} R_L' / (h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_E), h_{fe} = \beta$$

Si $\beta = \beta + 1$

$$A_v = -R_L' / (r_e + R_E)$$

$$Z_{ENT} = h_{ie} + (h_{fe} + 1) R_E$$

$$Z_{ENT} = (\beta + 1) r_e + (\beta + 1) R_E$$

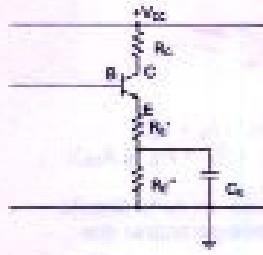
$$Z_{ENT} = (\beta + 1) (r_e + R_E)$$

$$Z_{IN} = Z_{ENT} \parallel R_B$$

$$Z_{OT} > 1 / h_{oe}$$

$$Z_O = Z_{OT} \parallel R_L'$$

En este caso la A_v es una función inversa de la $r_e = V_T / I_E$ que depende de la temperatura ; para corregir esto algunas veces se añade una R_E' , pero se disminuye la ganancia.



Para DC $R_E = R_E' + R_E''$
 Para AC $R_E = R_E'$
 $A_v = -R_L' / (r_e + R_E')$
 $Z_{ENT} = (\beta + 1)(r_e + R_E')$

Figura 6.68

6.3.3.7. CALCULO DE LOS CAPACITORES

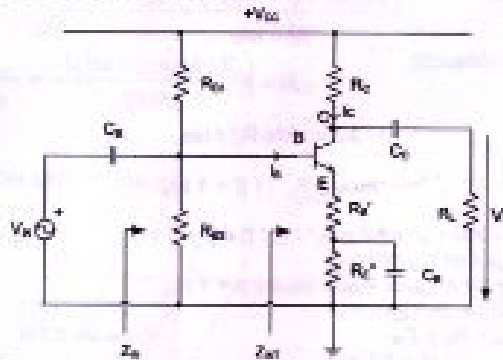


Figure 6.69 Circuito en configuración Emisor Común per el cálculo de los capacitores

Ca:

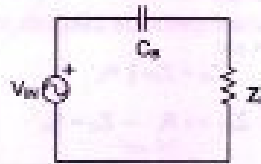


Figura 6.70

$X_{Cb} \ll Z_{th}$ el cálculo se lo realiza a la mínima frecuencia de trabajo. El capacitor de base tiene que ser un corto circuito para alterna por lo tanto tiene que representar una impedancia muy pequeña con respecto a la Z_{th} .

$$Z_{th} = Z_{INT} \parallel R_b$$

$$R_b = R_{b1} \parallel R_{b2}$$

$$X_{Cb} = 1 / \omega C_b \approx Z_{th} / 10$$

$$C_b \approx 10 / \omega Z_{th} \quad \text{(Ecuación 6.56)}$$

C_c se coloca para bloquear la DC y deje pasar la componente AC en la carga R_L , para que ocurra esto se debe cumplir que :

$$X_{Cc} \ll R_L$$

$$1 / \omega C_c \ll R_L$$

$$1 / \omega C_c \approx R_L / 10$$

$$C_c \approx 10 / \omega R_L \quad \text{(Ecuación 6.57)}$$

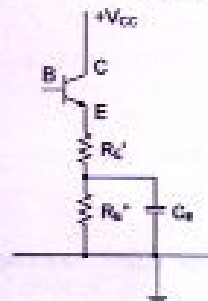


Figura 6.71

$$A_v = - R_L' / (r_e + R_E)$$

$$A_v = - R_L' / (r_e + R_E' + R_E \parallel X_{Ce})$$

Para que C_E sea un corto circuito Para AC se debe garantizar que :

$$R_E'' \parallel X_{CE} = X_{CE}$$

$$X_{CE} \ll R_E''$$

$$A_v = -R_L' / (r_e + R_E' + X_{CE})$$

La ganancia de voltaje debe ser independiente de XCE

$$X_{CE} \ll R_E''$$

$$A_v = -R_L' / (r_e + R_E')$$

debido a que por lo general $R_E' < R_E''$, se sugiere que se cumpla solamente la segunda condición.

$$C_E \geq 10 / (\omega (R_E' + r_e)) \quad \text{(Ecuación 6.58)}$$

En el caso de usar únicamente una sola resistencia de emisor se procede idénticamente.

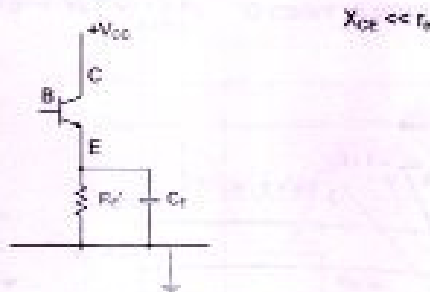


Figura 6.72

Todas estas expresiones deben calcularse para la frecuencia mínima de trabajo.

6.4. RECTAS DE CARGA DINÁMICAS Y ESTÁTICAS PARA EMISOR COMUN

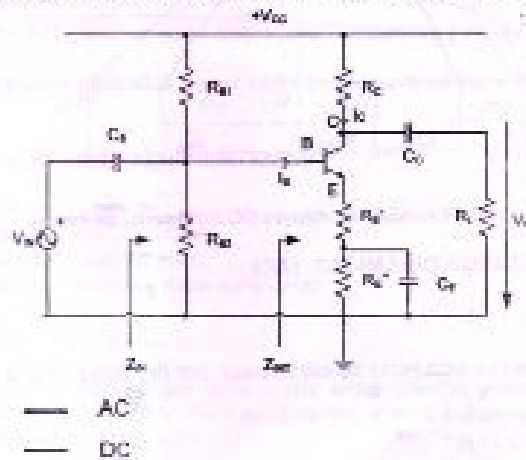


Figura 6.73 Circuito polarizado y alimentado con fuente de AC

6.4.1. ANALISIS PARA DC

$$V_{CC} = I_C R_C + V_C \quad (\text{Ecuación 6.59})$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C}$$

Recta de carga estática (DC) para colector (1) (punto de trabajo Q).
 $m = -1 / R_C < 0$.

$$R_C = R_C' + R_C'' \quad V_E = I_E R_E \quad m = -1 / R_C > 0$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E' + R_E''} \quad (\text{Ecuación 6.60})$$

Recta de carga estática para emisor (2), punto de trabajo Q'

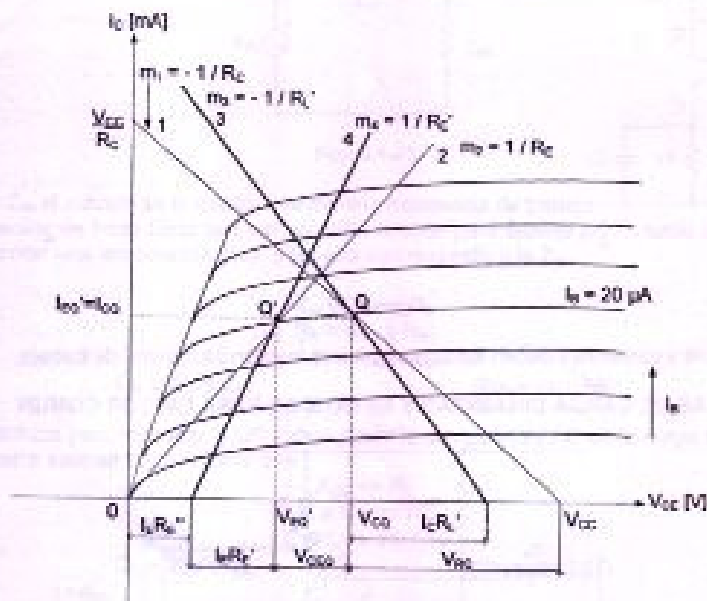


Figura 6.74 Análisis de voltajes DC en el punto de trabajo

6.4.1. RECTAS DE CARGA DINAMICAS (AC)

$$I_C = (-V_C / R_C') + b$$

Además conocemos que esta recta de carga pasa por (I_C, V_C) punto Q.

$$I_C = (-V_C / R_C') + b$$

$$b = (I_C R_C' + V_C) / R_C'$$

$$i_c = -\frac{V_c}{R_c'} + \frac{I_E R_E' + V_c}{R_E'}$$

(3)

$$m = -1 / R_L$$

$$\text{Si } i_c = 0 \rightarrow V_c = i_c R_c' + V_c$$

$$R_c' = R_c \parallel R_L$$

$$R_c' < R_c \rightarrow i_c R_c' < i_c R_c$$

$$i_b = (V_c / R_c') + b$$

Además el punto Q (I_E, V_E) es solución de la recta de carga dinámica.

