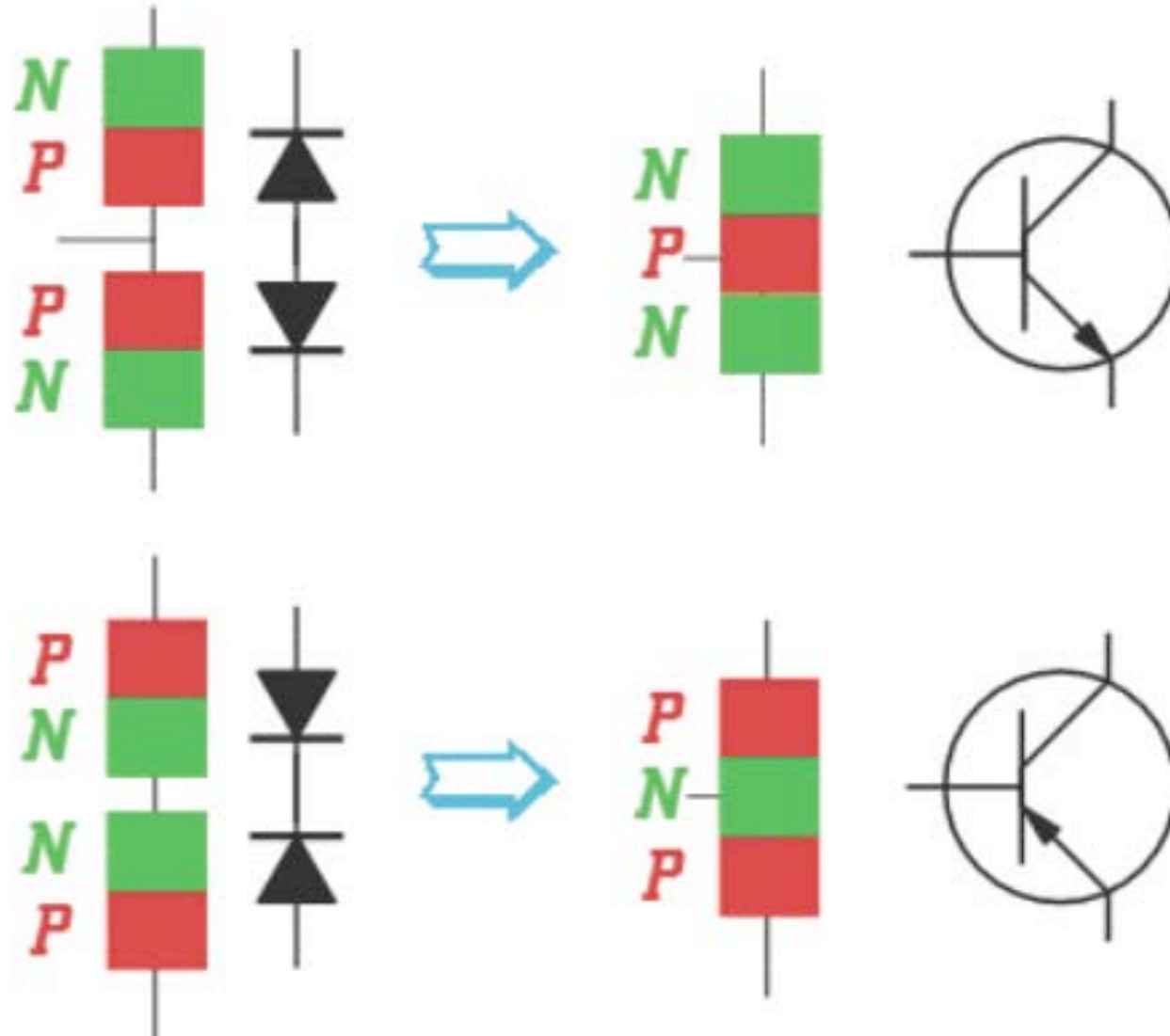
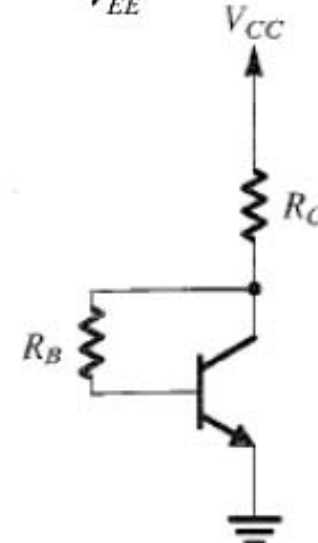
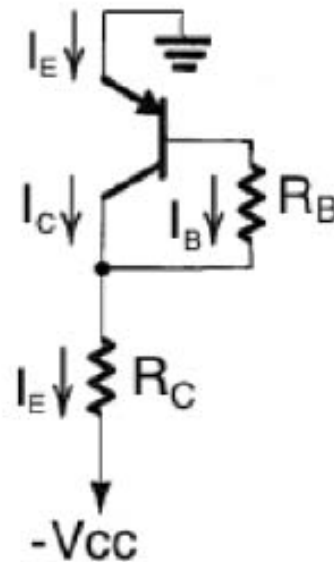
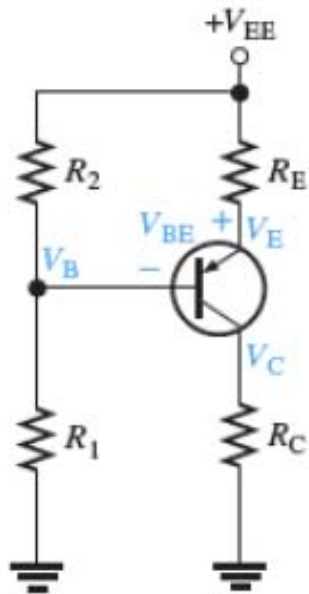
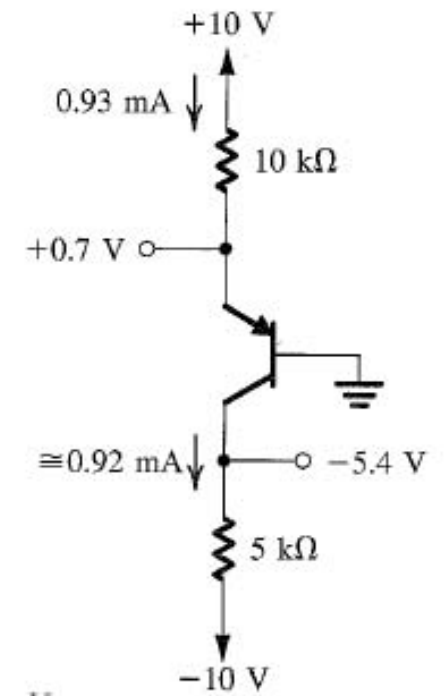
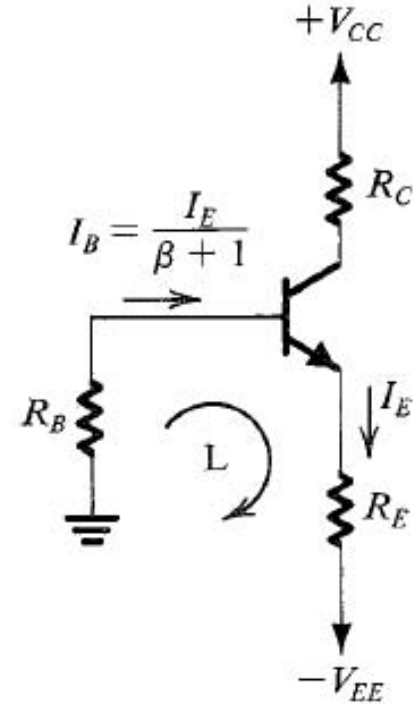
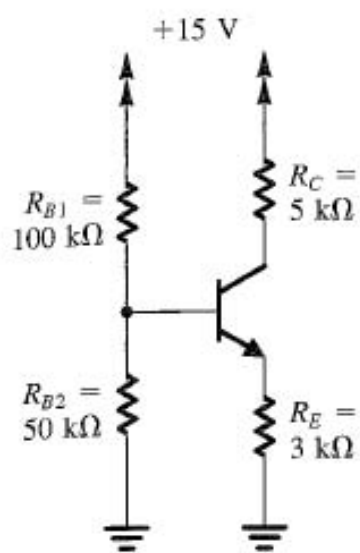
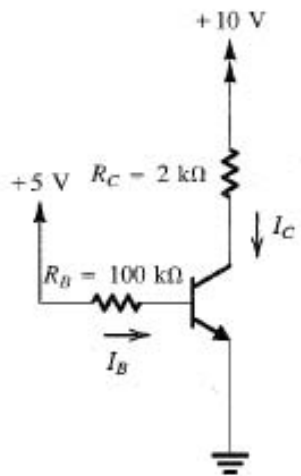


EL TRANSISTOR BIPOLAR



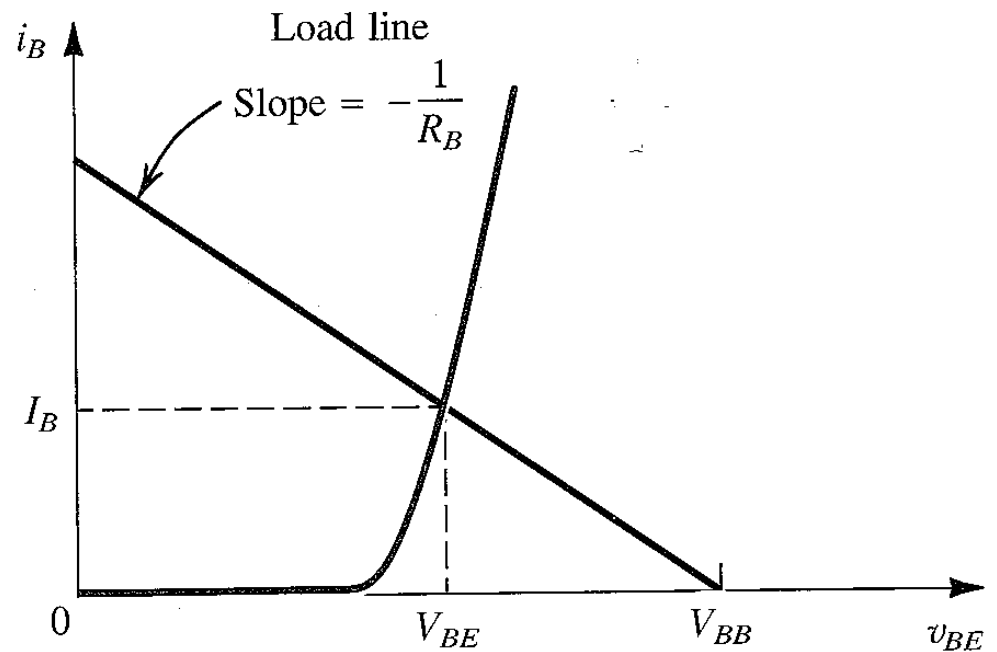
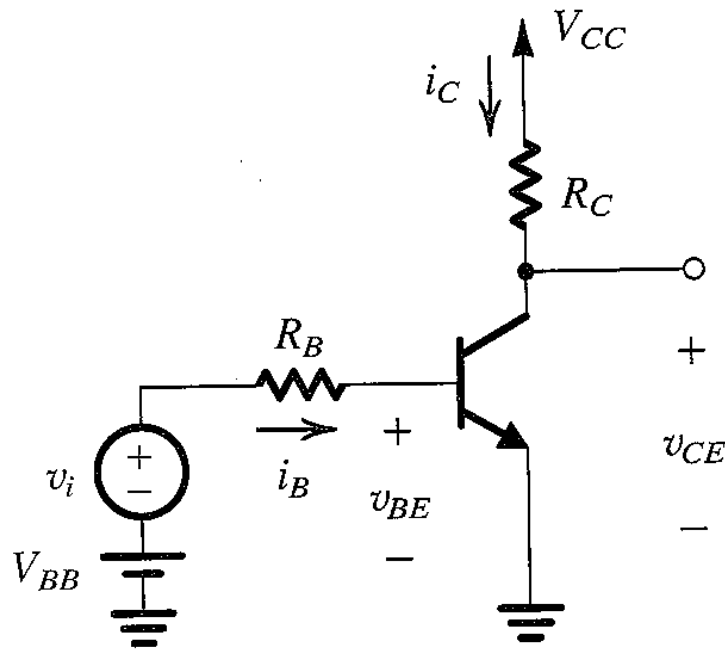
RESUMEN DE LAS REDES DE POLARIZACIÓN



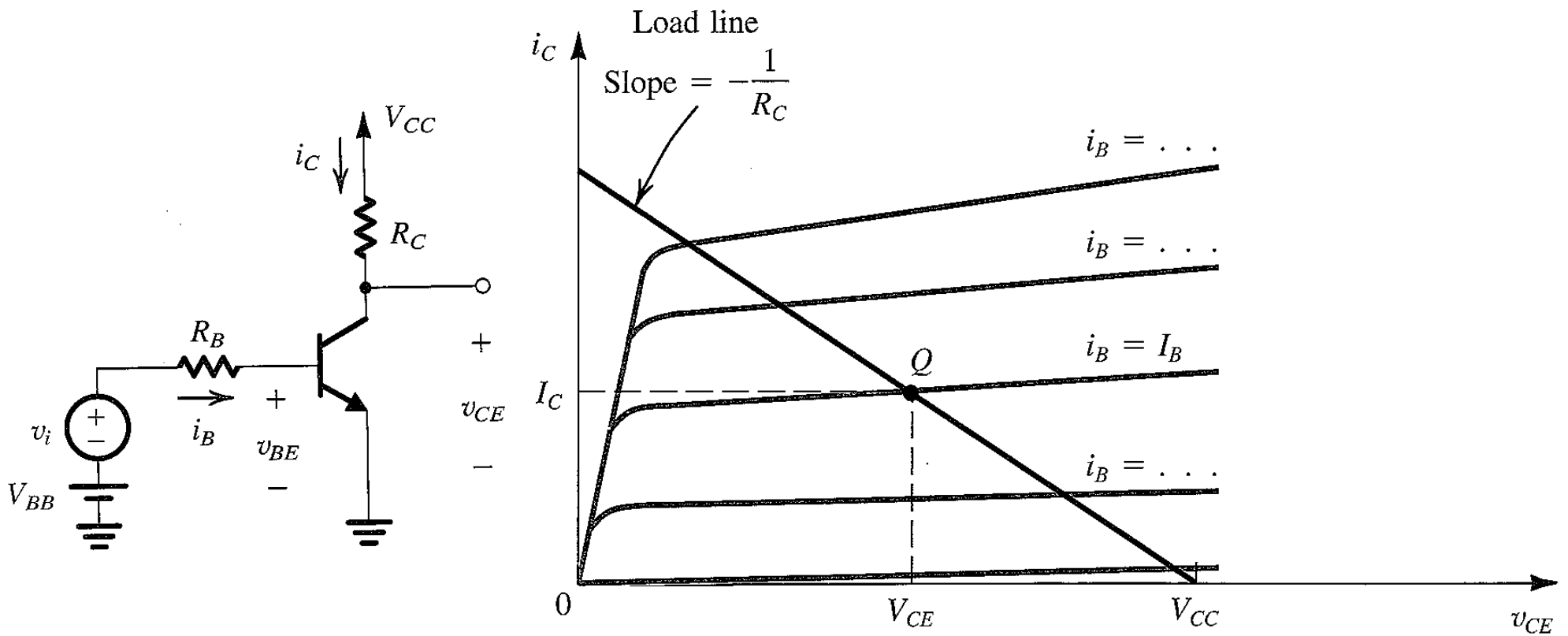
PUNTO DE OPERACIÓN: ANÁLISIS GRÁFICO EN EL CIRCUITO DE BASE. RECTA DE CARGA DC

Ecuación del diodo

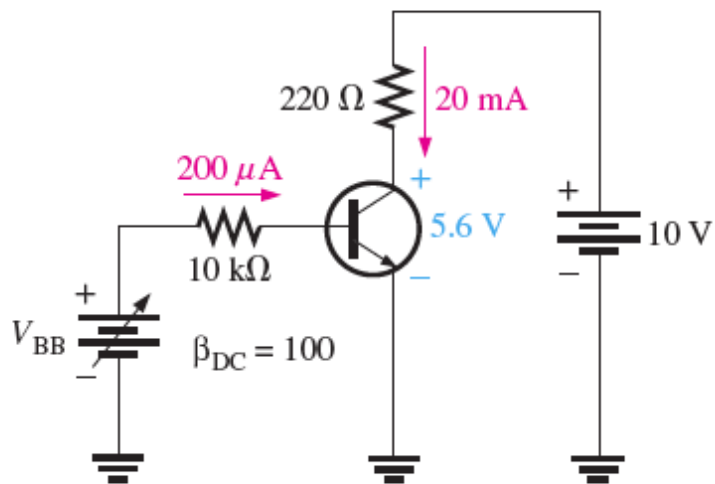
$$I = I_S \left(e^{v/nv_T} - 1 \right) \approx I_S e^{v/v_T}$$



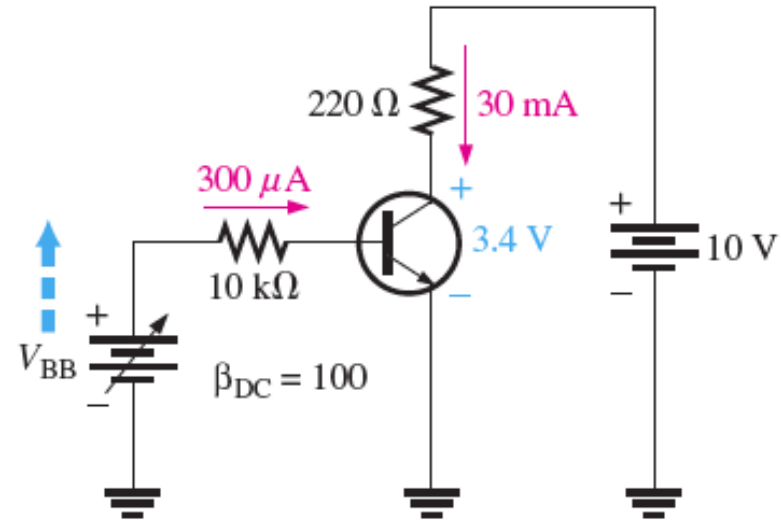
PUNTO DE OPERACIÓN: ANÁLISIS GRÁFICO EN EL CIRCUITO DE COLECTOR-EMISOR. RECTA DE CARGA DC



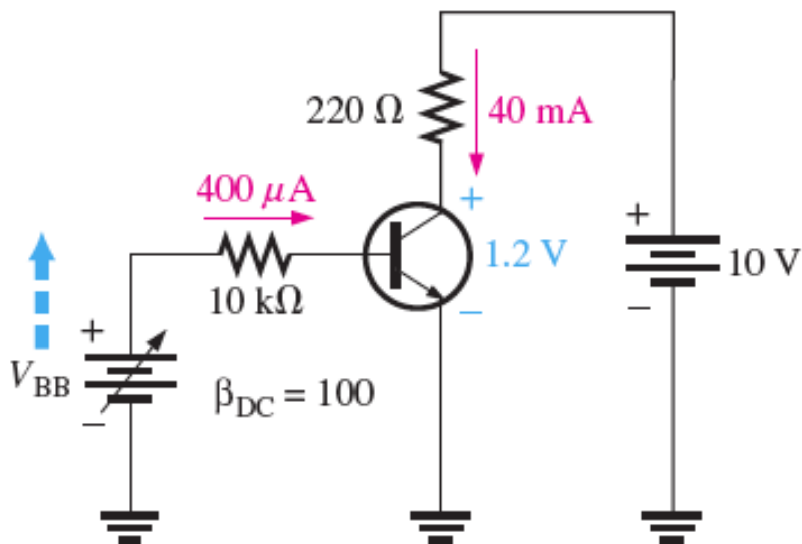
EJEMPLO DE DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE OPERACIÓN