$$i_c = (V_c / R_c') + b$$

$$b = (I_E R_E' - V_E) / R_E$$

$$i_c = \frac{V_c}{R_c'} + \frac{I_E R_E' - V_E}{R_E'} \quad (\text{Ecuación 6.61})$$

(4)

$$i_b = 0 \rightarrow V_c = V_E - I_E R_E'$$

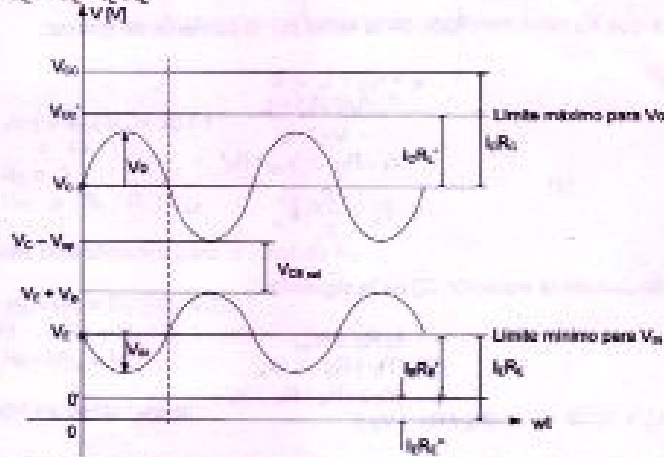


Figura 6.75 Condiciones de diseño para Transistor en Emisor Común

Este análisis sirve para garantizar que la señal amplificada no sufra recortes, ni distorsiones.

Se producen recortes por las siguientes razones:

1. Si V_{in} supera $0'$
2. Si V_o es mayor que V_{cc}'
3. Si existe intersección entre 1 y 2

Para que no existan recortes se debe considerar:

$$V_{CE} = V_{CE} + V_{E} + V_{CE sat}$$

El $V_{CE sat}$ es el voltaje mínimo que debe existir entre colector y emisor para que no exista distorsión, $V_{CE sat min} = 0.3 \text{ V}$. Para asegurarnos que no exista recorte ni distorsión del transistor tomaremos $V_{CE sat} = 2 \text{ V}$.

$$I_C > I_{EQ}$$

Ahora bien para garantizar que el transistor no llegue a la región de corte ($i_c = 0$).

$$\begin{aligned}
 i_c &= i_{c0} + i_c \geq 0 \\
 i_{c0} - i_{cp} &\geq 0 \\
 i_{c0} &\geq i_{cp} \\
 V_{cc} / R_C &\geq V_{cp} / R_C
 \end{aligned}$$

[1]

$$V_{cc} \geq \frac{R_C}{R_C'} V_o$$

Esta ecuación nos garantiza que no exista distorsión debido a la corriente de colector. Otra forma de obtener la ecuación [1] es la siguiente :

$$\begin{aligned}
 i_c R_C' &\geq V_{cp} \\
 (V_{cc} / R_C) R_C' &\geq V_{cp} \\
 V_{cc} &\geq (R_C / R_C') V_{cp}
 \end{aligned}$$

Análisis para que no haya distorsión de la señal por la corriente de emisor:

$$\begin{aligned}
 i_e &= i_{e0} + i_e \geq 0 \\
 i_{e0} - i_{ep} &\geq 0 \\
 i_{e0} &\geq i_{ep} \\
 V_e / R_E &\geq V_{ep} / R_E' \\
 V_e &\geq \frac{R_E}{R_E'} V_{ep}
 \end{aligned}$$

[2]

Otra forma de deducir la ecuación [2] es la siguiente :

$$\begin{aligned}
 i_e R_E' &\geq V_{ep} \\
 (V_e / R_E) R_E' &\geq V_{ep} \\
 V_e &\geq (R_E / R_E') V_{ep}
 \end{aligned}$$

Para AC $V_e = V_i \rightarrow V_e \geq (R_E / R_E') V_{ep}$

Para diseñar el valor de la fuente se tendría lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 V_{cc} &= V_E + V_{CE} + V_{EC} \\
 V_{cc1} &\geq V_E + V_{CE} + V_E + V_{CE_{sat}} + V_{EC} \\
 V_{cc} &= 1.1 V_{cc1} \text{ para propósitos de diseño.}
 \end{aligned}$$

EJEMPLO 1:

Diseñar un amplificador en emisor común que disponiendo de una señal de entrada de $1 V_p$, a la salida se tenga $10 V_p$, la carga deberá ser de $1 [K\Omega]$, si se trabaja con un TBJ tipo NPN con $\beta_{min} = 50$, $\beta_{yp} = 100$, la frecuencia mínima de trabajo es $1KHz$ y la máxima $20KHz$.

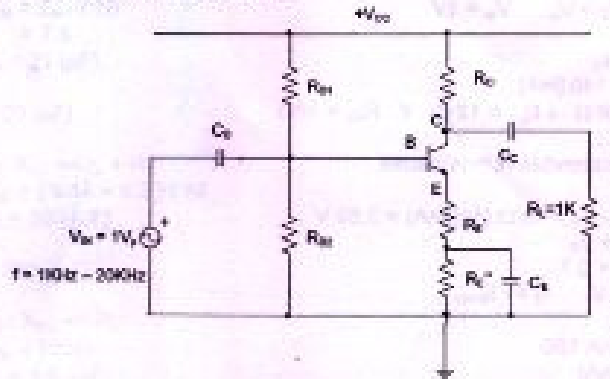


Figura 8.76

$$|Av| = V_o / V_{in} = 10 / 1$$

$$= 10$$

$$R_C = ?$$

$$V_{RC} \geq (R_C / R_L') V_{op}$$

Existen tres posibilidades para el valor de R_C

- a) $R_C \ll R_L \rightarrow R_L' = R_C \parallel R_L = R_C$
- b) $R_C = R_L \rightarrow R_L' = R_C / 2$
- c) $R_C \gg R_L \rightarrow R_L' = R_L$

La solución es verdadera si :

$$R_C / R_L' \geq 1$$

$$R_C \geq R_L'$$

$$R_L' = R_C \text{ de a)}$$

$$R_C \ll R_L$$

Con esta última condición se consigue que V_{CC} baja y que la I_C sea la más grande posible.

$$R_C = R_L / 10$$

$$R_C = 1 [K\Omega] / 10$$

$$= 100 [\Omega]$$

$$V_{RC} \geq (R_C / R_L') V_{op}$$

$$V_{RC} \geq ((100 / 100 \parallel 1[K\Omega]) / 10 = 11 [V]$$

Si consideramos una tolerancia del 20%

$$V_{RC} = 1.2 (11) = 13.2 [V]$$

$$= 14 V$$

$$I_C = V_{RC} / R_C$$

$$I_C = 14 / 100 = 140 \text{ [mA]}$$

→ el transistor debe tener un $I_{C\text{max}} > 140 \text{ [mA]}$

$$V_E > 1V$$

Sea $V_E = 2V$ y $V_E > V_{BE}$, $V_{BE} = 1V$

$$\begin{aligned} R_E &= V_E / I_C \\ &= 2V / 140 \text{ [mA]} \\ &= 14.28 \Omega \rightarrow R_{E1} = 12 \Omega \text{ Y } R_{E2} = 18 \Omega \end{aligned}$$

R_{E1} y R_{E2} son resistencias normalizadas.

Sea $R_E = 18 \Omega \rightarrow V_E = 18 \Omega (140\text{mA}) = 2.52 \text{ V}$

$$\begin{aligned} V_{BE} &= V_{BE} + V_E \\ &= 2.52 + 0.7 \\ &= 3.22 \text{ V} \quad I_2 \gg I_{B\text{max}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{B\text{max}} &= I_C / \beta_{\text{min}} \\ &= 140 \text{ mA} / 50 \\ &= 2.8 \text{ [mA]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 &= 10 I_B = 28 \text{ [mA]} \\ R_{B2} &= 3.22 \text{ V} / 28 \text{ [mA]} \end{aligned}$$

$R_{B2} = 115 \Omega \rightarrow R_{B21} = 100 \Omega \text{ Y } R_{B22} = 120 \Omega$

Sea $R_B = 100 \Omega$ ya que de esta forma logro que $I_2 \gg I_B$

$$\begin{aligned} R_{B1} &= (V_{CC} - V_E) / (I_2 + I_{B\text{max}}) \\ &= (36 - 3.22) / (28\text{mA} + 2.8\text{mA}) \\ &= 10004.2 \Omega \rightarrow R_{B11} = 1K \text{ Y } R_{B12} = 1.2K \Omega \end{aligned}$$

Sea $R_{B1} = 1 \text{ K} \rightarrow I_1 \uparrow$ e $I_2 \uparrow \rightarrow I_B$ es mas despreciable.

Cálculo de R_E

$$A_v = -R_C' / (r_e + R_E')$$

$$r_e = 26 \text{ mV} / 140 \text{ mA} = 0.18 \Omega$$

$$R_E' = (R_C' / A_v) - r_e$$

$$R_C' = 1K // 100 \Omega$$

$$= 90.9 \Omega$$

$$R_E' = (90.9 / 10) - 0.18$$

$$= 8.91 \Omega \rightarrow R_E'1 = 8.2 \Omega \text{ Y } R_E'2 = 10 \Omega$$

Sea $R_E' = 8.2 \Omega$

$$R_C'' = R_C - R_E'$$

$$= 18 - 8.2 = 10 \Omega$$

Comprobación: $V_E > (R_E / R_E') V_{BE}$
 $> (18 / 8.2) 1V = 2.2 \text{ [V]}$

Cálculo de la fuente V_{CC}

$$V_{CC1} \geq I_C R_C + V_{CE} + V_{BE} + V_{CC\text{sat}} + V_C$$

$$V_{CC} = 34.7 \text{ [V]}$$

Cálculo de los condensadores.

$$C_B : X_{CB} \ll Z_{ENT} \parallel R_B$$

$$Z_{ENT} = 51 (8.2 + 0.18)$$

$$= 427$$

$$Z_{IN} = 90.9 \parallel 427 = 75 \Omega$$

$$X_{CB} = Z_{IN} / 10$$

$$= 7.5$$

$$C_B = 21 \mu F$$

Sea $C_B = 22 \mu F$

$$C_E : X_{CE} \ll r_e + R_E'$$

$$X_{CE} = (0.18 + 8.2) / 10$$

$$C_E = 190 \mu F$$

Sea $C_E = 220 \mu F$

$$C_C : X_{CC} \ll R_C$$

$$X_{CC} = 100 \Omega$$

$$C_C = 1.6 \mu F$$

Sea $C_C = 2.2 \mu F$

EJEMPLO 2:

Diseñar un amplificador en emisor común las siguientes características.

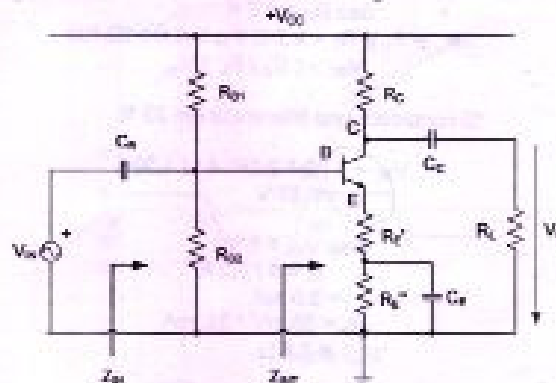


Figura 6.77

- $Z_{IN} = 1 [K\Omega]$
- $V_{IN} = 0.1 V_p$
- $|A_v| = 40$
- $\beta_{TIN} = 50$
- $f_{min} = 1 \text{ KHz}$
- $R_L = 3.3 [K\Omega]$

$$Z_{IN} = R_B \parallel Z_{ENT}$$

Si $R_B \gg Z_{ENT}$

$$Z_{IN} \approx Z_{ENT} = (\beta + 1) (r_e + R_E')$$

$$Z_{ENT} \geq 1K\Omega$$

$$Z_{ENTmin} = 1 K\Omega$$

$$r_e + R_{Emin}' = Z_{ENTmin} / (\beta + 1)$$

$$= 1\text{K} / 51$$

$$= 22 \Omega$$

$$A_v = -R_L' / (R_E' + r_e)$$

$$r_e + R_E' = R_L' / A_v$$

$$R_L' = R_L \parallel R_C$$

$$r_e + R_{E\text{min}} = R_L / A_v \quad | \quad R_C \text{ abierto o muy grande}$$

$$= 3.3 \text{K} / 40$$

$$= 82.5 \Omega$$

$$22 < r_e + R_E' < 82.5$$

Si $Z_{\text{ENT}} > 1\text{K} \rightarrow r_e + R_E' = 30 \Omega$

$$A_v = -R_L' / (r_e + R_E')$$

$$R_L' = |A_v| (r_e + R_E')$$

$$= 40 (30 \Omega)$$

= 1.2 K (de no encontrarse normalizado tomamos el valor mas alto de la resistencia normalizada)

$$R_L' = R_L R_C / (R_L + R_C)$$

$$R_C = R_L' R_L / (R_L - R_L')$$

$$R_C = 1.2 \text{K} (3.3 \text{K}) / (3.3 \text{K} - 1.2 \text{K})$$

$$= 1.88 \text{K} \Omega \rightarrow R_{C1} = 1.8 \text{K} \Omega \text{ Y } R_{C2} = 2.2 \text{K} \Omega$$

Sea $R_C = 2.2 \text{K}$

$$R_L' = R_L \parallel R_C = 2.2 \text{K} \parallel 3.3 \text{K} = 1.32 \text{K} \Omega$$

$$V_{\text{RC}} \geq (R_C / R_L') V_{\text{ap}}$$

Si considero una tolerancia del 20 %

$$V_{\text{RC}} = (1.2 * 2.2\text{K} * 4) / 1.32\text{K}$$

$$= 6.67 \text{V}$$

Sea $V_{\text{RC}} = 8 \text{V}$

$$I_C = 8 / 2.2 \text{K}$$

$$= 3.6 \text{mA}$$

$$r_e = 26 \text{mV} / 3.6 \text{mA}$$

$$= 7.2 \Omega$$

$$r_e + R_E' = 30 \Omega$$

$$R_E' = 30 - 7.2 = 22.8 \Omega$$

Sea $R_E' = 22 \Omega$

$$Z_{\text{ENT}} = (\beta + 1) (r_e + R_E')$$

$$= 51 (22 + 7.2)$$

$$= 1.48 \text{K} \Omega$$

$$Z_{\text{IN}} = R_B \parallel Z_{\text{ENT}} = 1\text{K} \Omega$$

$$R_B = 3.083 \Omega$$

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

Puesto que se requiere que R_B sea muy grande se maximiza R_{B1} , es decir

$R_{B1} = R_{B2} = 2 R_B = 6.16 \text{ K}\Omega$

$R_{B1} = 5.6 \text{ K}\Omega$ y $R_{B2} = 6.8 \text{ K}\Omega$, tomamos el más alto valor de R_B para cumplir con Z_{ENT} .

Sea $R_{B1} = R_{B2} = 6.8 \text{ K}$
 $V_B = V_{CC} / 2$

$V_E = (V_{CC} / 2) - 0.7$

$V_{CC} \geq 1.2 (V_B + V_D + V_{CEsat} + V_{CE} + V_{RC})$

$V_{CC} = 1.2 (V_{CC} / 2 - 0.7 + 0.1 + 2 + 4 + 8)$

$V_{CC} = 32.16 \text{ V}$

$V_B = 16.5 \text{ V}$

$V_E = 15.8 \text{ V}$

$R_C = V_C / I_C = 15.8 \text{ V} / 3.6 \text{ mA} = 4.4 \text{ K}\Omega$

$R_E^* = R_E - R_E'$

$= 4.4 \text{ K} - 22 \Omega = 4.4 \text{ K}$

$R_{E1}^* = 4.3 \text{ K}$ y $R_{E2}^* = 3.9 \text{ K}$

Sea $R_E^* = 4.3 \text{ K}\Omega$

EJEMPLO 3:

Diseñar un amplificador en emisor común tal que $V_{in} = 1 \text{ V}_{p-p}$, $|A_v| = 30$, $R_L = 4.7 \text{ K}\Omega$, $\beta_{trans} = 60$, $f_{trans} = 1 \text{ KHz}$ y que permita obtener a la salida una onda como la siguiente.