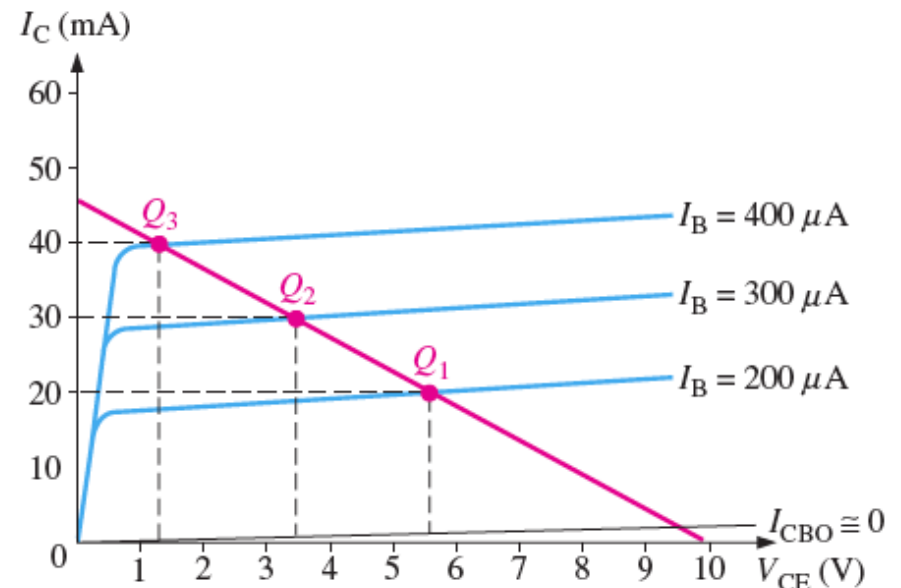
(a) $I_B = 200 \mu\text{A}$



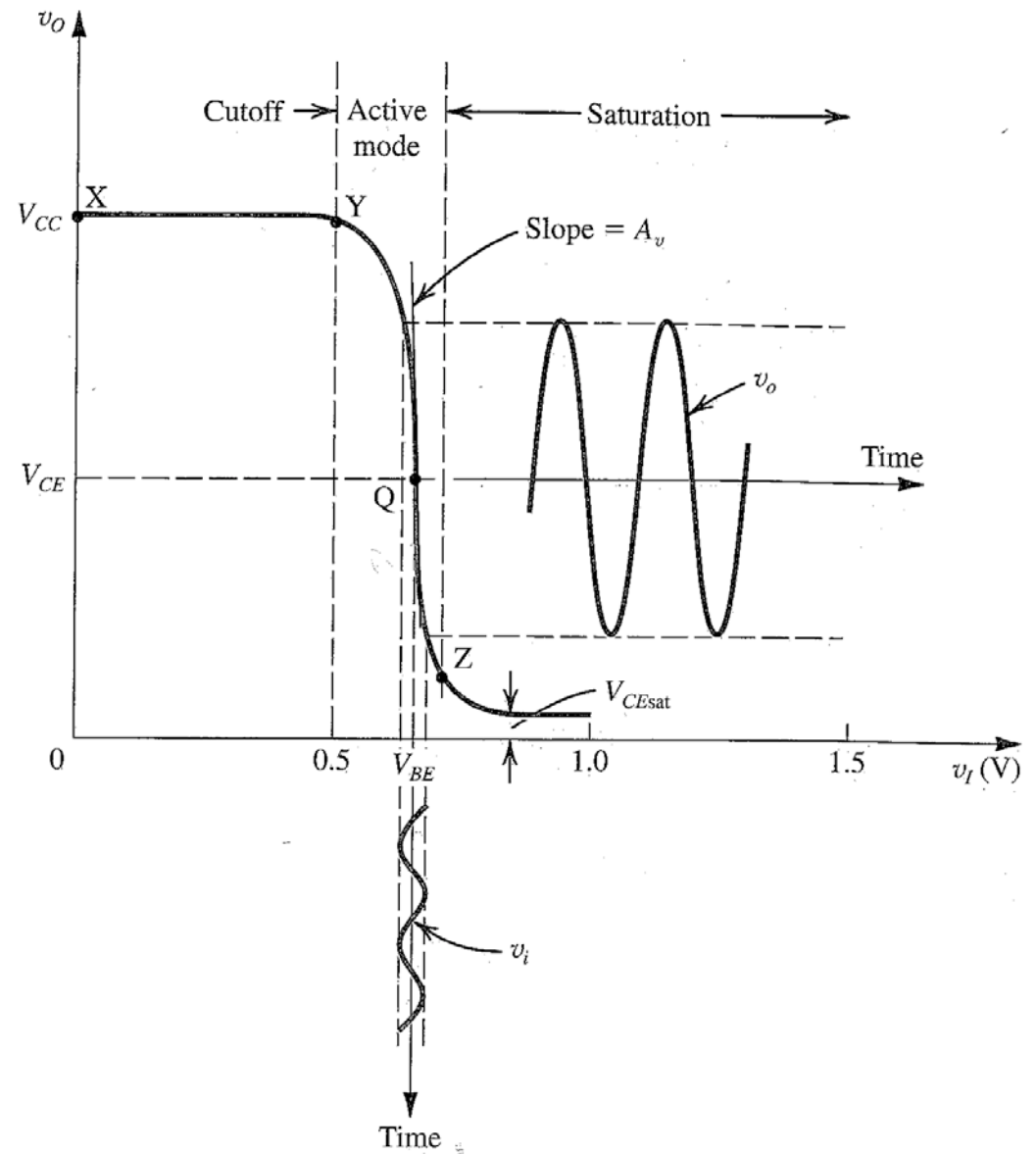
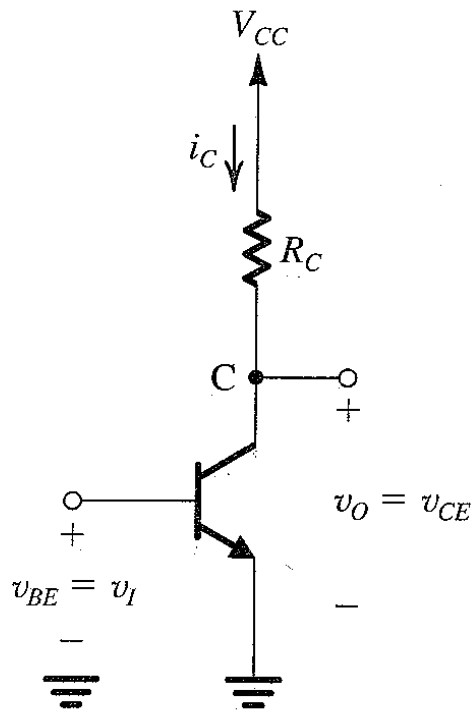
(b) Increase I_B to $300 \mu\text{A}$ by increasing V_{BB}



(c) Increase I_B to $400 \mu\text{A}$ by increasing V_{BB}



OPERACIÓN DE GRAN SEÑAL: LA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA



El transistor de la gráfica tiene la característica de transferencia mostrada.

Región de corte: Mientras de entrada V_{BE} no alcanza el valor necesario para que la juntura base-emisor comience a conducir.

Región activa: Zona en la que el transistor está en la zona activa y actúa como un amplificador. La pendiente pronunciada indica que el factor de amplificación es elevado.

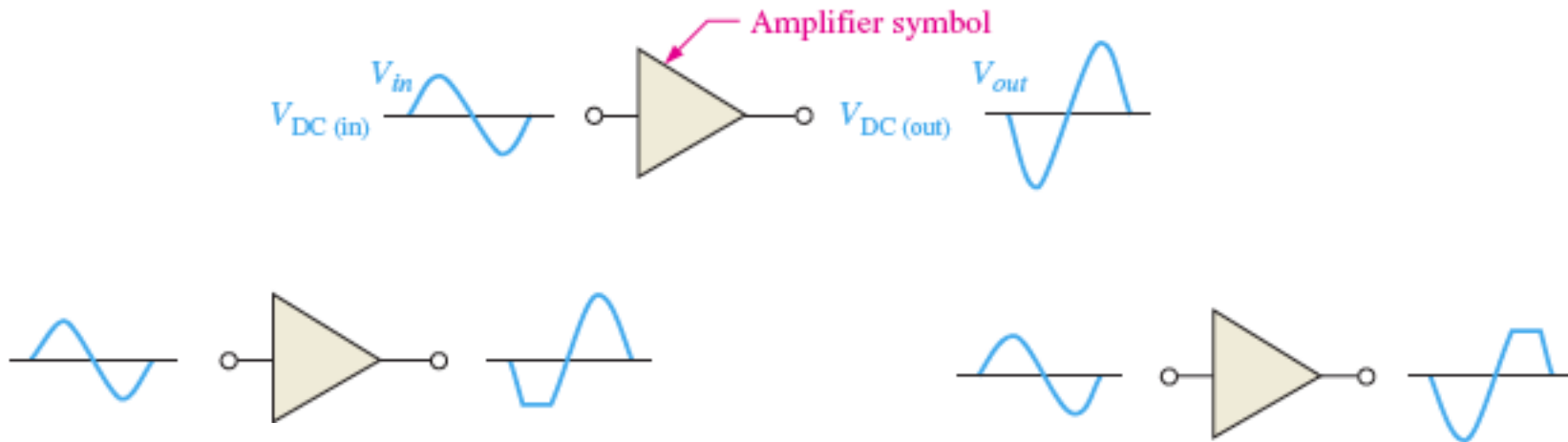
Región de saturación: EL transistor se satura y su voltaje de salida es V_{Esat} .

El transistor como conmutador (switch): Opera entre la región de corte y la de saturación, pasando por la región activa lo mas rápido posible.

El transistor como amplificador lineal: Opera en la zona activa.

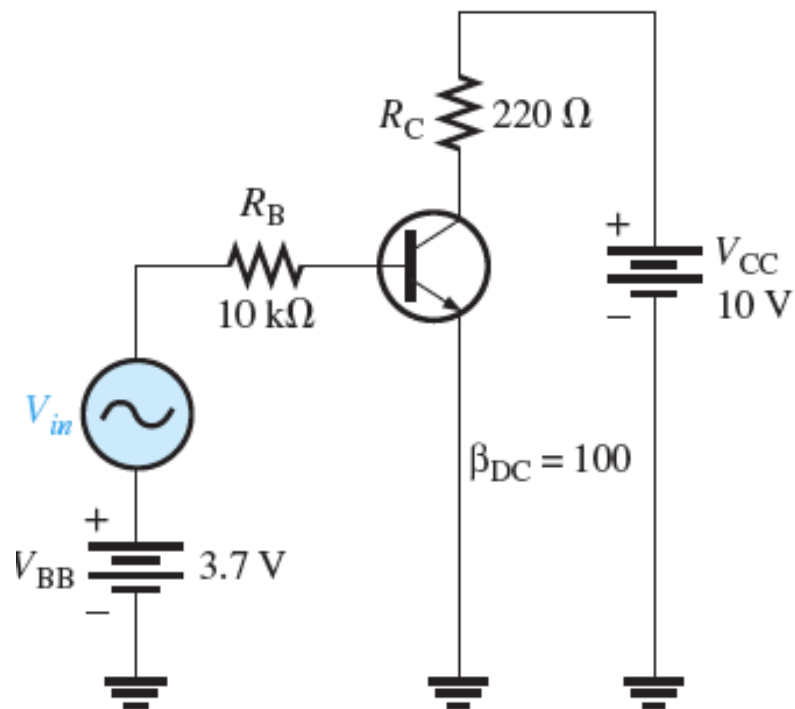
EL TRANSISTOR BJT COMO AMPLIFICADOR LINEAL ¿QUÉ ESPERAMOS DE UN AMPLIFICADOR LINEAL?

- * Que amplifique la señal de entrada sin distorsión dentro de un rango especificado (Siempre va a haber un límite, definido por las fuentes).
- * Que tenga alta impedancia de entrada, para poderlo conectar a otros circuitos produciendo la menor alteración posible.
- * Que tenga baja impedancia de salida, para poderle conectar diferentes circuitos de carga y pueda mantener su voltaje de salida.



EL TRANSISTOR BJT COMO AMPLIFICADOR LINEAL

PRIMER PASO: PUNTO DE OPERACIÓN

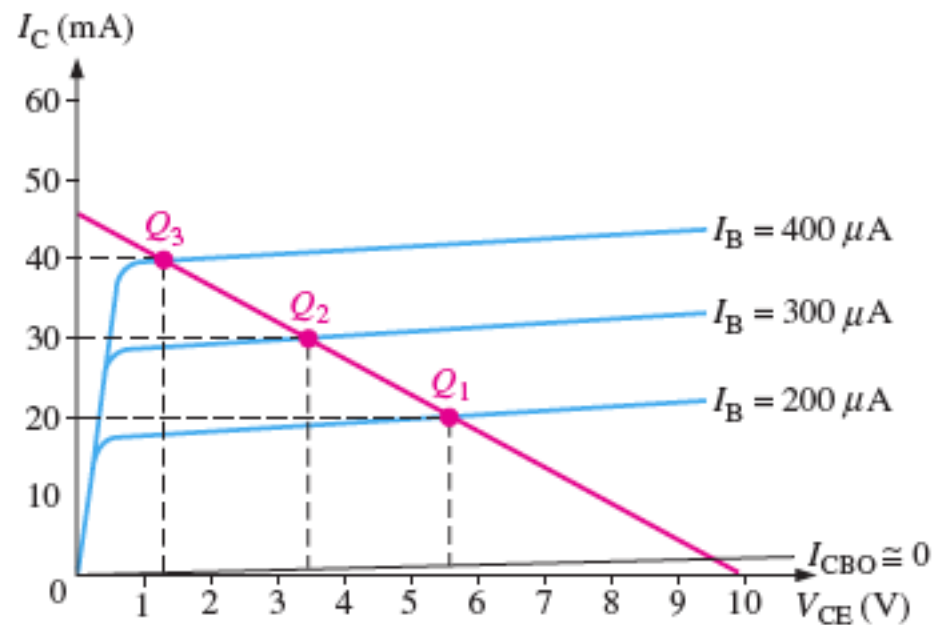


Cuando solo opera la fuente DC

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - 0.7\text{ V}}{R_B} = \frac{3.7\text{ V} - 0.7\text{ V}}{10\text{ k}\Omega} = 300\ \mu\text{A}$$

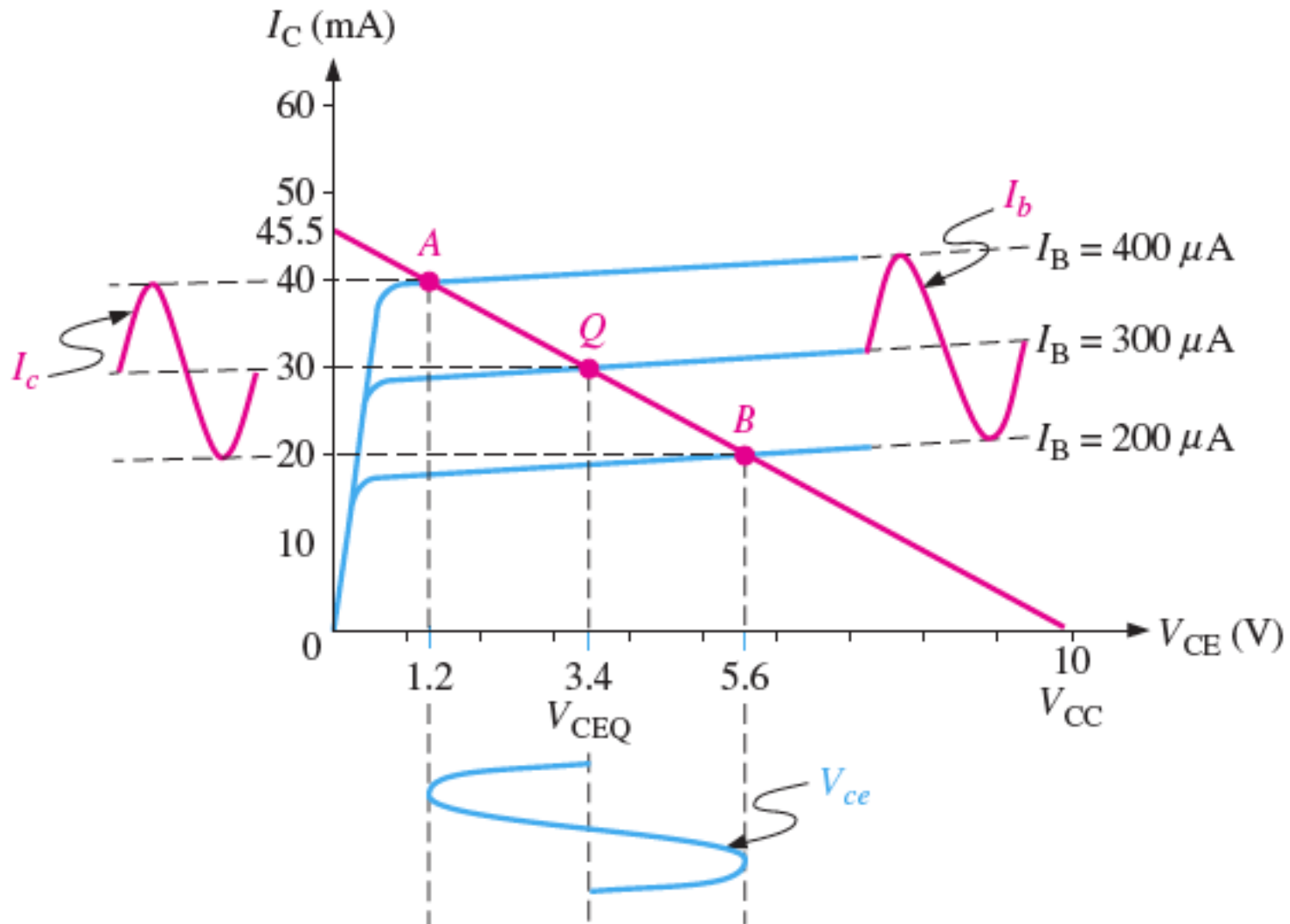
$$I_{CQ} = \beta_{DC} I_{BQ} = (100)(300\ \mu\text{A}) = 30\text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 10\text{ V} - (30\text{ mA})(220\ \Omega) = 3.4\text{ V}$$



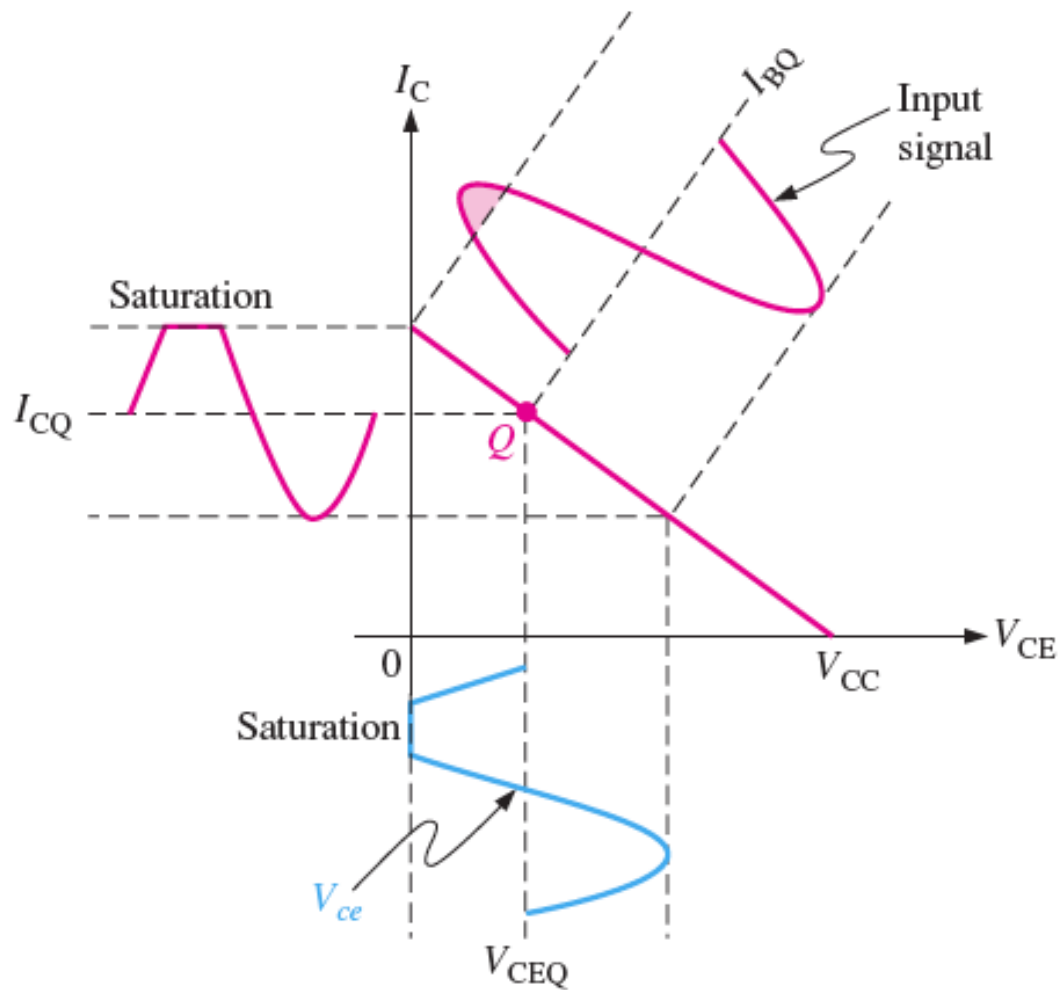
EL TRANSISTOR BJT COMO AMPLIFICADOR LINEAL