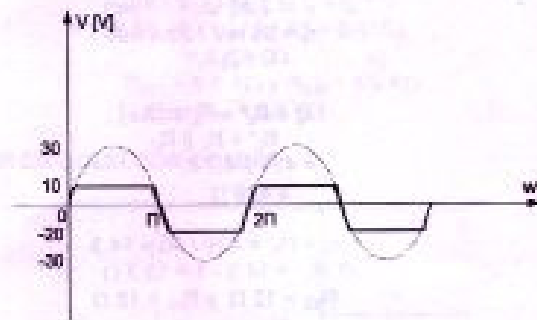


Figura 6.78

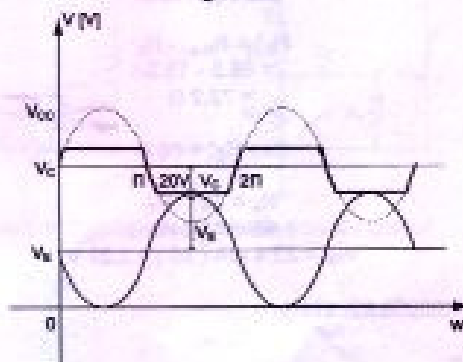


Figura 6.79

$$R_L' = R_L \parallel R_C \approx R_C$$

$$R_C \ll R_L \rightarrow R_C = 470 \Omega$$

Para el recorte de arriba

$$V_{RC} \geq (R_C / R_L') V_{ce}$$

$$0 \leq X \leq \pi \rightarrow V_{ce} = 10 \text{ V}$$

$$V_{RC} \geq (470 / 470 \parallel 4.7 \text{ K}) 10 = 11 \text{ V con esto aseguramos el recorte por arriba de la onda de salida.}$$

$$I_C = V_{RC} / 470$$

$$= 11 \text{ V} / 470$$

$$= 23.4 \text{ mA}$$

Para el recorte de abajo.

$$\text{Sea } V_E = 2 \text{ V}$$

$$R_E = V_E / I_E$$

$$= 2 \text{ V} / 23.4 \text{ mA}$$

$$= 85.5 \Omega \rightarrow R_{E1} = 82 \Omega \text{ y } R_{E2} = 91 \Omega$$

$$\text{Sea } R_E = 91 \Omega$$

$$V_E = 91 \Omega (23.4 \text{ mA})$$

$$= 2.12 \text{ V}$$

$$r_e = 26 \text{ mV} / 23.4 \text{ mA}$$

$$\approx 1 \Omega$$

$$r_e + R_E' = R_L' / |A_v|$$

$$R_L' = R_L \parallel R_C$$

$$= 470 \parallel 4.7 \text{ K}$$

$$\approx 429 \Omega$$

$$r_e + R_E' = 429 / 30 = 14.3$$

$$R_E' = 14.3 - 1 = 13.3 \Omega$$

$$R_{E1} = 12 \Omega \text{ y } R_{E2} = 18 \Omega$$

$$\text{Sea } R_E = 18 \Omega$$

$$R_E'' = R_{E2} - R_E'$$

$$= 85.5 - 13.3$$

$$= 72.2 \Omega$$

$$\text{Sea } R_E'' = 68 \Omega$$

$$R_C = R_E'' + R_E$$

$$= 68 + 18 = 86 \Omega$$

$$V_{RC} = 23.4 \text{ mA} (86) = 2.01 \text{ V}$$

Análisis AC para el recorte por abajo.

$$A_v = V_O / V_{in}$$

$$V_O = A_v V_{in}$$

Para AC; $V_c = A_v V_e$
 Esta consideración solo es válida para AC

$$\begin{aligned} V_e &= V_c / A_v \\ &= 20 / 30 \\ &= 0.67 \text{ V} \end{aligned}$$

De la figura se desprende que :

$$\begin{aligned} V_c &= V_e + V_c \\ &= 0.67 + 20 \\ &= 20.67 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{CC} &= V_e + V_{CE} + V_{EC} \\ &= 2.01 + 20.67 + 11 \\ &= 33.68 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{B_{max}} &= I_c / \beta_{min} \\ &= 23.4 \text{ mA} / 50 \\ &= 0.468 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$I_B \gg I_{B_{max}} \quad I_B = 10 I_{B_{max}} = 4.68 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} R_{B2} &= V_B / I_{B2} = (0.7 + 2.01) \text{ V} / 4.68 \text{ mA} \\ &= 579 \Omega \end{aligned}$$

$$R_{B21} = 560 \Omega \text{ y } R_{B22} = 680 \Omega$$

$$\text{Sea } R_{B2} = 560 \Omega$$

$$\begin{aligned} I_2 &= V_B / R_{B2} = 2.71 \text{ V} / 560 \Omega \\ &= 4.83 \text{ mA} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{B1} &= (V_{CC} - V_B) / (I_2 + I_B) \\ &= (33.68 - 2.71) / (4.83 + 0.468) \\ &= 5.83 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$

$$R_{B11} = 5.6 \text{ K}\Omega \text{ y } R_{B12} = 6.8 \text{ K}\Omega$$

$$\text{Sea } R_{B1} = 6.8 \text{ K}\Omega$$

6.5. AMPLIFICADOR EN COLECTOR COMÚN.

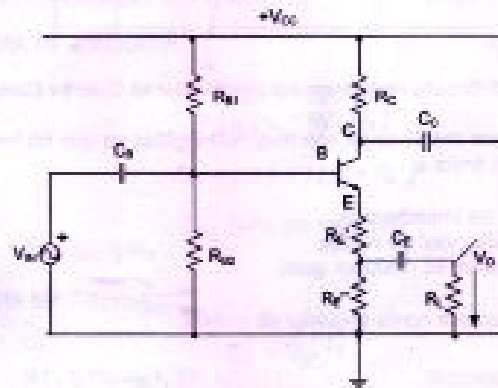


Figura 6.80 Circuito amplificador en Colector Común

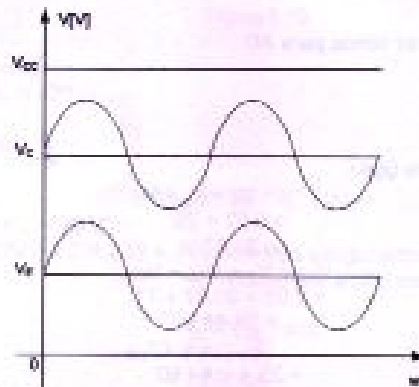


Figura 6.81 Condiciones de diseño para Transistor en Colector Común

La resistencia R_c ocasiona que sobre ella existe una caída de tensión, lo cual implica que V_{cc} crezca, como no es indispensable la podemos eliminar. Entonces nuestro amplificador queda como en la figura siguiente:

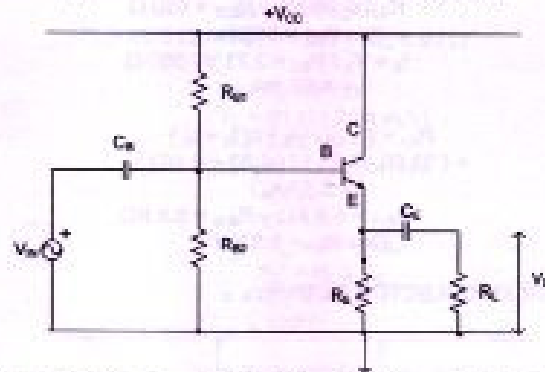


Figura 6.82 Circuito equivalente del amplificador en Colector Común

Las aplicaciones de este amplificador son muy restringidas ya que no hay ganancia de voltaje (A_v). Su uso se limita a:

- a) Circuito acoplador de impedancias.
- b) No sirve para amplificador de voltaje.
- c) Los demás parámetros se calculan igual.

Ya que $A_v \approx 1$, se le conoce como seguidor de emisor.

6.5.1. ANALISIS USANDO PARAMETROS [T]

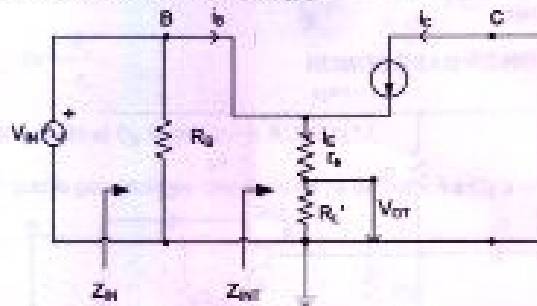


Figura 6.83 Circuito equivalente con parámetros [T] en Colector Común

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

$$R_L' = R_C \parallel R_L$$

a) GANANCIA DE VOLTAJE.

$$A_v = V_{OT} / V_M$$

$$V_{OT} = i_c R_L'$$

$$V_M = i_b (R_L' + r_e)$$

$$A_v = \frac{R_L'}{r_e + R_L'} \quad \text{(Ecuación 6.62)}$$

$A_v \rightarrow 1$

b) GANANCIA DE CORRIENTE.

$$A_i = i_c / i_b = \beta + 1 \quad \text{(Ecuación 6.63)}$$

c) IMPEDANCIA DE ENTRADA.

$$Z_{ENT} = V_M / i_M$$

$$= [i_c (r_e + R_L') / i_b]$$

$$Z_{ENT} = (\beta + 1) (r_e + R_L')$$

Z_{ENT} tiene un valor alto

$$Z_M = Z_{ENT} \parallel R_B \quad \text{(Ecuación 6.64)}$$

d) IMPEDANCIA DE SALIDA

$$Z_{OT} = V_{OT} / i_{OT}$$

$$= (-i_b R_B - i_c r_e) / -i_c \quad \text{(Ecuación 6.65)}$$

Z_{OT} tiene un valor pequeño.

e) CALCULO DE LOS CAPACITARES.

$$X_{CB} \ll Z_M \rightarrow C_B \geq 10 / \omega Z_M \quad \text{(Ecuación 6.66)}$$

$$X_{CE} \ll R_L \rightarrow C_E \geq 10 / \omega R_L \quad \text{(Ecuación 6.67)}$$

Se debe recordar que el cálculo de los capacitores se los debe realizar a la mínima frecuencia de trabajo.

6.6. AMPLIFICADOR EN BASE COMUN

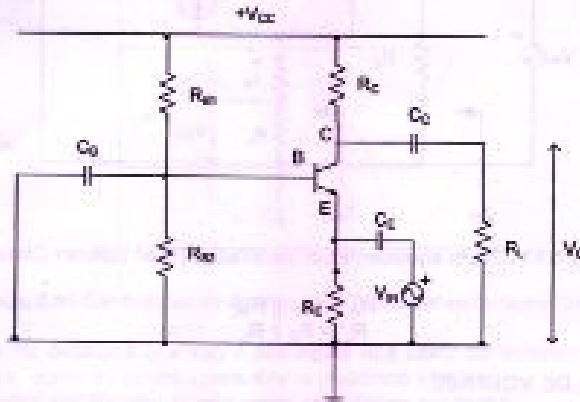


Figura 6.84 Circuito en configuración Base Común

En el presente circuito se tiene que la utilidad del capacitor de base C_B es la de permitir controlar la ganancia del amplificador.

El circuito equivalente con parámetros T del amplificador en la configuración de base común SIN EL CAPACITOR DE BASE C_B es:

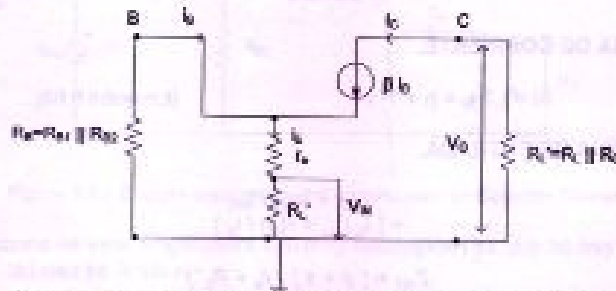


Figura 6.85 Circuito equivalente con parámetros [T] en Base Común

a) GANANCIA DE VOLTAJE

$$\begin{aligned}
 A_v &= V_{OT} / V_M \\
 V_{OT} &= -i_c R_L' \\
 V_M &= V_{EM} = -i_e r_e \cdot i_b R_B \\
 V_M &= -i_b (r_e + R_B / (\beta + 1)) \\
 A_v &= (i_c R_L) / (i_b [r_e + R_B / (\beta + 1)]) \quad \text{(Ecuación 6.88)}
 \end{aligned}$$

Si consideramos que: $i_c = i_e$

$$A_v = \frac{R_L'}{r_e + \frac{R_B}{\beta + 1}} \quad \text{(Ecuación 6.89)}$$

Si se conecta el CAPACITOR DE BASE C_B la $R_B = 0$, por lo que la ganancia de voltaje se reduce a :

$$A_V = \frac{R_L'}{r_c} \quad \text{(Ecuación 6.70)}$$

Esto demuestra que sin el C_B la ganancia AUMENTA.

Para conseguir que la ganancia no dependa de re se coloca a C_B a una parte de R_B .

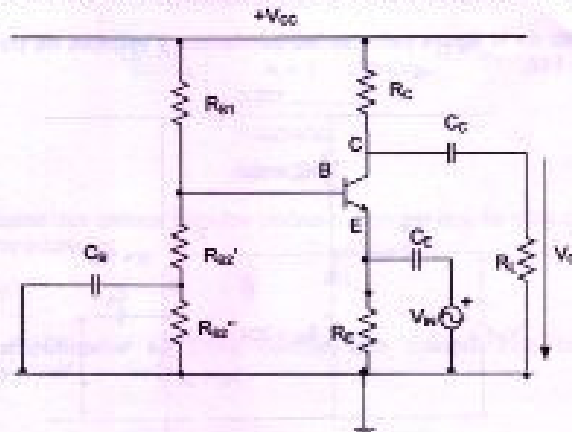


Figura 6.86 Circuito equivalente con C_B

Para AC $R_{B2}'' = 0$ (puesto que C_B lo cortocircuita), entonces

$$R_{B2} = R_{B2}'$$

Como la ganancia es positiva las señales de entrada y salida están en fase.

b) GANANCIA DE CORRIENTE.

$$A_i = i_c / i_b \quad \text{(Ecuación 6.71)}$$

$= \alpha \rightarrow$ que no existe ganancia de corriente

c) IMPEDANCIA DE ENTRADA.

$$Z_{ENT} = V_{ENT} / i_{ENT}$$

$$Z_{ENT} = r_c + \frac{R_L}{\beta + 1} \quad \text{sin } C_B \quad \text{(Ecuación 6.72)}$$

con $C_B \rightarrow R_B = 0$

$$Z_{ENT} = r_c$$

$$Z_{ENT} = R_B \parallel Z_{ENT} \quad \text{(Ecuación 6.73)}$$

d) CALCULO DE LOS CONDENSADORES.

- $X_{CC} \ll R_L$
- $X_{CE} \ll Z_{ENT}$
- $X_{CB} \ll r_c (\beta + 1)$

La última expresión se la obtiene de la siguiente manera:

$$A_v = \frac{R_c'}{r_e + \frac{R_b \parallel X_{C2}}{\beta + 1}}$$

$$X_{C2} \ll R_b$$

$$X_{C2} / (\beta + 1) \ll r_e$$

Para que no influya C_2 en la ganancia, $X_{C2} \ll (\beta + 1) r_e$

EJEMPLO 1:

Para el circuito de la figura calcular las corrientes y voltajes de polarización, A_v , Z_{in} , Z_o , si $\beta = 150$.

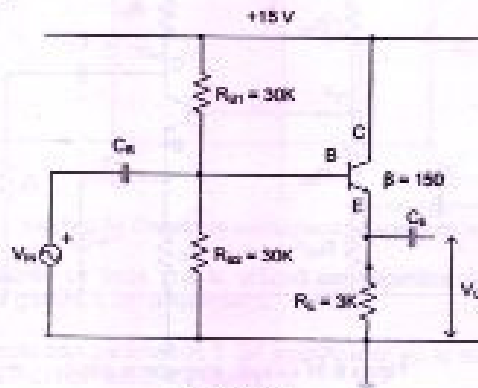


Figura 6.87

$V_{CC} = 15 \text{ V}$
 $\beta = 150$

$$V_B = V_{CC} / 2, \quad (R_{B1} = R_{B2})$$

$$= 7.5 \text{ V}$$

$$V_E = 7.5 - 0.7 = 6.8 \text{ V}$$

$$I_C = 6.8 / 3K = 2.26 \text{ mA}$$

$$I_C = 2.26 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} = 15V$$

$$I_B = I_C / \beta$$

$$I_B = 2.26 \text{ mA} / 150$$

$$= 15.06 \mu\text{A}$$

$$R_c' = R_C \parallel R_L = R_C$$

$$V_{CE} = 15 - 6.8 = 8.2 \text{ V}$$

$$r_e = 26 \text{ mV} / 2.26 \text{ mA}$$

$$= 11.5 \Omega$$

$$A_v = 3K / (11.5 \Omega + 3K)$$

$$= 0.99 \approx 1$$

$$Z_{ENT} = (\beta + 1)(r_e + R_E)$$

$$= 151(11.5 + 3K)$$

$$= 454.7 K$$

$$Z_{OT} = r_e + (R_E / (\beta + 1))$$

$$= 11.5 + (15K / 151)$$

$$= 111 \Omega$$

$$Z_{ENT} = 454.7 K\Omega \text{ y } Z_{OT} = 111\Omega$$

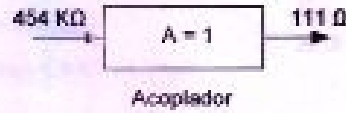


Figura 6.88

De acuerdo a estos dos últimos cálculos podemos concluir que se trata de un circuito acoplador de impedancias.