Cuando operan ambas fuentes



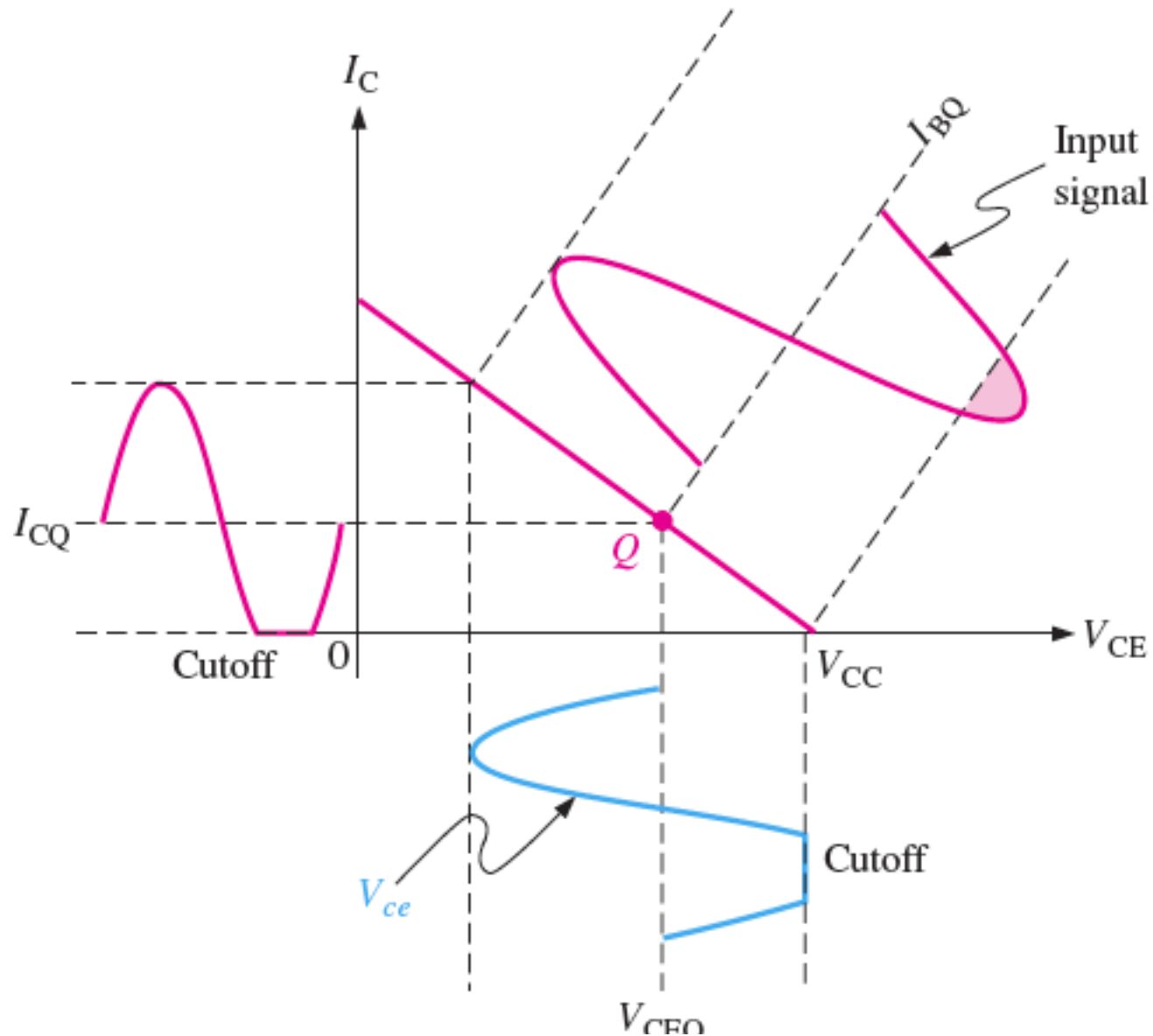
DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA

El punto de operación está cerca de la región de saturación



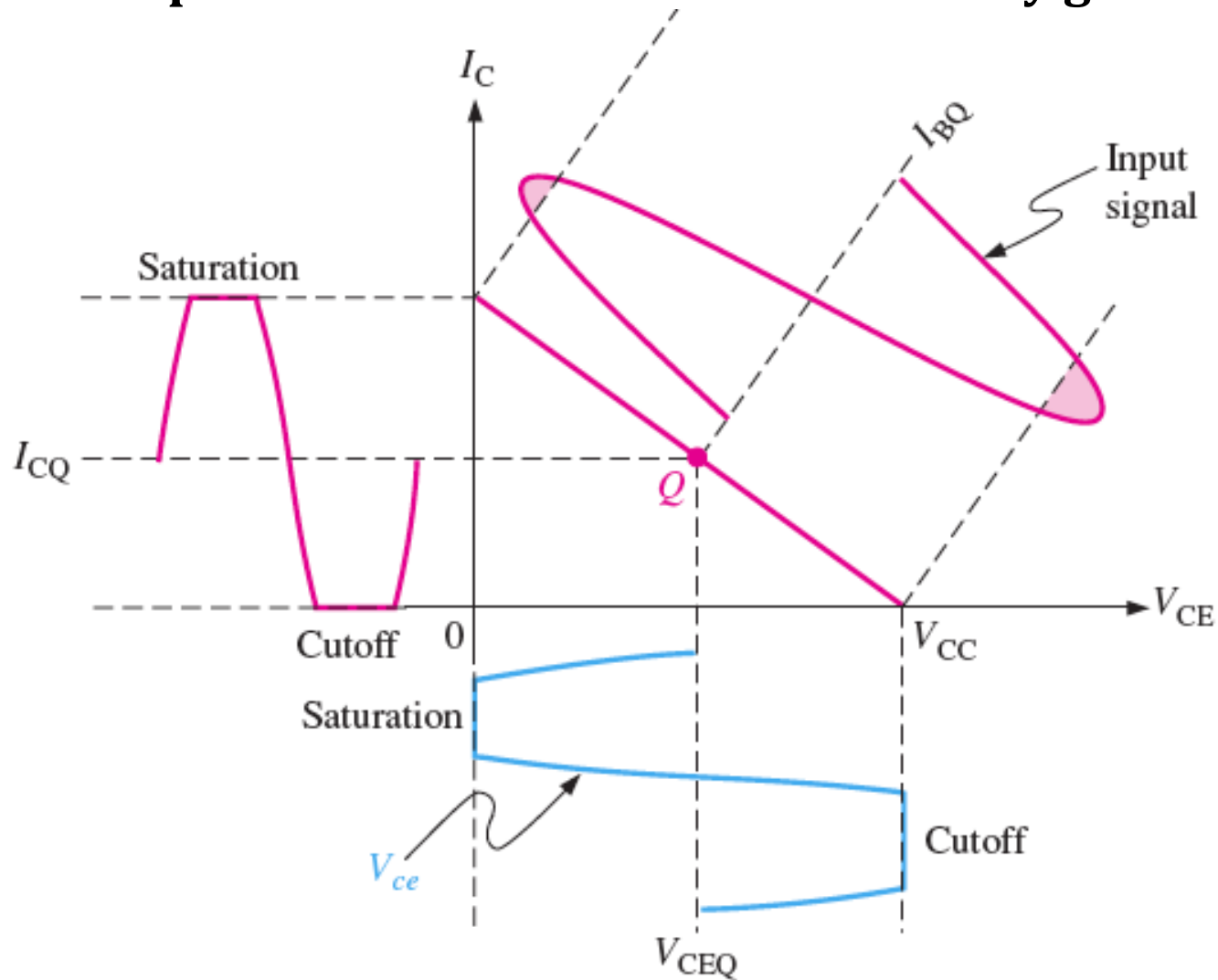
DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA

El punto de operación está cerca de la región de corte



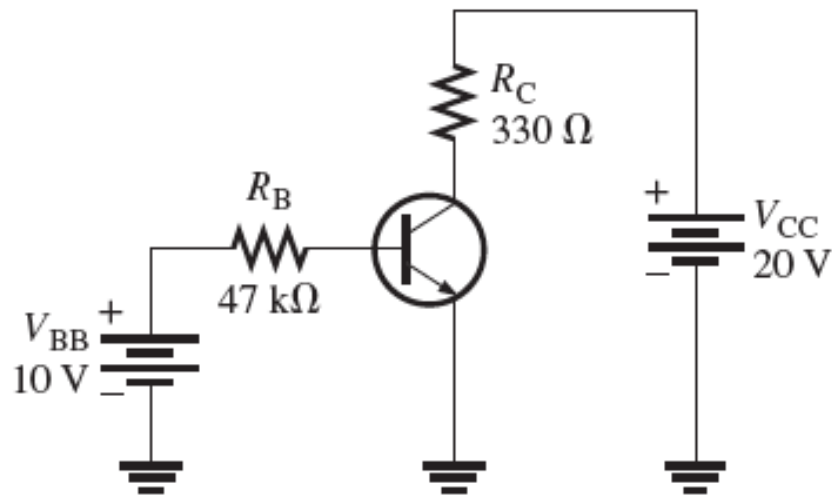
DISTORSIÓN DE LA FORMA DE ONDA

El punto de operación está centrado, pero la amplitud de la señal de entrada es muy grande



EJERCICIO

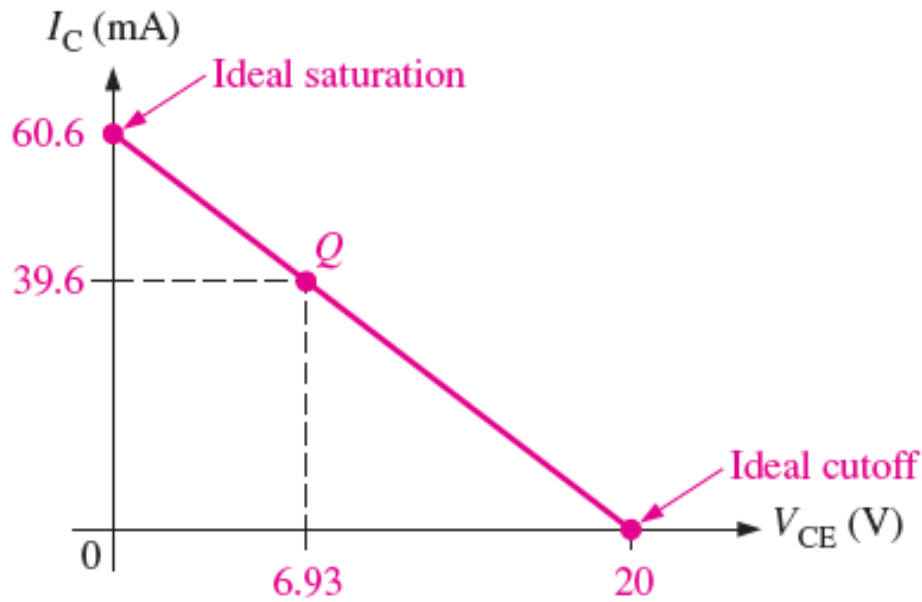
Para el circuito mostrado, determine el punto de operación, dibuje la recta de carga DC y determine el valor pico máximo de la corriente de base que puede aplicarse como señal de entrada, para que el BJT opere en la zona lineal, sin distorsión.



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{47 \text{ k}\Omega} = 198 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta_{DC} I_B = (200)(198 \mu\text{A}) = 39.6 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 20 \text{ V} - 13.07 \text{ V} = 6.93 \text{ V}$$



Desde el punto de operación Q, I_C puede disminuir 39,6 mA.

Pero el límite superior lo fija la corriente de saturación.

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{20 \text{ V}}{330 \Omega} = 60.6 \text{ mA}$$

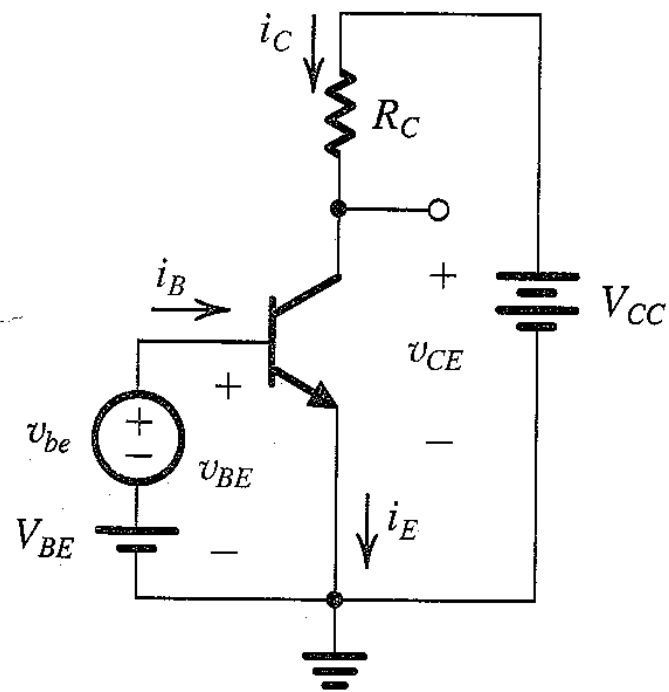
Por lo tanto: $I_{C(\text{sat})} - I_{CQ} = 60.6 \text{ mA} - 39.6 \text{ mA} = 21.0 \text{ mA}$

La excursión máxima de la corriente I_C puede ser de 21 mA.

En realidad es menor porque V_{CEQ} no es cero

EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR: TRANSCONDUCTANCIA g_m

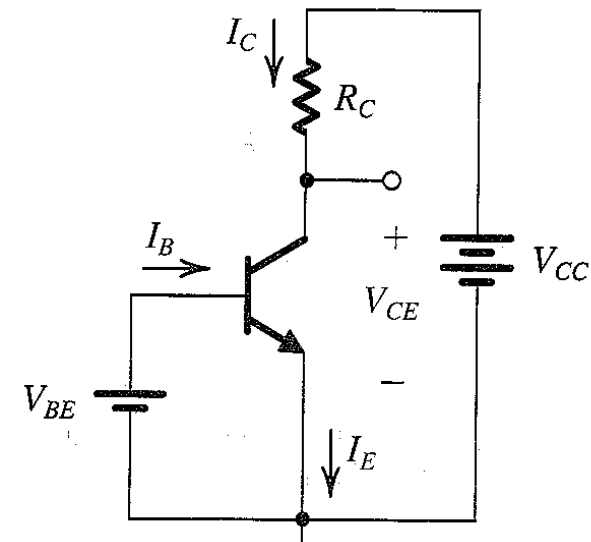
Circuito con fuentes DC y AC



$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad I = I_S e^{v/v_T}$$

$$i_C = I_C + i_c$$

Circuito solo con fuente DC



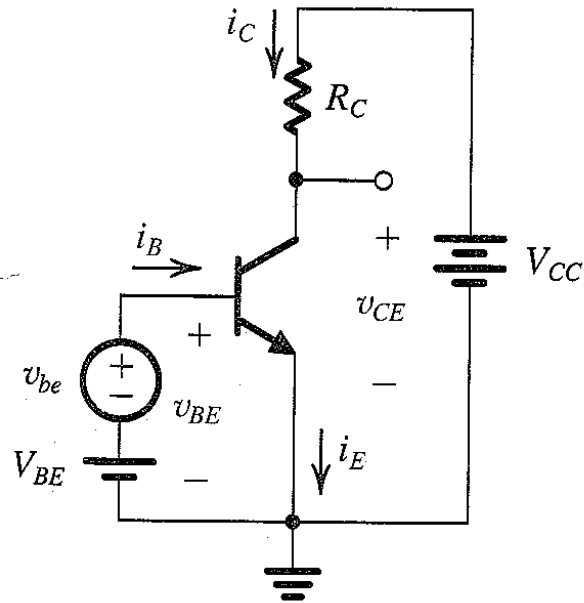
$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_E = I_C / \alpha$$

$$I_B = I_C / \beta$$

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

EL TRANSISTOR COMO AMPLIFICADOR: TRANSCONDUCTANCIA g_m



$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T}$$

$$I_E = I_C / \alpha$$

$$I_B = I_C / \beta$$

$$V_C = V_{CE} \approx V_{CC} - I_C R_C$$

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \quad i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} = I_S e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T}$$

$$= I_S e^{(V_{BE}/V_T)} e^{(v_{be}/V_T)}$$

$$i_C = I_C e^{v_{be}/V_T}$$

Serie de Taylor

$$i_C \approx I_C \left(1 + \frac{v_{be}}{V_T} \right)$$

$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

$$i_c = g_m v_{be}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

CORRIENTE DE BASE Y RESISTENCIA DE ENTRADA POR LA BASE

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} \qquad i_B = I_B + i_b$$

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} \quad \text{Sustituyendo } I_C / V_T \text{ por } g_m \qquad i_b = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

La resistencia de entrada por la base en el modelo de pequeña señal se define

$$r_\pi \equiv \frac{v_{be}}{i_b}$$

Por lo tanto

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

CORRIENTE DE EMISOR Y RESISTENCIA DE ENTRADA POR EL EMISOR

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha} + \frac{i_c}{\alpha} \qquad i_E = I_E + i_e \qquad i_e = \frac{i_c}{\alpha} = \frac{I_C}{\alpha V_T} v_{be} = \frac{I_E}{V_T} v_{be}$$

La resistencia de entrada por el emisor en el modelo de pequeña señal se define

$$r_e \equiv \frac{v_{be}}{i_e} \qquad r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

Recordando que $g_m = \frac{I_C}{V_T}$

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

Para hallar la relación entre r_π y r_e
Por lo tanto:

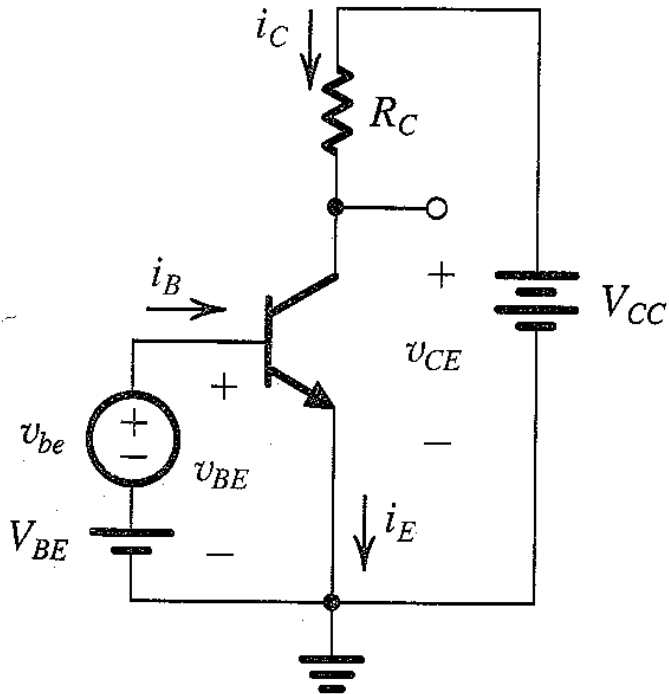
$$v_{be} = i_b r_\pi = i_e r_e$$

$$r_\pi = (i_e / i_b) r_e$$

$$r_\pi = (\beta + 1) r_e$$

GANANCIA DE VOLTAJE

Voltaje de salida



$$\begin{aligned}v_C &= V_{CC} - i_C R_C \\ &= V_{CC} - (I_C + i_c) R_C \\ &= (V_{CC} - I_C R_C) - i_c R_C \\ &= V_C - i_c R_C\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_c &= -i_c R_C = -g_m v_{be} R_C \\ &= (-g_m R_C) v_{be}\end{aligned}$$

$$A_v \equiv \frac{v_c}{v_{be}} = -g_m R_C$$

$$A_v = -\frac{I_C R_C}{V_T}$$

RESUMEN DE FÓRMULAS PARA LOS PARÁMETROS DEL BJT

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B} \quad r_e = \frac{V_T}{I_E} \quad r_e = \frac{\alpha}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$r_\pi = (\beta + 1)r_e \quad A_v \equiv \frac{v_c}{v_{be}} = -g_m R_C$$

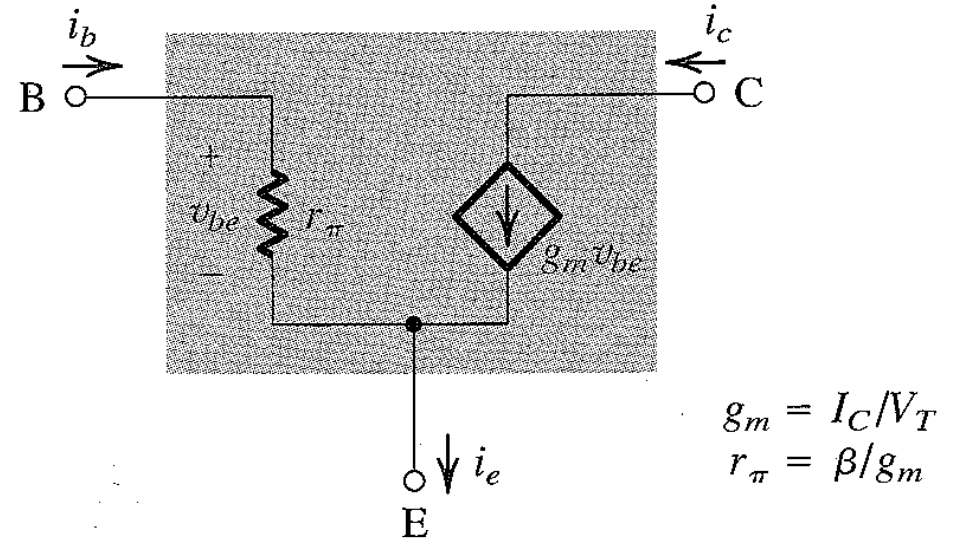
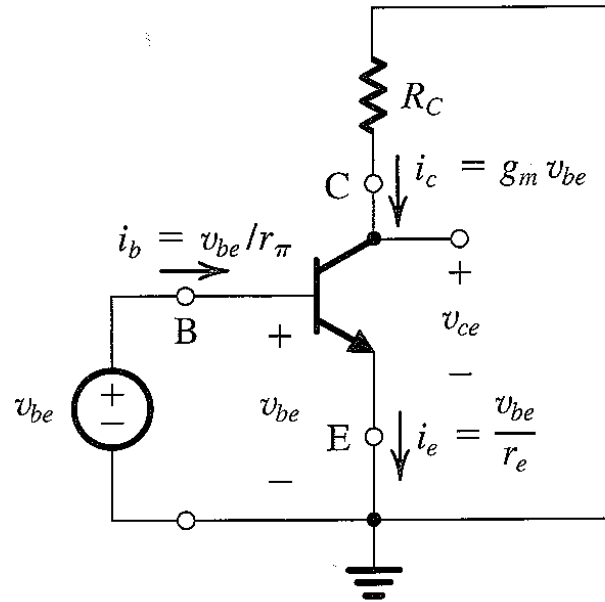
Se puede escribir también:

$$A_v = -\frac{I_C}{V_T} R_C = -\frac{\beta I_B}{V_T} R_C = -\frac{I_C}{V_T} R_C = -\frac{\beta R_C}{r_\pi}$$

$$A_v = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} \quad A_v = -\frac{\alpha R_C}{r_e}$$

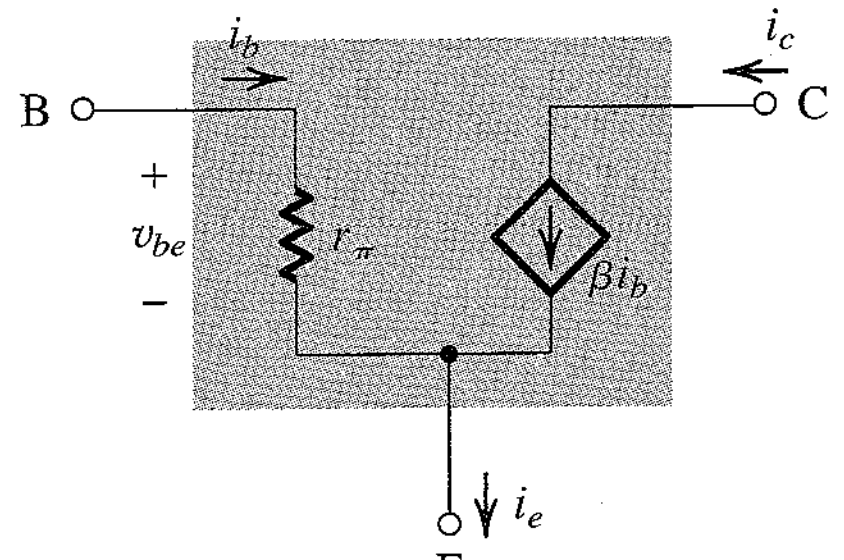
MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL: EL MODELO HÍBRIDO π BÁSICO

Se eliminan las fuentes DC



El modelo también aplica para transistores pnp sin cambio de polaridades

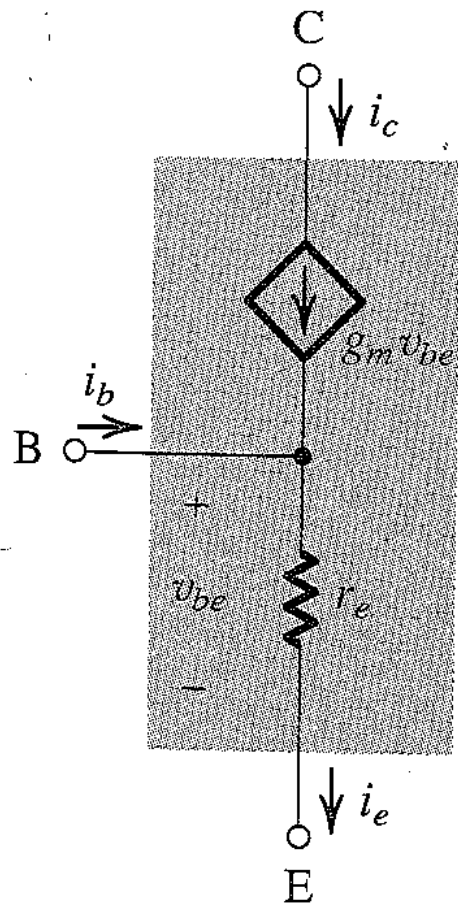
$$g_m v_{be} = g_m r_{\pi} i_b = \beta i_b$$



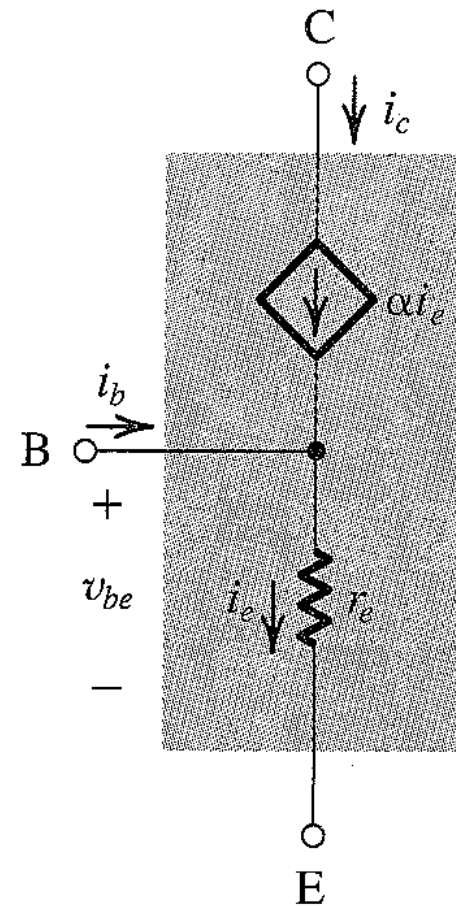
MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL: EL MODELO T

Se eliminan las fuentes DC

Este modelo muestra explícitamente la resistencia de emisor r_e en lugar de la resistencia de base r_π



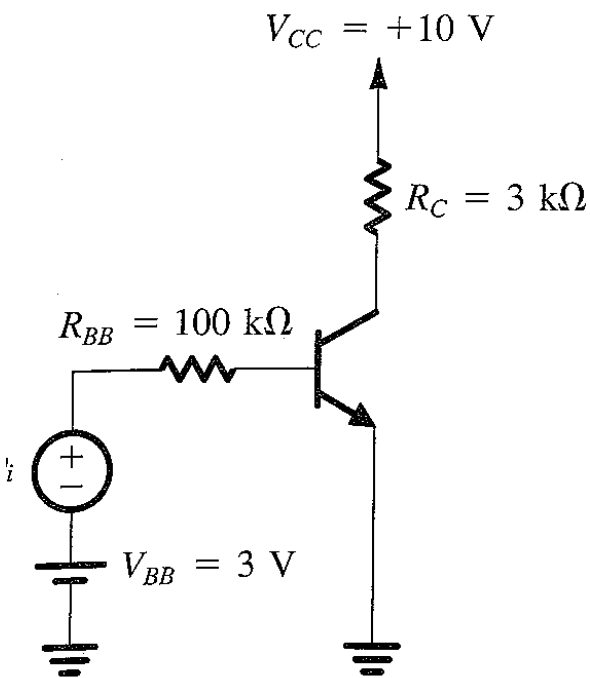
$$g_m = I_C / V_T$$
$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$$



APLICACIÓN DE LOS MODELOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL

- 1.- Determinar el punto de operación del BJT considerando solo las fuentes DC.
- 2.- Calcular los valores de los parámetros de pequeña señal: g_m , r_π , r_e
- 3.- Eliminar las fuentes DC sustituyendo las fuentes de voltaje por un cortocircuito y las fuentes de corriente por un circuito abierto.
- 4.- Reemplazar el BJT por uno de sus modelos de pequeña señal.
- 5.- Resolver el circuito para obtener las variables deseadas. Por lo general, aparte de calcular voltajes y corrientes en puntos específicos, hay que determinar la ganancia de voltaje, la ganancia de corriente, la resistencia de entrada y la resistencia de salida del amplificador.

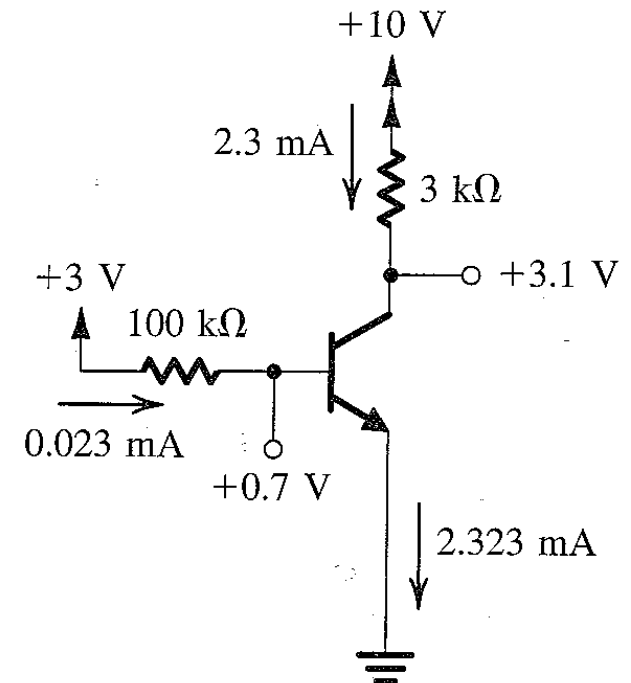
EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS EQUIVALENTES DE PEQUEÑA SEÑAL 1ª PARTE: ANÁLISIS DC



$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} \approx \frac{3 - 0.7}{100} = 0.023 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 100 \times 0.023 = 2.3 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = +10 - 2.3 \times 3 = +3.1 \text{ V}$$

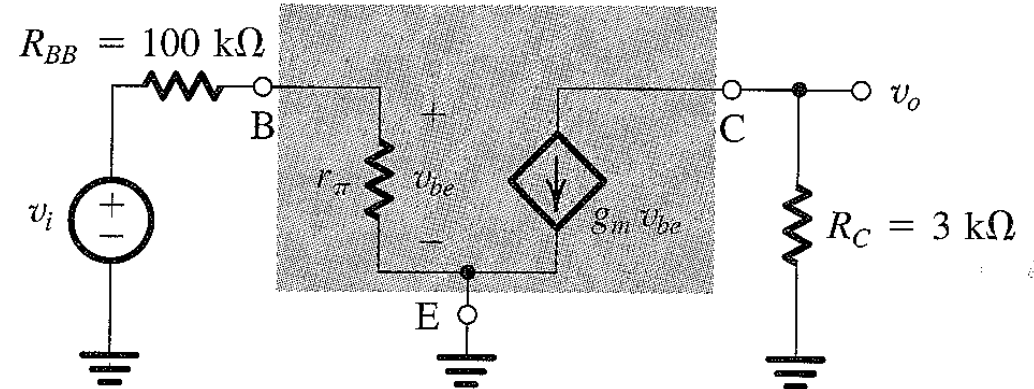


2ª PARTE: ANÁLISIS AC DE PEQUEÑA SEÑAL

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{(2.3/0.99) \text{ mA}} = 10.8 \Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2.3 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 92 \text{ mA/V}$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{92} = 1.09 \text{ k}\Omega$$



$$v_{be} = v_i \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{BB}} = v_i \frac{1.09}{101.09} = 0.011 v_i$$

$$v_o = -g_m v_{be} R_C = -92 \times 0.011 v_i \times 3 = -3.04 v_i$$

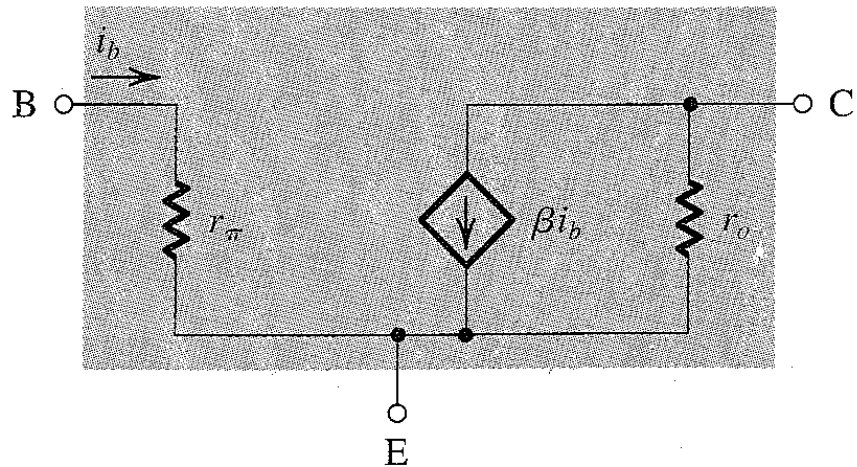
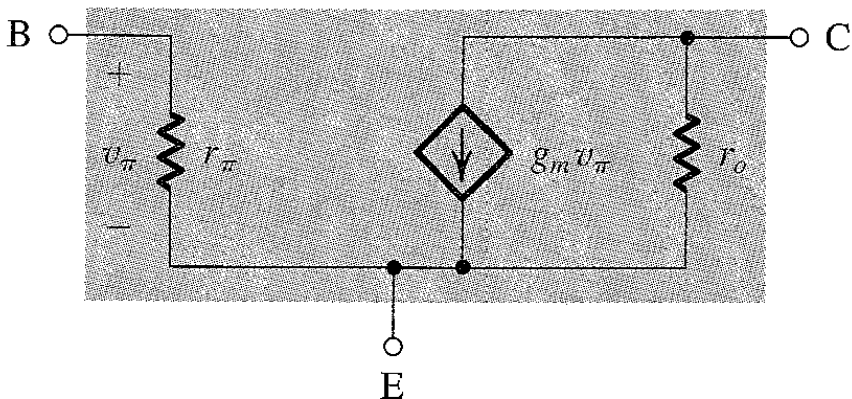
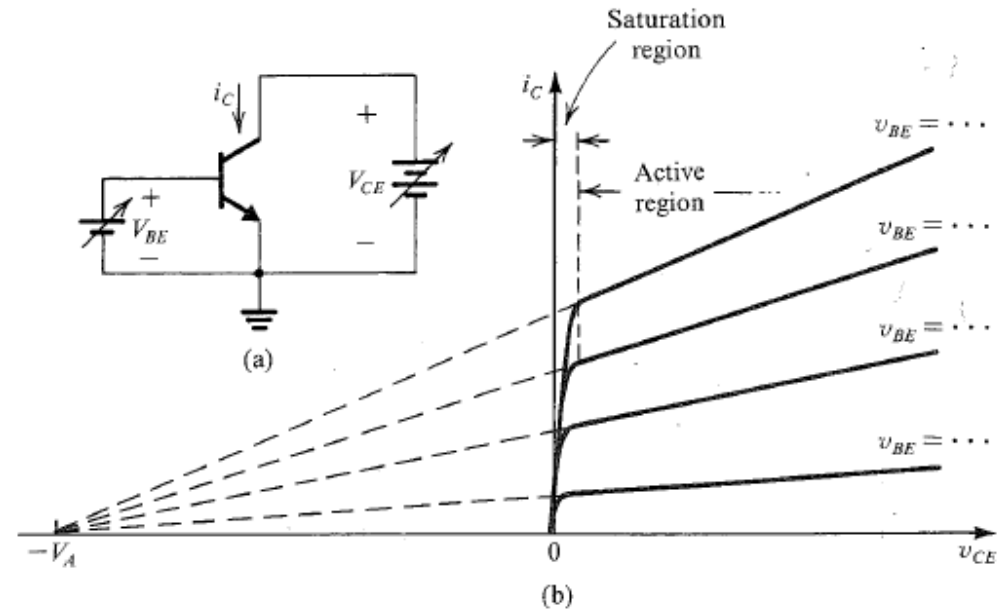
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -3.04 \text{ V/V}$$

EL EFECTO EARLY EN LOS MODELOS DE PEQUEÑA SEÑAL

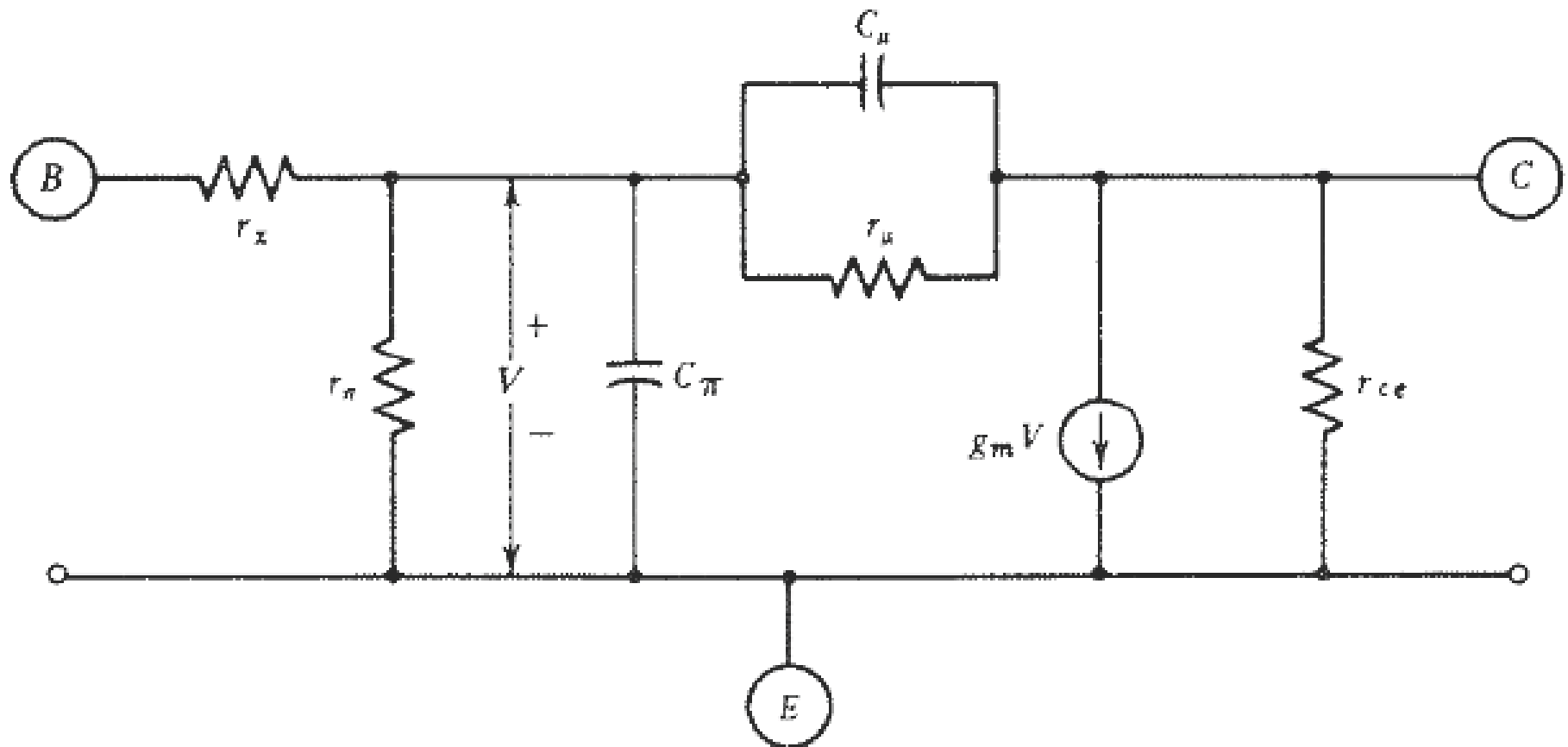
La corriente de colector I_C también depende de v_{CE}

La relación entre I_C y v_{CE} es una resistencia cuyo valor es $(V_A + V_{CE}) / I_C \approx V_A / I_C$

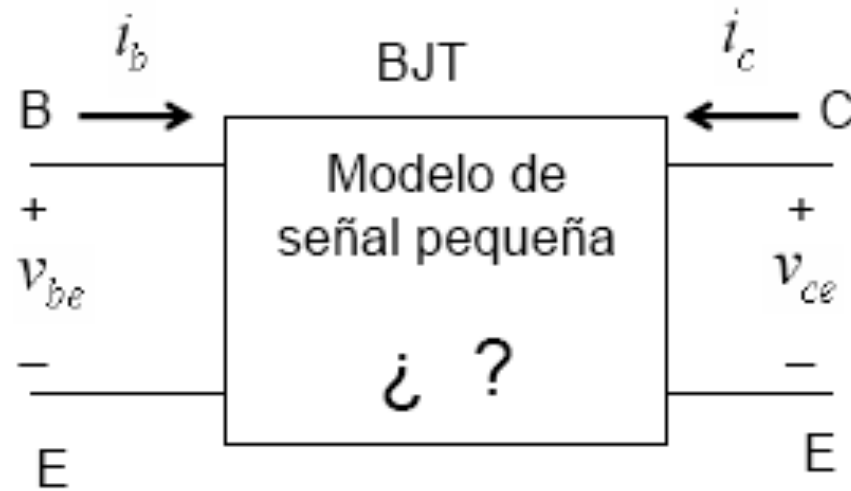
Esta resistencia se coloca en los modelos entre C y E
También se aplica en los modelos T



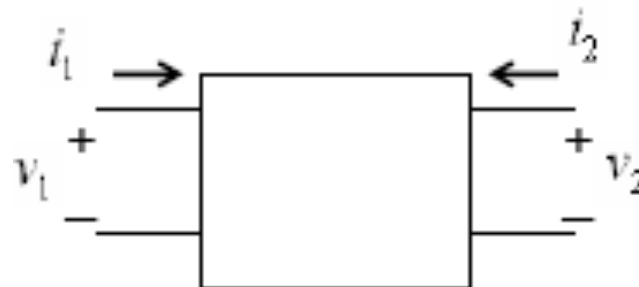
EL MODELO HÍBRIDO π PARA ALTAS FRECUENCIAS



MODELO DE REDES DE DOS PUERTOS



Redes de 2 puertos
(bipuerto)



PARÁMETROS HÍBRIDOS TIPO 1



$$v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2$$

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS HÍBRIDOS SEGÚN LOS CONCEPTOS CLÁSICOS DE IMPEDANCIAS Y GANANCIAS

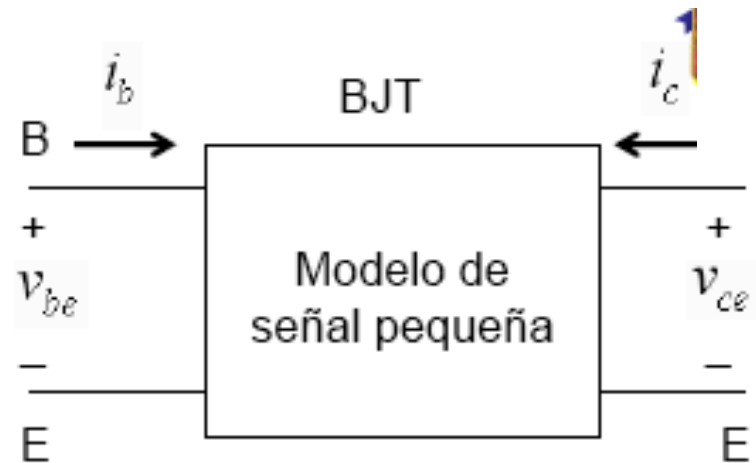
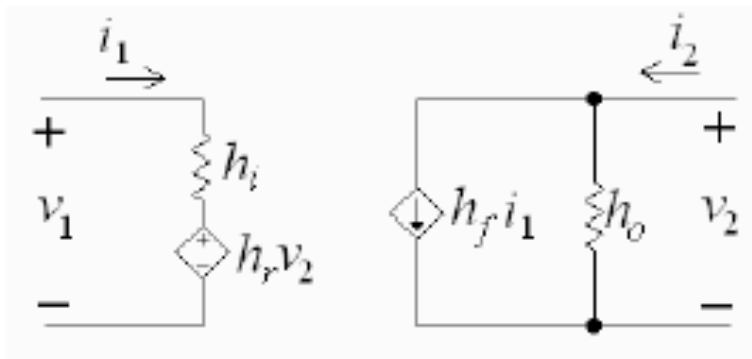
$h_{11} = \left. \frac{v_1}{i_1} \right _{v_2=0}$	Impedancia de entrada con salida en corto circuito INPUT	$\Rightarrow h_i$
$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right _{v_2=0}$	Ganancia directa de corriente con salida en corto circuito FORWARD	$\Rightarrow h_f$
$h_{12} = \left. \frac{v_1}{v_2} \right _{i_1=0}$	Ganancia inversa de voltaje con entrada en circuito abierto REVERSE	$\Rightarrow h_r$
$h_{22} = \left. \frac{i_2}{v_2} \right _{i_1=0}$	Admitancia de salida con entrada en circuito abierto OUTPUT	$\Rightarrow h_o$

MODELO DE PARÁMETROS HÍBRIDOS DE EMISOR COMÚN



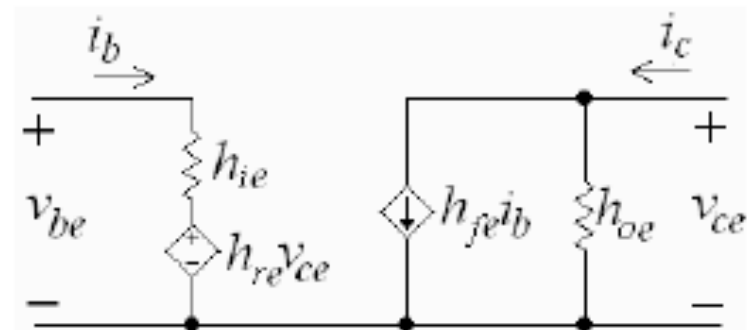
$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2$$



$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$



CARACTERÍSTICAS DE PEQUEÑA SEÑAL

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

Current - Gain - Bandwidth Product ($I_C = 10 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 20 \text{ V dc}$, $f = 100 \text{ MHz}$)	2N3903 2N3904	f_T	250 300	- -	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 5.0 \text{ V dc}$, $I_E = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)		C_{obo}	-	4.0	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5 \text{ V dc}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)		C_{ibo}	-	8.0	pF
Input Impedance ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	h_{ie}	1.0 1.0	8.0 10	k Ω
Voltage Feedback Ratio ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	h_{re}	0.1 0.5	5.0 8.0	$\times 10^{-4}$
Small-Signal Current Gain ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	h_{fe}	50 100	200 400	-
Output Admittance ($I_C = 1.0 \text{ mA dc}$, $V_{CE} = 10 \text{ V dc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)		h_{oe}	1.0	40	μhos
Noise Figure ($I_C = 100 \mu\text{A dc}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V dc}$, $R_S = 1.0 \text{ k } \Omega$, $f = 1.0 \text{ kHz}$)	2N3903 2N3904	NF	- -	6.0 5.0	dB

h PARAMETERS

($V_{CE} = 10 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)

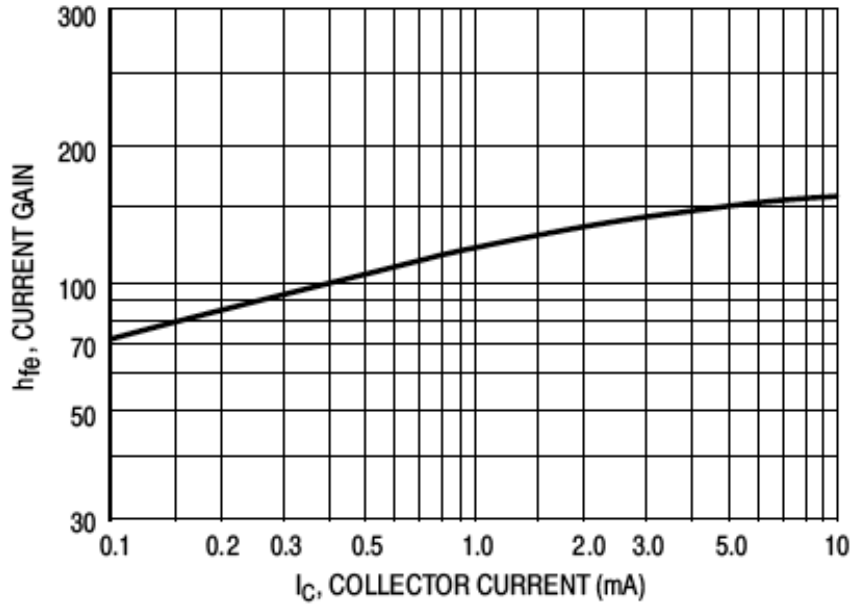


Figure 11. Current Gain

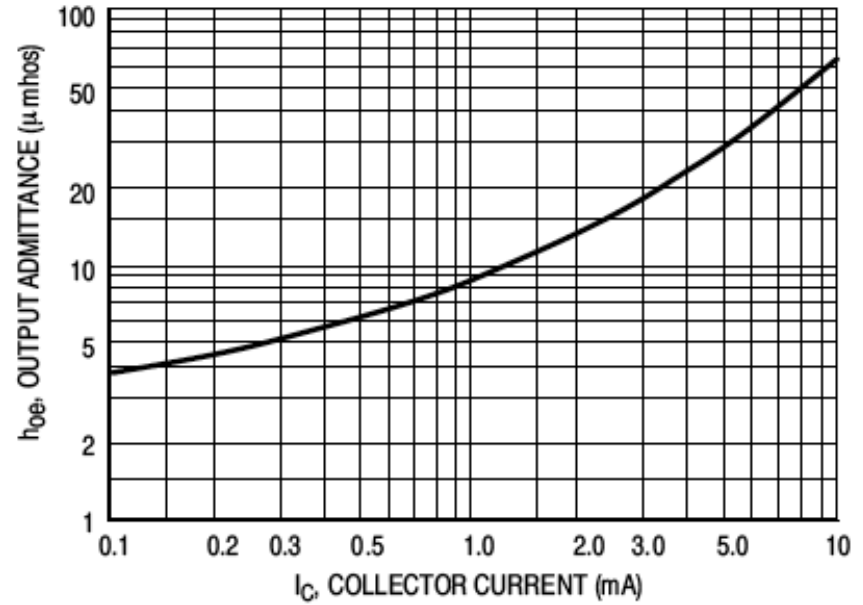


Figure 12. Output Admittance

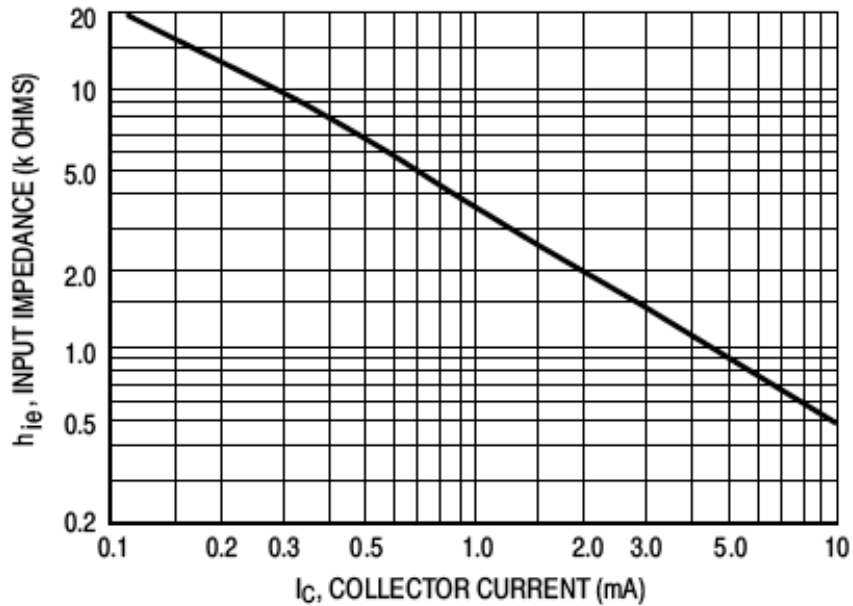


Figure 13. Input Impedance

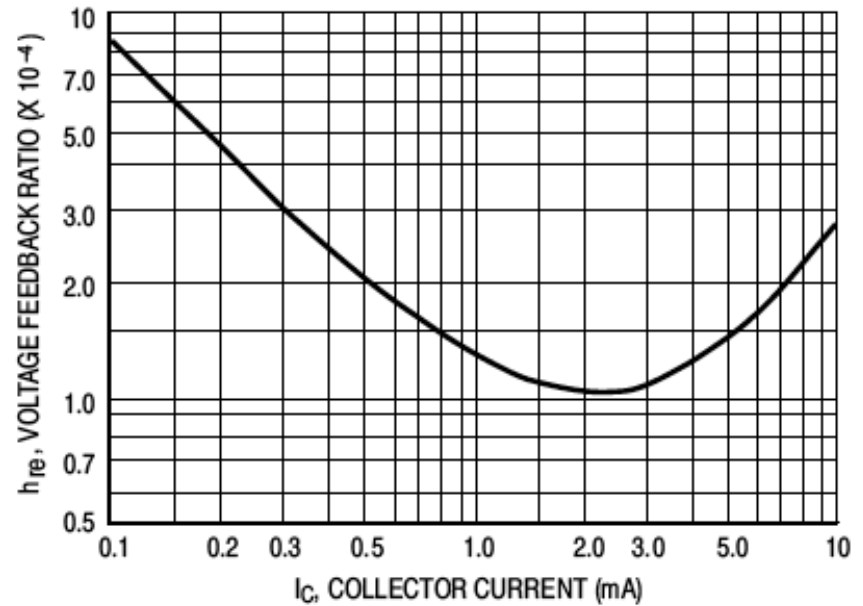
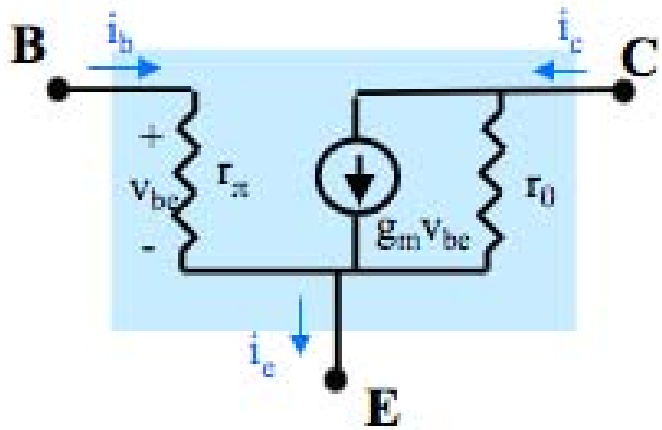
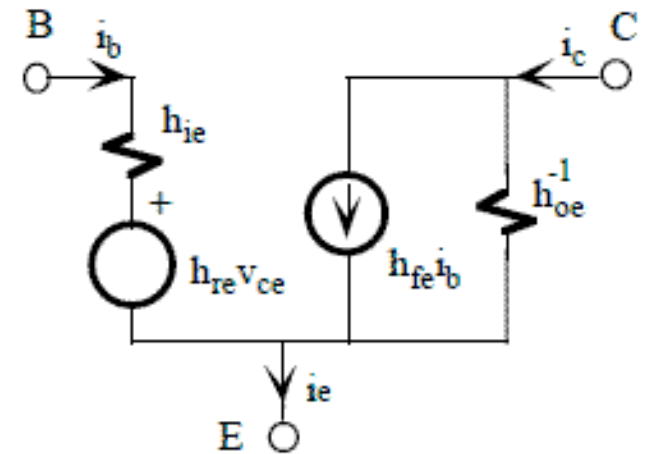