EJEMPLO 2:

Disenar un amplificador en base común que cumpla con las siguientes características :

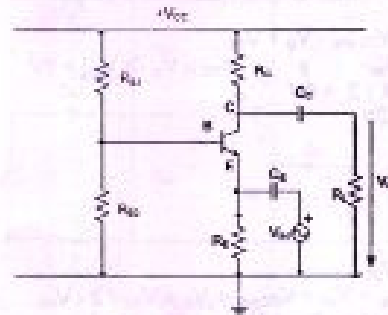


Figura 6.89

- |Av| = 30
- R_L = 1K
- Z_{IN} ≥ 100Ω
- f_{max} = 1KHz
- V_Q = 0.1 V
- β_{min} = 80

Comprobación rápida de las condiciones de diseño.

$$Z_{IN} = R_E \parallel Z_{INT}$$

Si $Z_{INT} \approx Z_{IN} \rightarrow R_E \gg Z_{INT}$

$$Z_{INT} = R_L' / AV \quad R_{L,max}' \geq R_L$$

$$Z_{INT,max} = R_{L,max}' / AV = R_L / AV$$

$$= 1K / 30 = 33.3 \Omega \quad \text{no es mayor que } 100 \Omega$$

por tanto se hace necesario revalorar R_L

Sea $R_L = 6.8 \text{ K}$

$$Z_{ENT \text{ max}} = 6.8 \text{ K} / 30 = 226.6 \Omega > 100 \Omega \rightarrow \text{si se cumple}$$

$$Z_{IN} \approx Z_{ENT} = 100 \Omega$$

$$Z_{IN} = r_e + (R_B / (\beta + 1))$$

Si $r_e \ll R_B / (\beta + 1)$ (es decir R_B es máxima)

$$Z_{ENT} = R_B / (\beta + 1) = 100$$

$$R_B = 100 (\beta + 1) = 8.1 \text{ K}$$

$$Z_{IN} = R_L / A_V \approx Z_{IN}$$

$$R_L' = Z_{IN} A_V$$

$$= 100 * 30 = 3 \text{ K}$$

$$R_L = 3 \text{ K} = R_C R_L' / (R_C + R_L')$$

$R_C = R_L' R_L / (R_L - R_L')$ este valor es el límite de R_C , para obtener una $R_L' = 3 \text{ K} \Omega$.

$$R_C \geq R_L' R_L / (R_L - R_L')$$

$$\geq 3 \text{ K} (6.8 \text{ K}) / (6.8 \text{ K} - 3 \text{ K}) = 5.36 \text{ K} \Omega$$

Sea $R_C = 6.8 \text{ K} \rightarrow R_L' = R_C \parallel R_L = 6.8 \text{ K} \parallel 6.8 \text{ K} = 3.4 \text{ K}$

$$V_{CC} \geq V_{RC} + V_{CE} + V_{CE \text{ min}} - V_E + V_{RE}$$

$$V_{RC} \geq (R_C / R_L') V_{CE} \quad \text{y} \quad V_{RE} \geq V_E \rightarrow V_{RC} \geq 1 \text{ V}$$

$$V_{RC} \geq (6.8 \text{ K} / 3.4 \text{ K}) 3 = 6 \text{ V}$$

$$V_{RC} = 1.2 (6) = 7.2 \text{ V}$$

Si maximizamos R_B

$$V_B = V_{CC} / 2$$

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

$$V_{RE} = (V_{CC} / 2) - V_{BE}$$

$$V_{CC} \geq (R_C / R_L') V_{CE} + V_{CE} + V_{CE \text{ min}} + V_E + V_{CC} / 2 - V_{BE}$$

$$V_{CC} \geq 2 [(R_C / R_L') V_{CE} + V_{CE} + V_{CE \text{ min}} - V_E - V_{BE}]$$

$$V_{CC} \geq 2 [7.2 + 3 + 2 - 0.1 - 0.7]$$

$$V_{CC} \geq 22.8 \text{ V}$$

Sea $V_{CC} = 24 \text{ V}$

$$V_{RC} = (R_C / R_L') V_{CE}$$

$$I_C = V_{RC} / R_C = 7.2 \text{ V} / 6.8 \text{ K}$$

$$= 1.058 \text{ mA}$$

$$V_{RE} = V_{CC} / 2 - V_{BE} = 12 - 0.7 = 11.3 \text{ V}$$

$$R_E = V_{RE} / I_C = 11.3 \text{ V} / 1.058 \text{ mA} = 10.68 \text{ K} \Omega$$

Sea $R_C = 10 \text{ K}$

$R_{B1} = R_{B2} = 2 R_B = 18.2 \text{ K} \rightarrow R_{B1} = 18 \text{ K}$ y $R_{B2} = 18 \text{ K} \Omega$
 Sea $R_{E1} = R_{E2} = 18 \text{ K} \rightarrow R_E = 9 \text{ K}$

Comprobación:

$$\begin{aligned}
 Z_{MT} &= r_e + R_E / (\beta + 1) \\
 &= (26\text{mV} / 1.058\text{ mA}) + (9\text{K} / 81) \\
 &= 135.7\ \Omega > 100\ \Omega \\
 Z_M &= Z_{MT} \parallel r_e = 135.7 \parallel 10\text{K} = 133.9\ \Omega \geq 100\ \Omega \\
 A_V &= R_C / Z_{MT} = 3.4\ \text{K} / 135.7 = 25
 \end{aligned}$$

Para aumentar la A_V puedo variar R_B a 8 K y $r_e = 8.2\ \text{K}\Omega$.

Cálculo de los capacitores:

$$\begin{aligned}
 C_C &\geq 50 / \omega R_C \\
 C_C &= 50 / ((2\pi \cdot 1\text{kHz}) \cdot 8.8\ \text{K}) = 1.17\ \mu\text{F}
 \end{aligned}$$

$\rightarrow C_C = 2.2\ \mu\text{F}$

$$\begin{aligned}
 C_E &\geq 50 / \omega Z_M \\
 C_E &= 58.43\ \mu\text{F}
 \end{aligned}$$

$\rightarrow C_E = 68\ \mu\text{F}$

EJEMPLO 3:

Diseñar un amplificador en colector común que cumpla con las siguientes características:

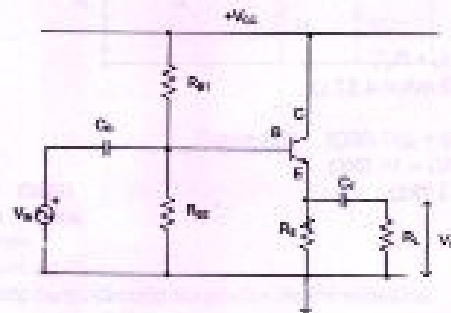


Figura 6.90

- $V_{CC} = 2\text{V}$
- $R_C = 470\ \Omega$
- $Z_M \geq 3\text{K}$
- $f_{max} = 50$

$$Z_M = Z_{MT} \parallel R_B$$

Si $Z_M = Z_{MT} > 3\text{K}$

$$\begin{aligned}
 (\beta + 1) (r_e + R_E) &> 3\text{K}\Omega \\
 r_e + R_E' &> 3\text{K} / 51 = 58.82 \\
 \text{Si } r_e &\ll R_E
 \end{aligned}$$

$$R_E > 58.82\ \Omega$$

$$R_E' = R_C \parallel R_E / (R_C + R_E)$$

$$R_E = R_C \parallel R_E' / (R_C - R_E')$$

$$R_C > (58.82 * 470) / (470 - 58.82) = 67.23\ \Omega$$

Si tomo una R_E baja se tendrá una gran caída de tensión en el transistor, es conveniente hacer $V_{BE} = V_{CC} / 2$.