Figure 14. Voltage Feedback Ratio

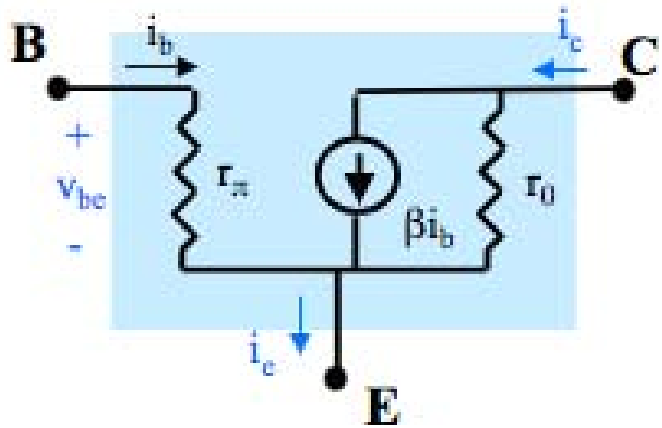
RESUMEN DE LOS MODELOS A APLICAR PARA HACER EL ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL DE UN TRANSISTOR BJT



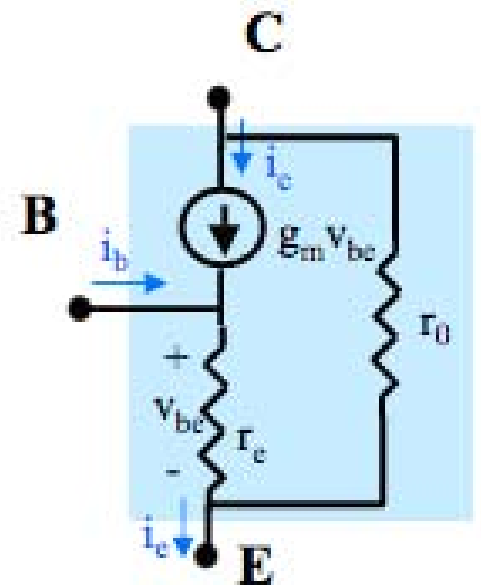
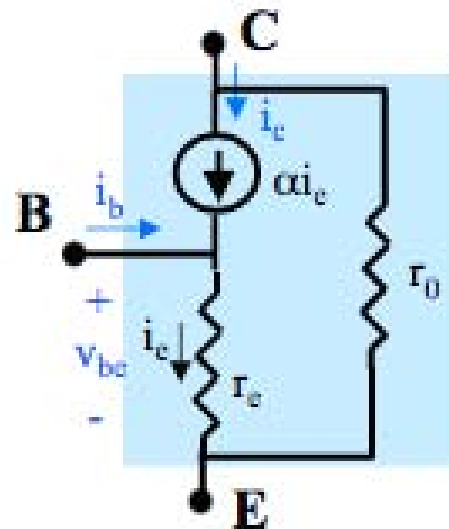
MODELO HIBRIDO π



MODELO T



MODELO π



ANÁLISIS DE LAS CONFIGURACIONES DE AMPLIFICADORES PARA TRANSISTORES BJT

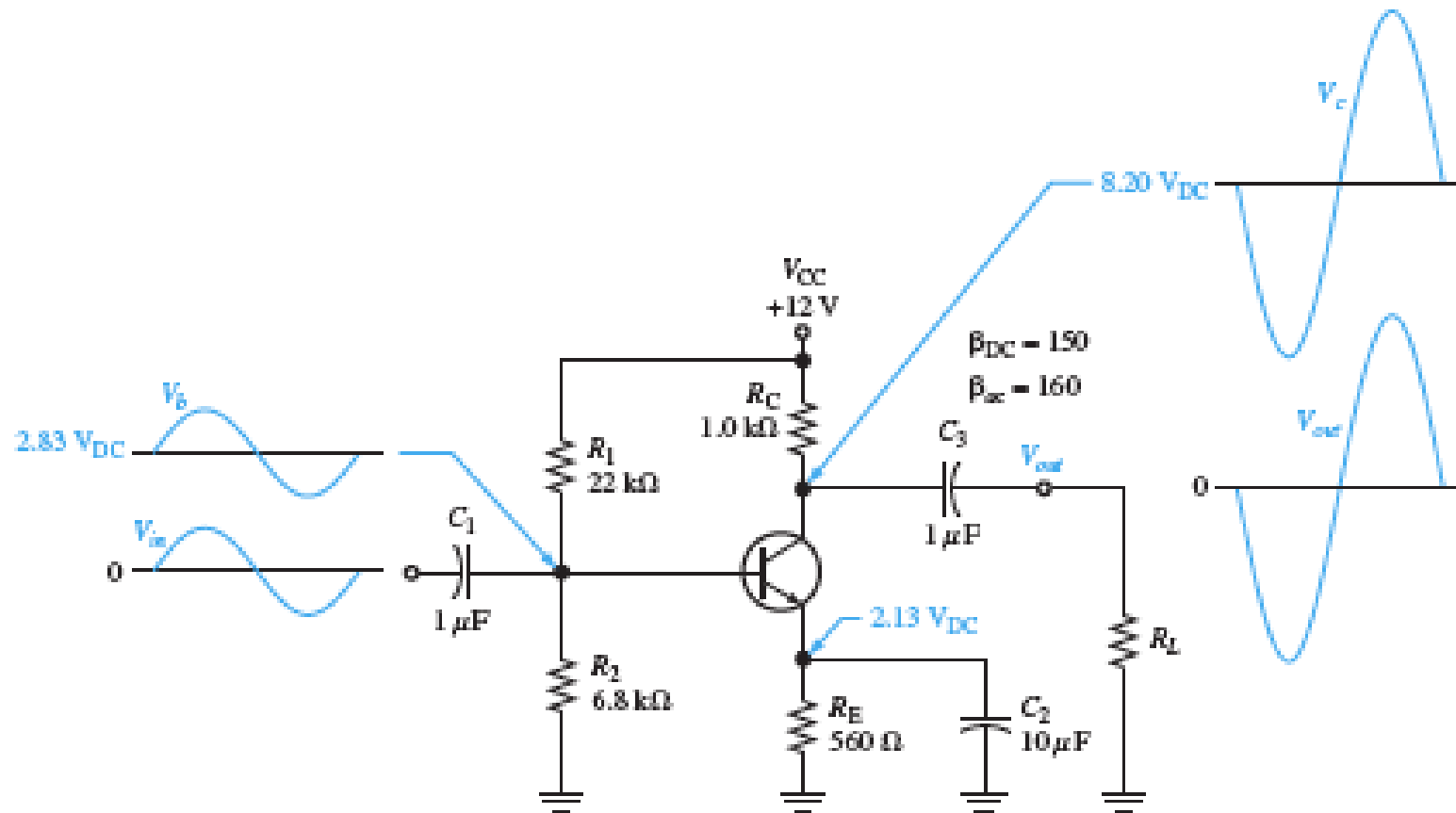
Hay tres configuraciones básicas, que se obtienen de considerar uno de los tres terminales como referencia y entonces aplicar la entrada entre el segundo terminal y la referencia y observar la salida entre el tercer terminal y la referencia:

- *Emisor Común: Entrada por Base, salida por Colector
- *Colector Común: Entrada por Base, salida por Emisor
- *Base Común: Entrada por Emisor, salida por Colector

Para cada configuración hay que calcular:

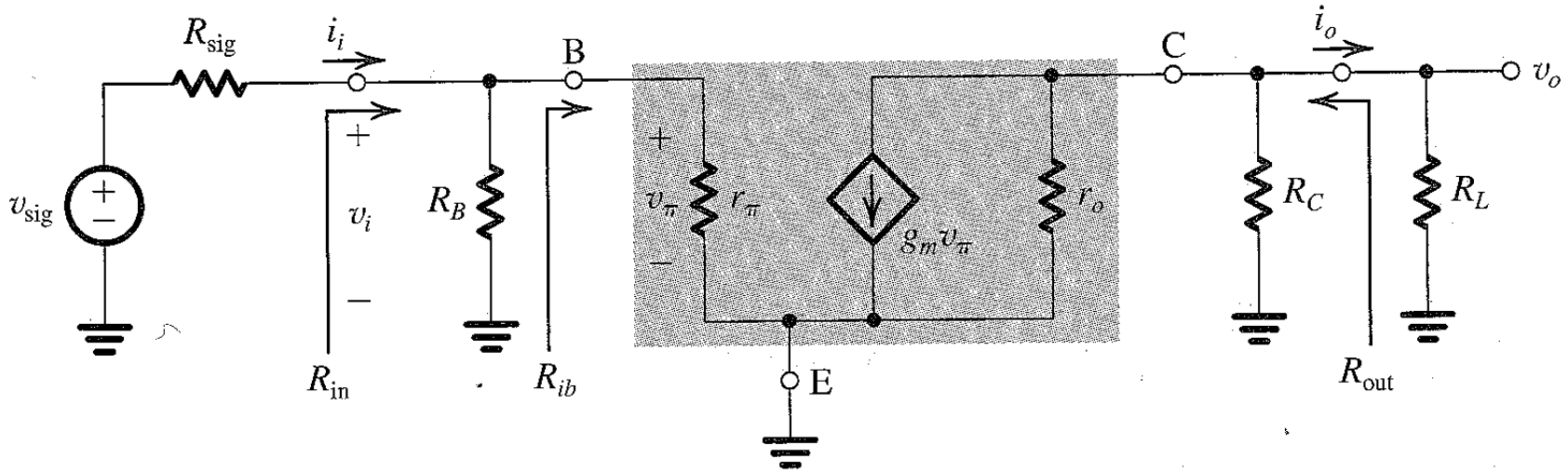
- *La ganancia de voltaje
- *La impedancia de entrada
- *La impedancia de salida
- *La ganancia de corriente
- *La ganancia de potencia

CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN



¿Para qué son los condensadores? Para acoplamiento de las señales AC
Se considera que para la frecuencias de operación se comportan como cortocircuitos.

MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN



**Resistencia
de entrada**

$$R_{in} \equiv \frac{v_i}{i_i} = R_B \parallel R_{ib}$$

$$R_{ib} = r_\pi$$

$$R_{in} \cong r_\pi$$

Voltaje de entrada al amplificador

$$v_\pi = v_i$$

$$v_i = v_{sig} \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} = v_{sig} \frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B + r_\pi) + R_{sig}} \cong v_{sig} \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}}$$

En la salida $v_o = -g_m v_\pi (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$

Si $v_i = v_\pi$ $A_v = -g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$

Si la carga no está conectada $A_{vo} = -g_m (r_o \parallel R_C)$

$$A_{vo} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi} = -\frac{\alpha R_C}{r_e}$$

Resistencia de salida $R_{out} = R_C \parallel r_o$

La ganancia cuando se conecta una R_L específica

$$A_v = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

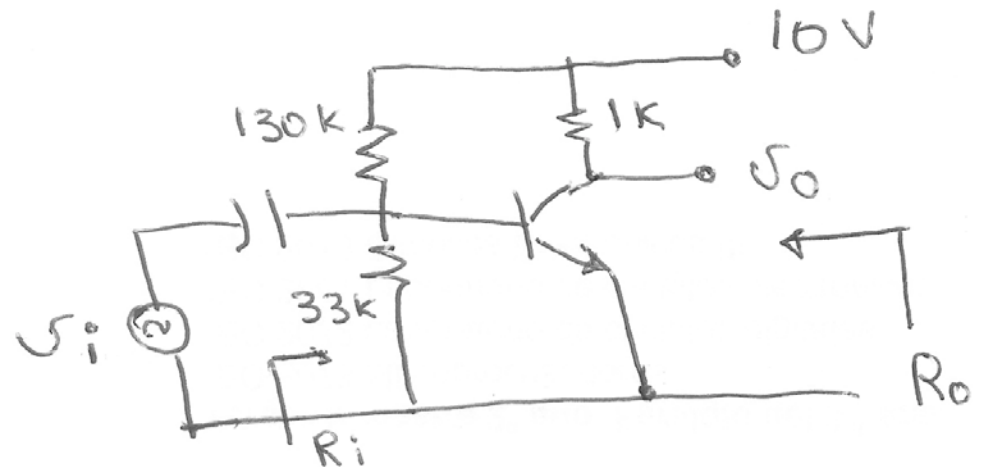
- 1.- La ganancia de voltaje A_v es elevada**
- 2.- La resistencia de entrada R_{in} es baja**
- 3.- La resistencia de salida R_{out} es alta**

EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

En el siguiente amplificador, calcule A_v , R_i y R_o .

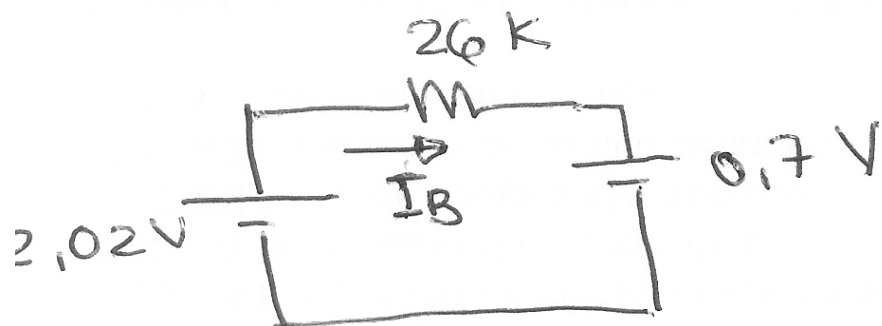
$$\beta = 100, V_{BE} = 0,7V$$

Polarización



$$V_{BB} = \frac{33k}{33k + 130k} \times 10V = 2,02V$$

$$R_B = 33k \parallel 130k = 26,3k$$



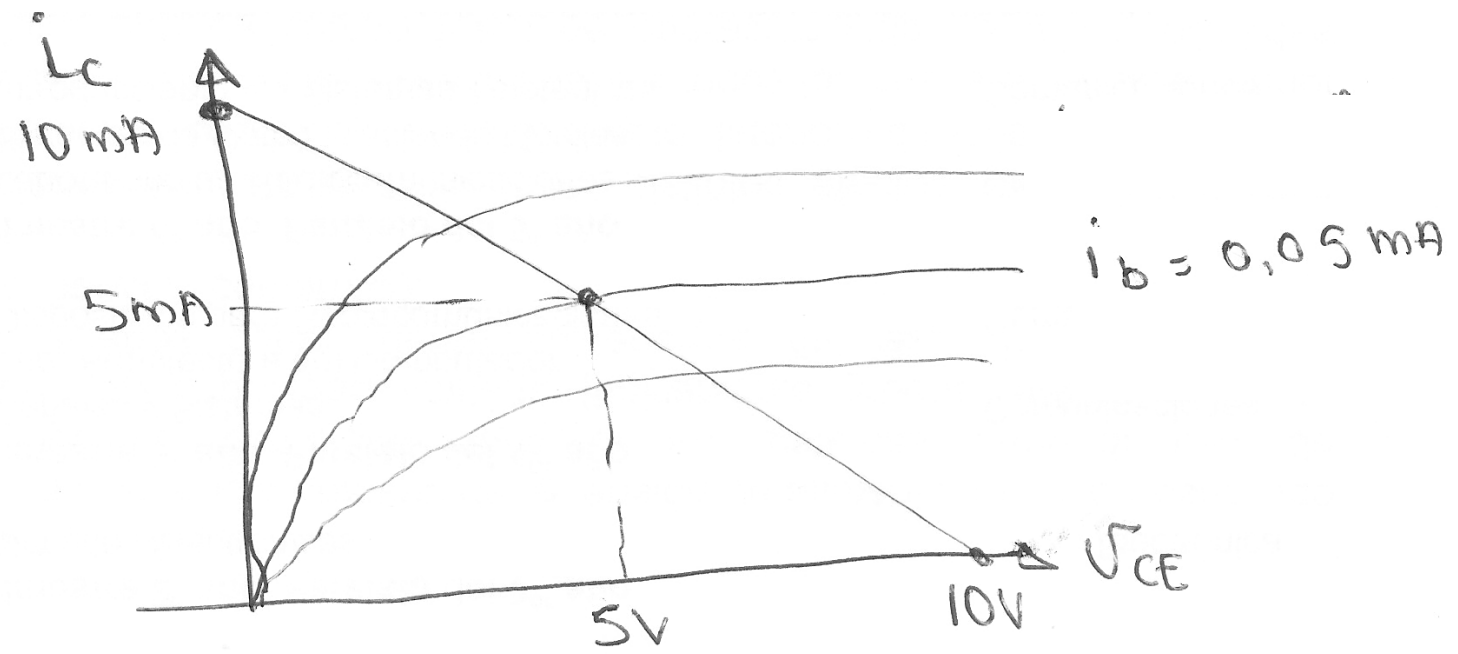
$$I_B = \frac{2,02V - 0,7V}{26k} = 0,05mA$$

$$I_c = \beta I_B = 100 \times 0,05 \text{ mA} = 5 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 \text{ V} - 5 \text{ mA} \times 1 \text{ k} = 5 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 5 \text{ V}$$

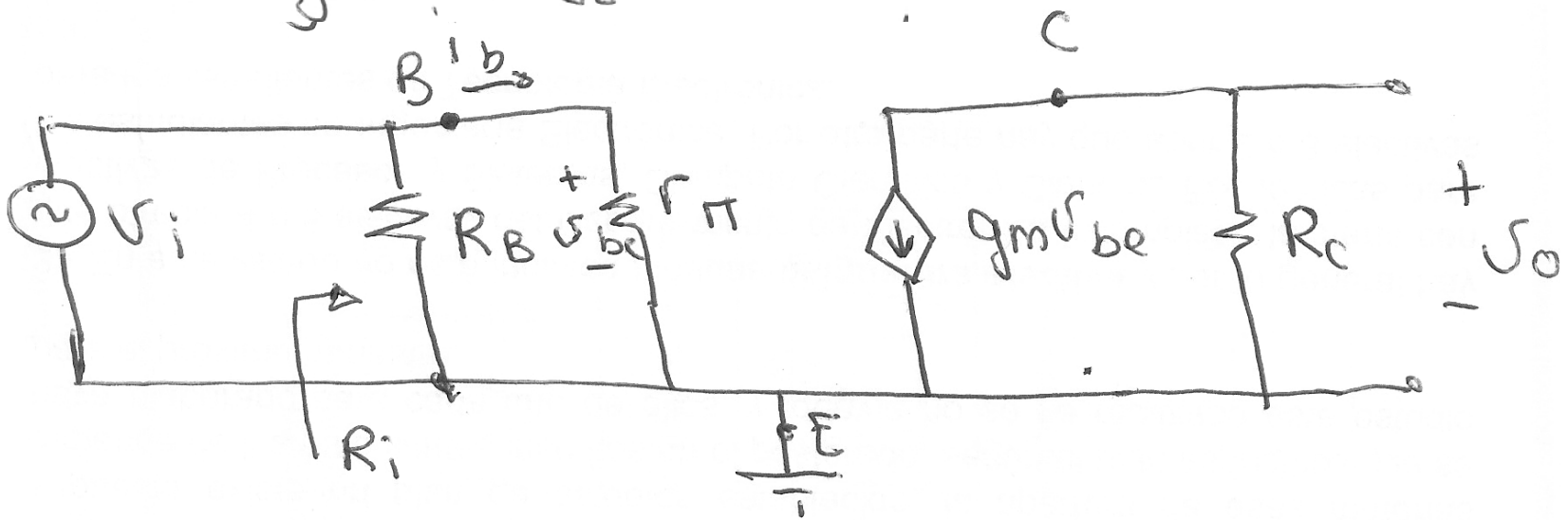
$$I_{CQ} = 5 \text{ mA}$$



Análisis de pequeña señal. Modelo π

$$g_m = \frac{I_c}{V_T} = \frac{5 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = \frac{0,005 \text{ A}}{0,025 \text{ V}} = 0,2 \frac{1}{\Omega}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{0,2 \frac{1}{\Omega}} = 500 \Omega$$