$$\text{Sea } R_E = 1.5K \rightarrow R_L' = 357.86 \Omega$$

$$\text{Sea } V_E = 8V, V_E = V_{CC} / 2 \rightarrow V_{CC} = 16V$$

$$I_E = 8V / 1.5K = 5.33 \text{ mA}$$

$$I_B = 5.33 \text{ mA} / \beta$$

$$= 0.1066 \text{ mA}$$

$$I_C \approx I_E \rightarrow I_C = 10 I_B = 1.066 \text{ mA}$$

$$R_{C2} = V_B / I_C$$

$$= 8.7V / 1.066 \text{ mA}$$

$$= 8.2K$$

$$R_{B1} = (16 - 8.2) / (1.06 + 0.1066)$$

$$= 6.68K$$

$$R_{B11} = 5.6K \text{ y } R_{B12} = 6.8K$$

$$\text{Sea } R_{B1} = 6.8K \quad R_B = 8.2K \parallel 6.8K = 3.7K$$

Comprobación :

$$Z_{HT} = (\beta + 1) (r_e + R_L')$$

$$r_e = 26 \text{ mV} / 5.33 \text{ mA} = 4.87 \Omega$$

$$Z_{HT} = 51 (4.87 \Omega + 357.86 \Omega)$$

$$= 18.499.23 \Omega \approx 18.5K \Omega$$

$$Z_{IN} = 18.5K \Omega \parallel 3.7K \Omega$$

$$= 3.083K \Omega$$

$$Z_{IN} \geq 3K \Omega$$

6.7. PROPIEDADES DE LAS CONFIGURACIONES

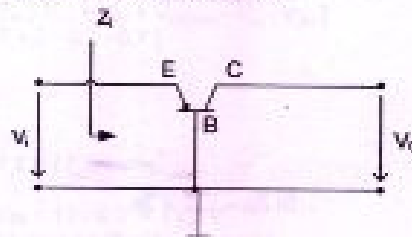


Figura 6.91

a) Base común

1. Z_{IN} pequeña
2. A_v alta
3. $A_i = \alpha < 1$ (baja)

b) Emisor común

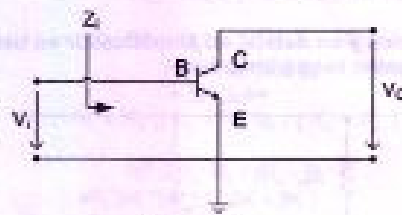


Figura 6.92

1. Z_{in} grande
 2. A_v alta
 3. $A_i = \beta$ (alta)
 4. A_p alta
- es usado como amplificador de potencia.

c) Colector común

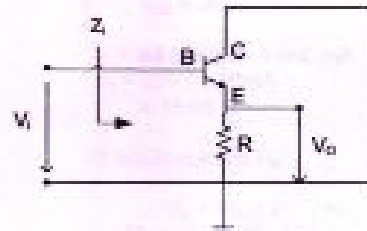


Figura 6.93

1. $A_v \approx 1$ (baja)
 2. $A_i = \beta + 1$ (alta)
 3. Z_{in} grande
 4. Z_o pequeña
- es usado como circuito acoplador de impedancias

6.8. PROBLEMAS PROPUESTOS

6.8.1. Diseñar con orden y en detalle un amplificador en base común que cumpla con los siguientes requerimientos:

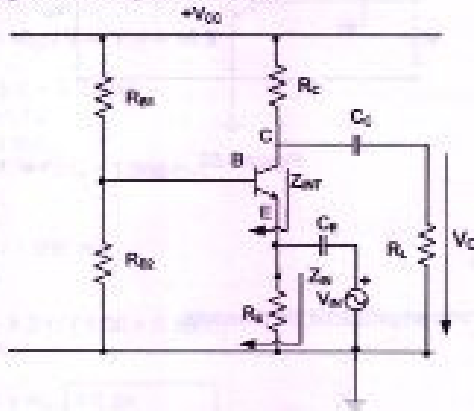


Figura 6.94

- $|A_v| = 30$
- $V_E = 0.2 \text{ V}$
- $Z_i \geq 100 \Omega$
- $R_L = 5\text{K}$
- $f_{min} = 10 \text{ KHz}$
- $\beta_{min} = 50$

Ecuaciones:

$$A_v = R_L' / Z_{INT}$$

$$Z_{INT} = r_e + (R_E / (\beta + 1))$$

$$Z_{IN} = R_B \parallel Z_{INT}$$

$$R_L' = R_L \parallel R_C$$

Comprobación :

$$Z_{IN} = R_B \parallel Z_{INT}$$

Si $Z_{IN} \approx Z_{INT}$
 $R_B \gg Z_{INT}$
 $Z_{INT} = R_L' / |A_v|$

$$R_{L,max}' \approx R_L$$

$$Z_{INT,max} = R_{L,max}' / |A_v|$$

$$= 5\text{K} / 30 = 166.66 \Omega > 100 \Omega \text{ si se cumple}$$

$$Z_{INT} \approx Z_{IN} = 100 \Omega$$

$$Z_{INT} = r_e + (R_E / (\beta + 1))$$

Si $r_e \ll R_E / (\beta + 1)$

$$Z_{INT} = R_E / (\beta + 1) = 100$$

$$R_E = 100 (\beta + 1)$$

$$= 5100 \Omega$$

$$Z_{ENT} = R_C' / |Av| = Z_{IN}$$

$$R_C' = Z_{IN} Av$$

$$R_C' = 100 (30)$$

$$= 3K\Omega$$

$$R_C = R_C \parallel R_C' = R_C R_C' / (R_C + R_C')$$

$$R_C \geq R_C' R_L / (R_L - R_C')$$

$$= (3K * 5K) / (5K - 3K)$$

$$= 7.5K\Omega$$

Sea $R_C = 12K$

$$R_C' = R_C \parallel R_L = 12K \parallel 5K$$

$$= 3.5294K$$

$$V_{RC} \geq (R_C / R_L) V_{OP}$$

$$\geq (12K / 3.529K) (0.2 * 30) = 20.402 V$$

$$V_{RC} = 20V$$

$$I_C = 20V / 12K = 1.666 mA$$

$$r_e = 26V / 1.66mA$$

$$= 15.66 \Omega$$

Si maximizamos R_B :

$$V_B = V_{CC} / 2$$

$$V_E = (V_{CC} / 2) - V_{BE}$$

$$V_{CC} > V_{RC} + V_{OP} + V_{CEmin} - V_B + V_{CC} / 2 - V_{BE}$$

$$V_{CC} > 2(V_{RC} + V_{OP} + V_{CEmin} - V_B - V_{BE})$$

$$V_{CC} > 2 (10 + 6 + 2 - 0.2 - 0.7)$$

$$V_{CC} = 54.2 V$$

Sea $V_{CC} = 50V$

$$V_E = 25 - 0.7$$

$$= 24.3 V$$

$$R_C = 24.3 V / 1.66mA$$

$$= 14.638 K \approx 15K$$

$$R_{B1} = R_{B2} = 2R_B$$

Sea $R_{B1} = 10K$ y $R_{B2} = 10K$

$$I_B = 1.66mA / 50$$

$$= 0.03332mA$$

$$I_B = 33.32\mu A$$

Comprobación:

$$Z_{ENT} = (15.66 + (5K / 51))$$

$$= 113.899\Omega$$

$$Z_{IN} = 113.899\Omega \parallel 15K$$

$$= 112.843\Omega$$

$$Z_{IN} > 100\Omega$$

$$I_1 = 25 / 10K = 2.5 \text{ mA} \rightarrow I_B \ll I_1$$

$$A_v = R_L' / Z_{out} \\ = 3.5294 K / 113.689 \\ = 31.041 > 30$$

6.8.2. Una fábrica de dispositivos electrónicos que se encarga de realizar el diseño y la construcción de radios a transistores, nos ha encargado el diseño de una etapa amplificadora de audio que cumpla con los siguientes requisitos:

- a) Un amplificador con ganancia de voltaje mayor que 1 y ganancia de corriente grande.
 - b) La impedancia de entrada del amplificador Z_i en el orden de 10^4 .
 - c) La carga R_L del amplificador debe ser acoplada a una impedancia Z_o muy baja mediante el empleo de un segundo amplificador.
 - d) La tarjeta diseñada debe incluir una fuente regulada de +12V.
- Realice únicamente el diagrama circuital del diseño pedido (No realice ningún cálculo numérico).