Ganancia de voltaje

$$V_o = -g_m V_{be} R_c =$$

$$= -0,2 \frac{1}{\Omega} \cdot 1000 \Omega V_{be} = -200 V_{be}$$

$$V_i = V_{be}$$

$$V_o = -200 V_i$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -200$$

Si en lugar de la fuente $g_m V_{be}$ se coloca βi_b resulta:

$$V_o = -\beta i_b R_c = -\beta 1k i_b$$

$$i_b = \frac{V_i}{r_{\pi}} = \frac{V_i}{500}$$

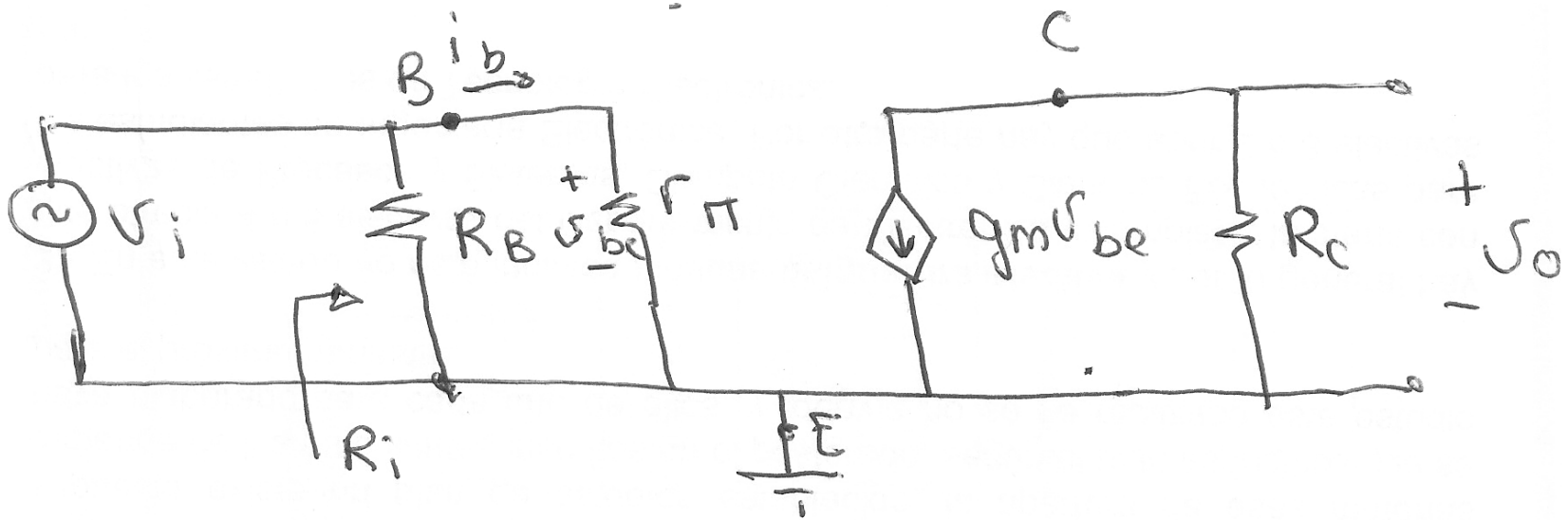
$$V_o = -100 \frac{1000}{500} V_i = -200 V_i$$

Alta ganancia de voltaje

Si $V_{opico} = 5V$ entonces

$V_{ipico} = 0,025V = 25mV$

Resistencia de entrada



$$R_i = R_B \parallel r_\pi \text{ Baja resistencia de entrada}$$

Resistencia de salida

Hay que colocar una Fuente de prueba en la salida y sustituir v_i por un corto. Al hacer esto $v_{be} = 0$, por lo que en la salida solo queda R_C . Por lo tanto:

$$R_o = R_C \text{ Alta resistencia de salida}$$

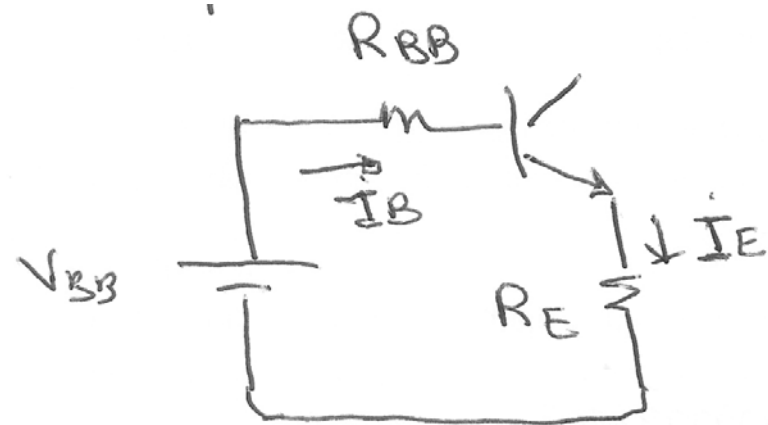
CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR

EJERCICIO

En el siguiente amplificador,
calcule A_v , R_i y R_o .

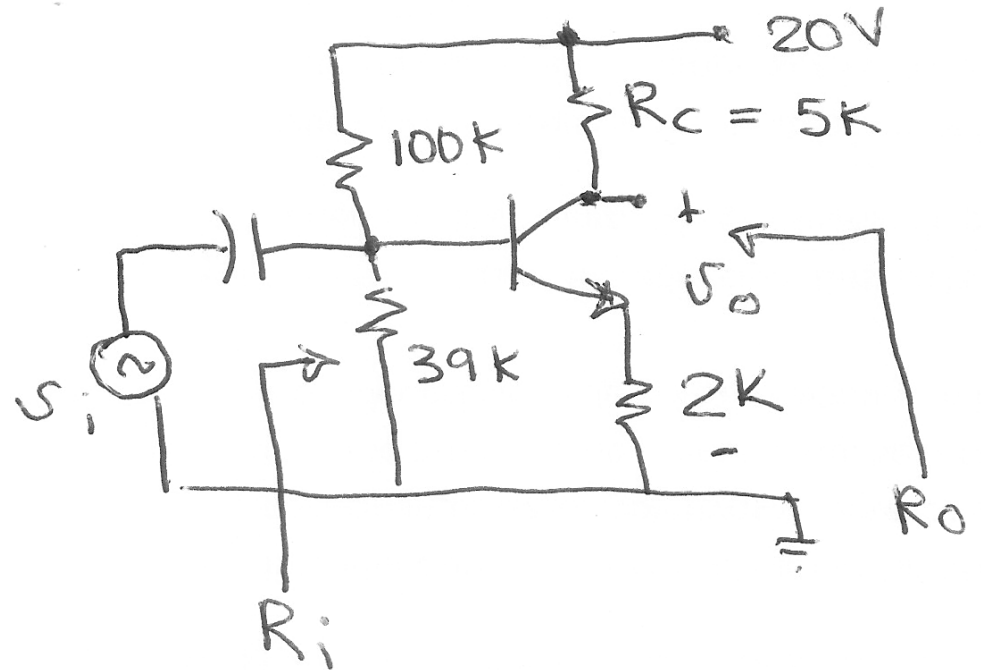
$\beta = 100$, $V_{BE} = 0,7V$

Polarización



$$R_{BB} = 100k \parallel 39k = 28k$$

$$V_{BB} = \frac{39k \times 20}{39k + 100k} = 5,6V$$



$$V_{BB} = I_B R_{BB} + 0,7V + R_E I_E$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

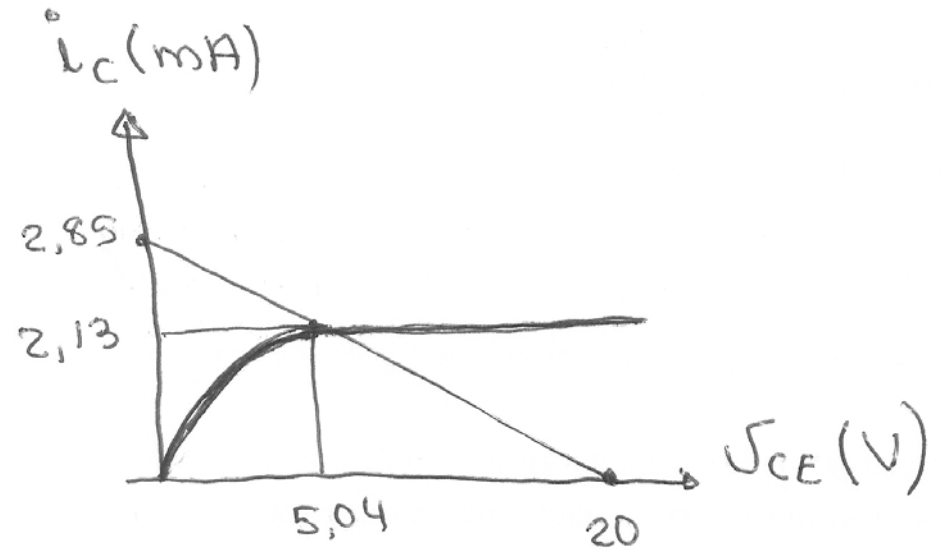
$$V_{BB} = I_B [R_{BB} + R_E (\beta + 1)] + 0,7V$$

$$I_B = \frac{(5,6 - 0,7)V}{28K + 2K(101)} = 0,0213 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 2,13 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 20V - I_C (R_E + R_C) =$$

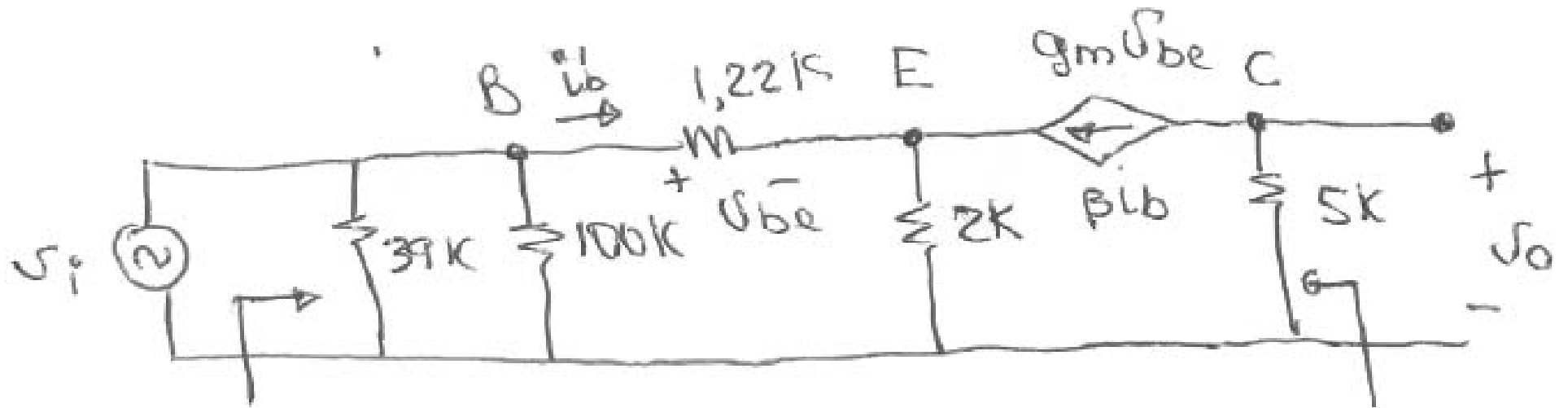
$$= 20 - 7K \times 2,13 \text{ mA} = 5,04V$$



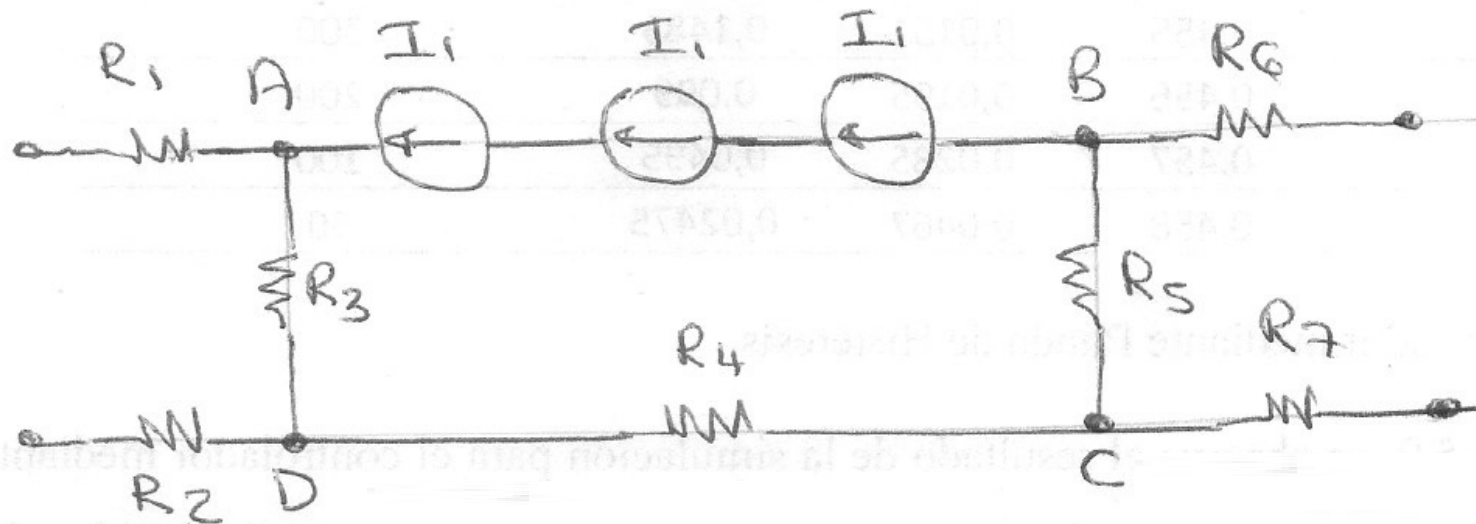
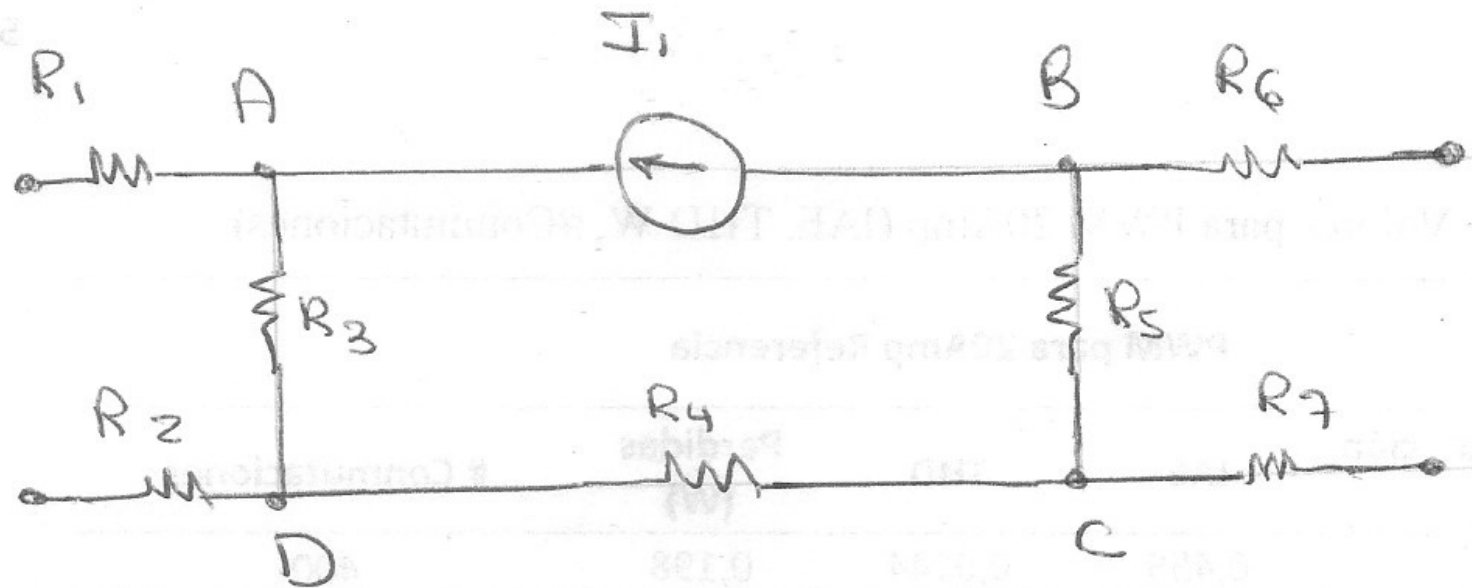
$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2,13 \text{ mA}}{0,026 \text{ V}} = 81,92 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{81,92 \text{ mA/V}} = 1,22 \text{ K}\Omega$$