- a) $A_v > 1$, A_i alta \rightarrow un amplificador en emisor común cumple con estas características.
- b) Z_i alta, \rightarrow se confirma que la primera etapa es un amplificador en emisor común.
- c) Un acoplamiento de impedancias se puede realizar mediante un amplificador en colector común.
- d) Una fuente regulada con un diodo zener de 12V. El circuito pedido se indica en la figura siguiente:

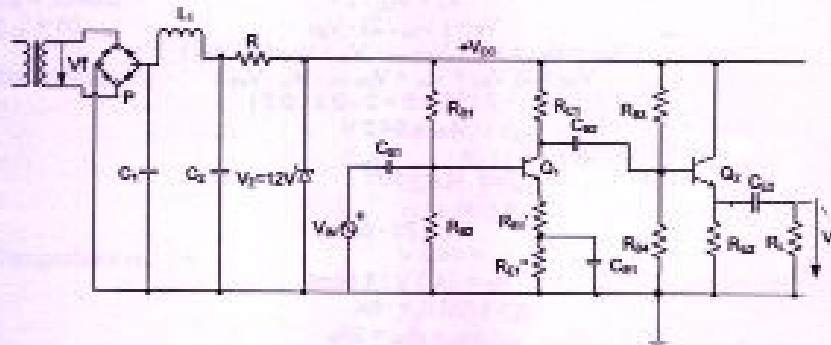


Figura 6.95

6.8.3. Para el amplificador de la figura, encontrar la ganancia de voltaje, a impedancia de entrada, las corrientes y voltajes de polarización. Considere a los condensadores cortocircuito para la frecuencia de trabajo. Además haga un solo gráfico en el que consten las señales existentes AC y DC en el emisor y colector, si el $V_{in} = 1.2 \text{ senx}$.

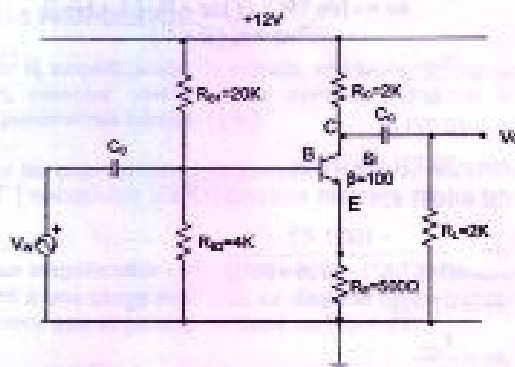


Figura 6.98

$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

$$= 20K \parallel 4K$$

$$R_B = 3333.33 \Omega$$

$$I_B = \frac{\frac{V_{CC}}{R_{B1}} - \frac{V_{BE}}{R_E}}{1 + \frac{(\beta + 1)R_E}{R_B}}$$

$$I_B = \frac{\frac{12V}{20K} - \frac{0.7V}{3333.33\Omega}}{1 + \frac{(100+1)500\Omega}{3333.33\Omega}}$$

$$I_B = 24.14857 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$= 100 (24.14857 \mu A)$$

$$I_C = 2.414 \text{ mA} \approx I_E$$

$$V_E = I_E R_E$$

$$= 2.414 \text{ mA} (500\Omega)$$

$$= 1.2074V$$

$$V_E > 1V \text{ y } V_E > V_{BE}$$

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

$$= 12V - (2.414 \text{ mA} \cdot 2K)$$

$$= 7.172 V$$

$$V_B = V_E + 0.7$$

$$= 1.9074V$$

$$I_B = V_B / R_B$$

$$= 1.9074V / 4K$$

$$= 0.4768 \text{ mA}$$

$$A_v = -h_{fe} \cdot R_L' / (h_{ie} + R_e (1 + h_{fe}))$$

$$h_{ie} = r_e (\beta + 1)$$

$$r_e = \frac{26mV}{I_e}$$

$$r_e = 10.771 \Omega$$

$$h_{ie} = 10.771 \Omega \times (101)$$

$$h_{ie} = 1087.821$$

$$A_v = \frac{-100(1 K)}{(1087.821 + (500 \times 101))}$$

$$A_v = -1.938$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$V_{out} = |A_v| \times V_{in}$$

$$= 1.938(1.2 \text{ sen}(x))$$

$$= 2.326 \text{ sen}(x) [V]$$

$$Z_{INT} = (\beta + 1)(r_e + R_e)$$

$$= 101(10.771 + 500)$$

$$= 51587.871 \Omega$$

$$Z_{IN} = R_b \parallel Z_{INT}$$

$$= 3333.333 \Omega \parallel 51587.871 \Omega$$

$$Z_{IN} = 3131.023 \Omega$$

$$V_{BC} = I_C \times R_C = 4.828 V$$

$$V_{BC} \geq \left(\frac{2 K}{1 K}\right) 2.326 V = 4.652 V$$

$\rightarrow 4.828 V > 4.652 V$, entonces no existe recorte.

$$V_E = I_E \times R_E = 1.207 V$$

$$V_{inp} = 1.2 V$$

$$V_{ap} = 2.326 V$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 7.172 V - 1.207 V = 5.965 V$$

$$I_C \times R_C = 2.414 \text{ mA}(2 K)$$

$$= 4.828 V$$

$$I_C \times R_E = 2.414 \text{ mA}(1 K) = 2.414 V.$$

6.9. PROBLEMAS PROPUESTOS:

6.9.1. Encontrar la amplificación de voltaje, corriente, de las configuraciones en emisor común, colector común, base común, utilizando el equivalente del transistor con parámetros híbridos [h].

6.9.2. Encontrar las expresiones que permitan calcular los elementos del circuito equivalente [T] conocidos los parámetros híbridos de un transistor para EC y BC.

6.9.3. Diseñar un amplificador que permita acoplar un generador con impedancia de salida $Z_i \geq 3K$ a una carga de $4K \Omega$, se dispone de un transistor con un $\beta = 50$. Además se conoce que el generador tiene un $V_{ip} = 2V$.

6.9.4. Diseñar un amplificador en EC que cumpla con los siguientes datos: $R_L = 4.7 K\Omega$, $Z_i \geq 4 K\Omega$, $A_v = -20$, $V_{ip} = 0.1 \text{ sen } x [V]$, y el transistor tiene un $\beta_{min} = 50$.

6.9.5. Se requiere diseñar un amplificador en BC que cumpla con las siguientes condiciones:

$A_v = 20$, $V_i = 0.1 \text{ sen}(x) [V]$, $Z_i > 100\Omega$, $R_L = 5.1 K\Omega$, $\beta = 50$.

6.9.6. Diseñar un amplificador que cumpla:

- $|A_v| = 300$ $V_{ip} = 0.01 V$
- $Z_i > 50 K\Omega$
- $\beta = 50$
- $R_L = 3.3 K\Omega$

Sugerencia:

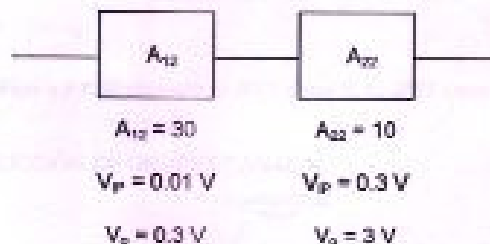


Figura 6.97

6.9.7. Realizar un amplificador con un TBJ tipo NPN con las siguientes especificaciones.

$V_{in} = 0.2 \text{ sen } (2\pi \cdot 1000t) [V]$, $R_L = 2.7 K\Omega$, $\beta = 100$, $A_v = -10$, $Z_{in} \geq 1K\Omega$.

6.9.8. En el siguiente circuito amplificador encuentre el máximo voltaje que podría entregar el generador que alimenta al circuito para que no exista recorte a la salida, conociendo que la resistencia interna del generador es de 600Ω . Considere que a la frecuencia de trabajo los capacitores presentan reactancias despreciables. El TBJ utilizado es de Si, con $\beta \geq 100$

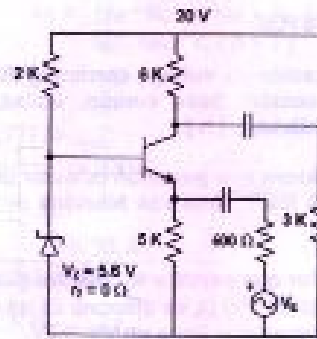


Figura 6.98