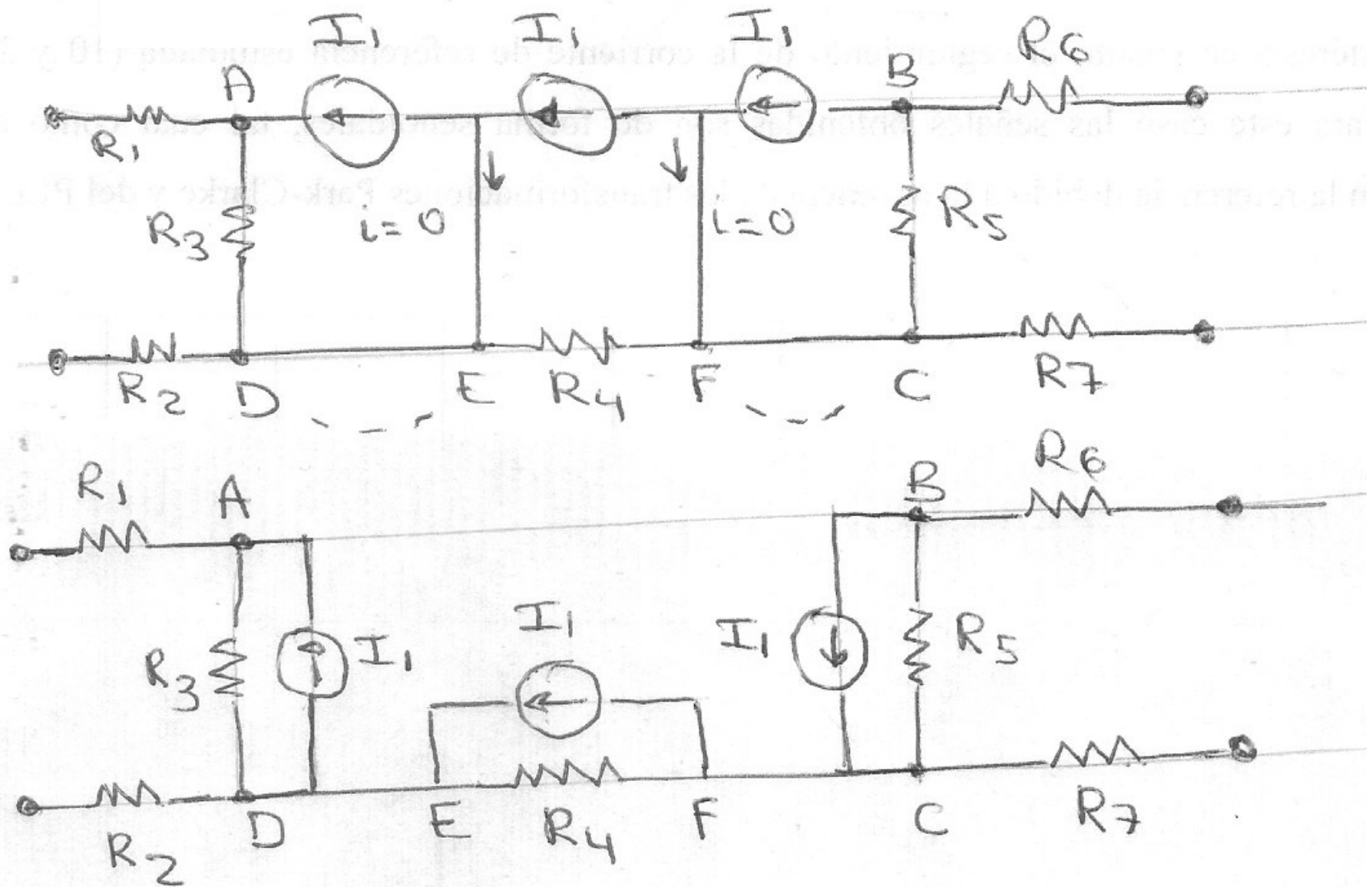
Circuito AC de pequeña señal



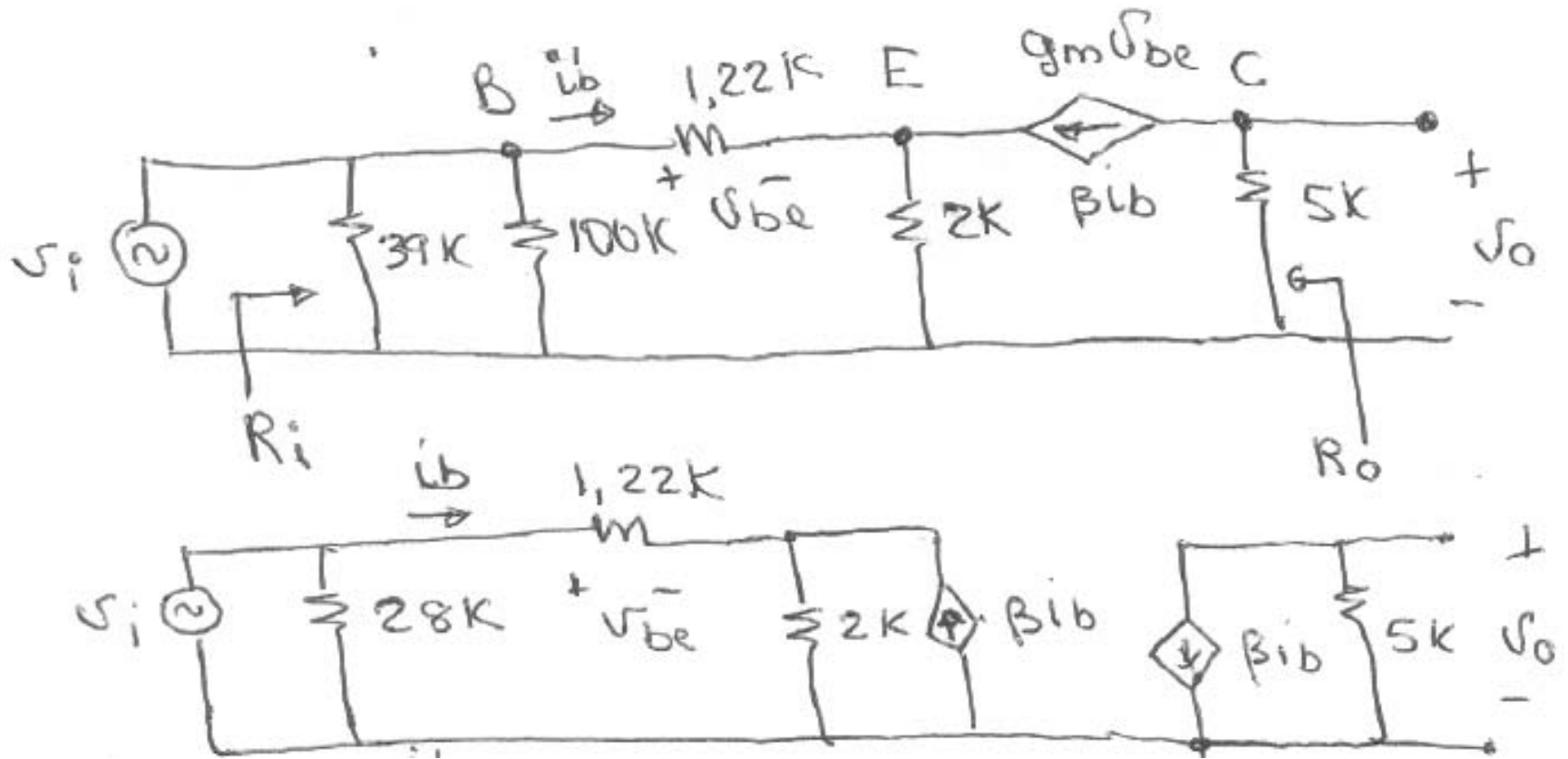
Teorema de traslación de fuentes



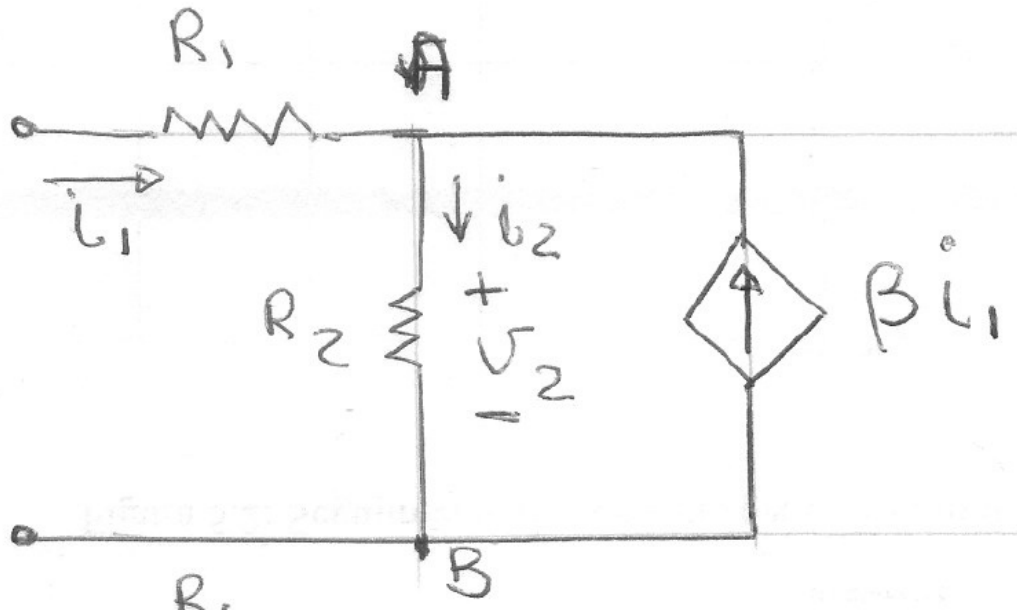
Teorema de traslación de fuentes



Teorema de traslación de fuentes aplicado al circuito



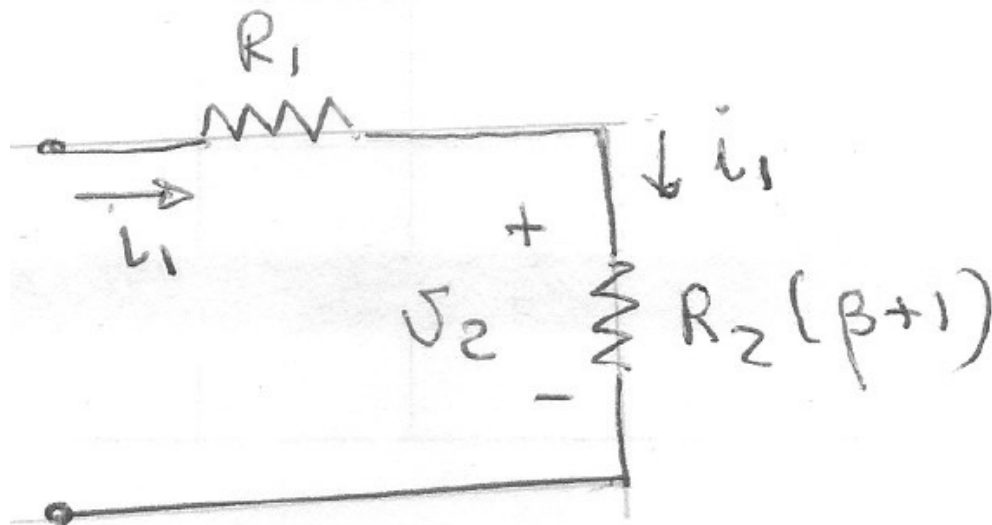
Teorema de sustitución



$$v_2 = R_2 i_2$$

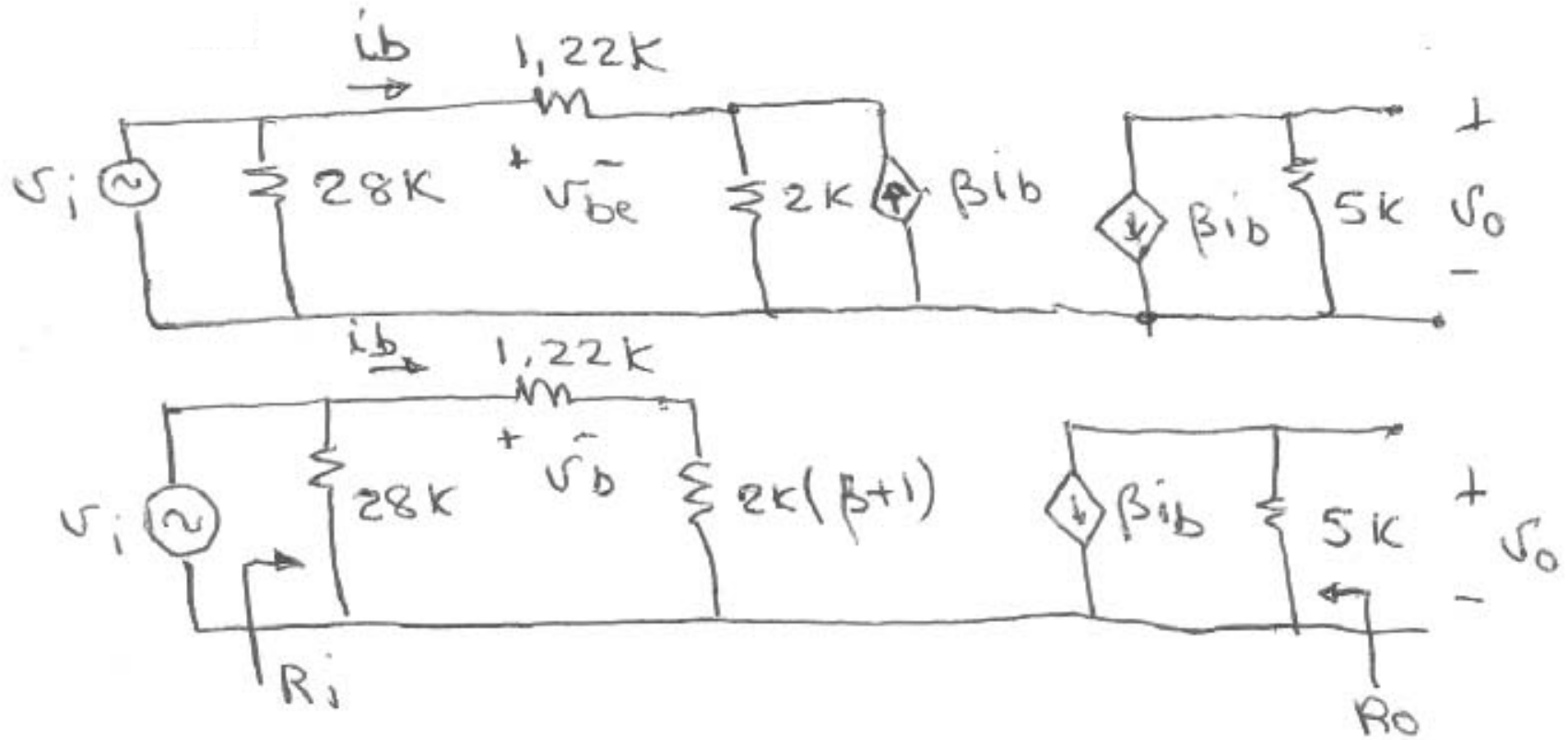
$$i_2 = i_1 + \beta i_1 = (\beta + 1) i_1$$

$$v_2 = R_2 (\beta + 1) i_1$$

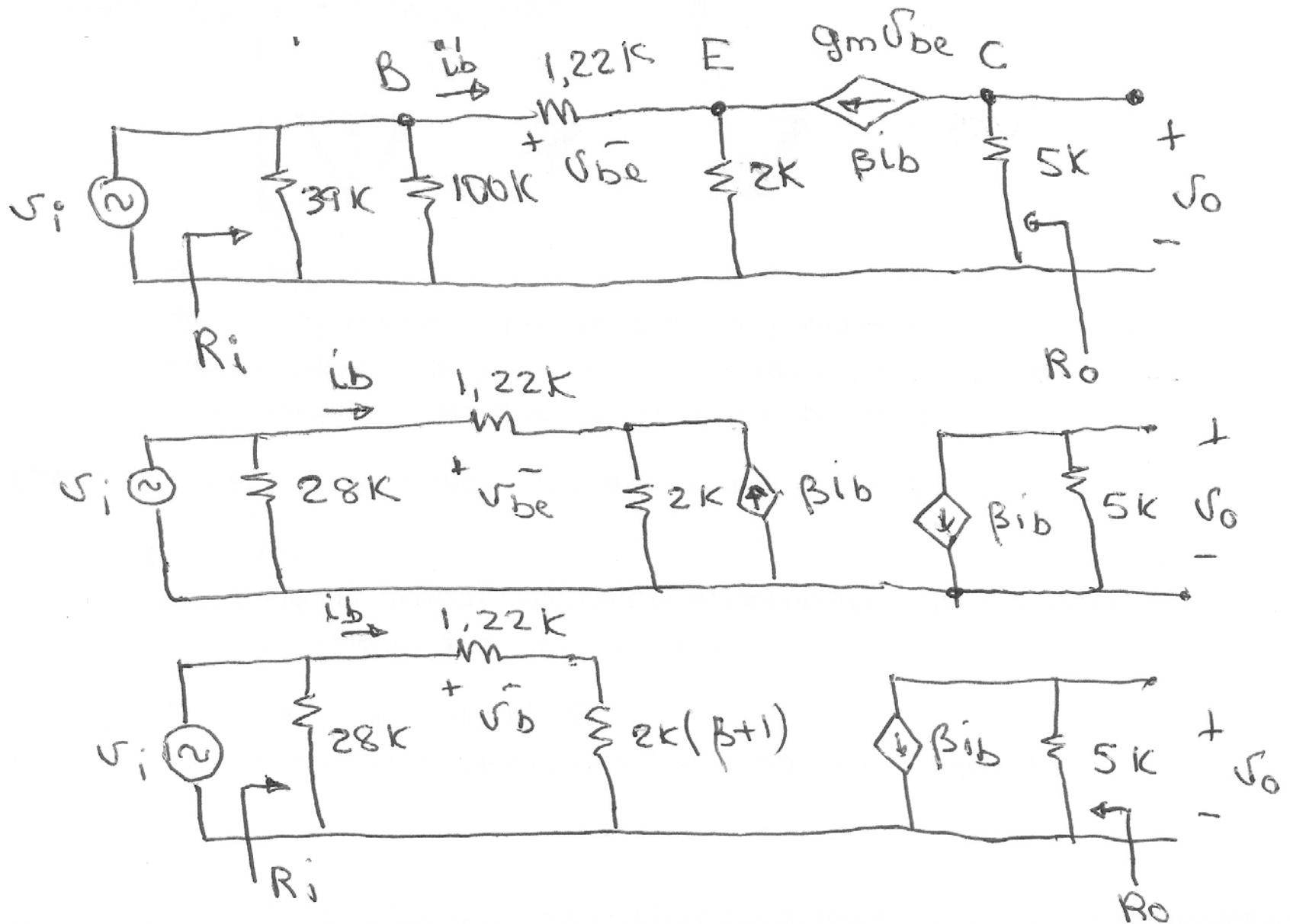


$$v_2 = [R_2 (\beta + 1)] i_1$$

Teorema de sustitución aplicado al circuito



Circuito AC de pequeña señal



Ganancia de voltaje

$$i_b = \frac{v_i}{[1,22 + (101)2]k} = \frac{v_i}{203,22 k}$$

$$v_o = -5k \beta i_b = \frac{-500 v_i}{203,22}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -2,46$$

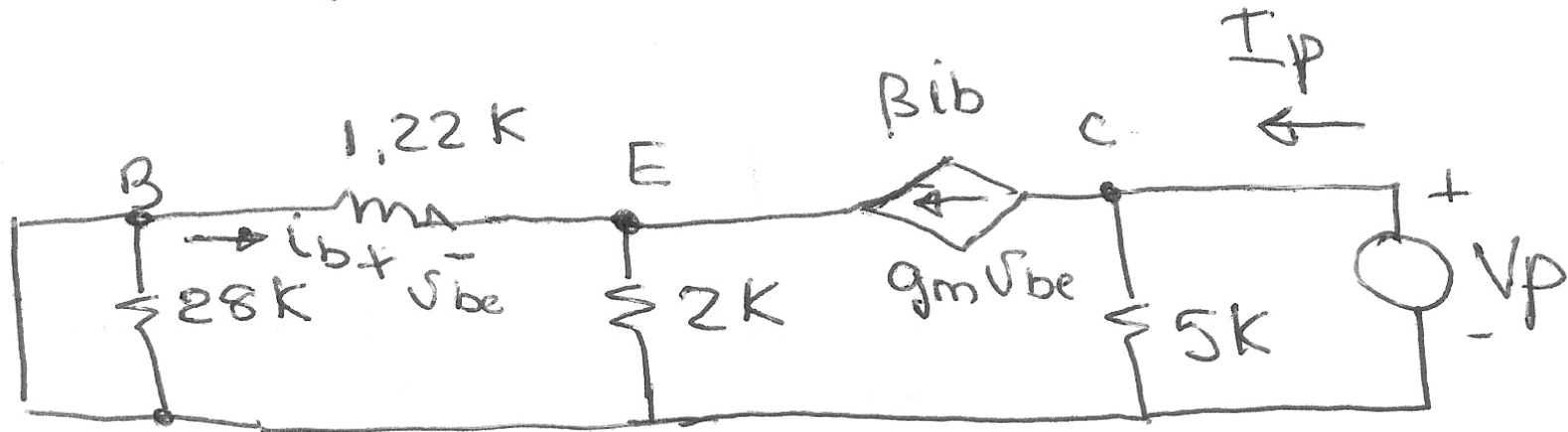
Resistencia de entrada

$$R_i = 39k // 100k // r_B$$

$$r_B = 1,22k + 202k = 203,22k$$

$$R_i = 39k // 100k // 203,22k = 24,65k$$

Resistencia de salida



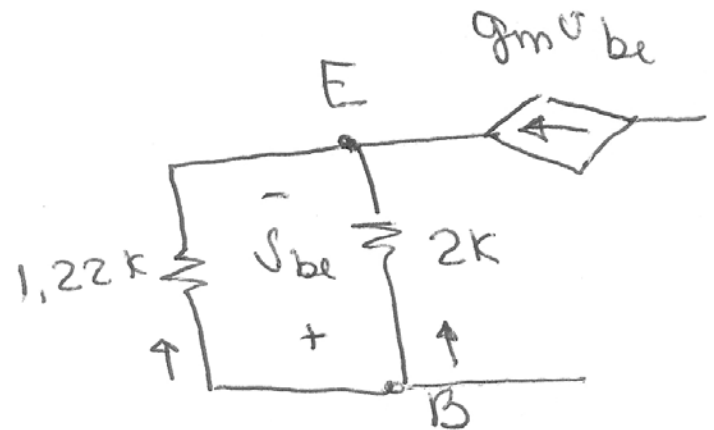
$$I_p = \frac{V_p}{5\text{k}} + g_m v_{be}$$

$$g_m v_{be} + \frac{v_{be}}{2\text{k}} + \frac{v_{be}}{1,22\text{k}} = 0$$

$$v_{be} = 0$$

$$I_p = \frac{V_p}{5\text{k}}$$

$$R_o = 5\text{k}\Omega$$



Resultados de la Configuración Emisor Común con Resistencia de Emisor

- 1.-La ganancia de voltaje es reducida, debido al efecto de la resistencia de Emisor ($A_v = -2,46$)**
- 2.- La resistencia de entrada es elevada debido a la Resistencia de Emisor reflejada hacia la Base ($R_i = 24,65 \text{ K}\Omega$)**
- 3.- La resistencia de salida es igual a la de la configuración Emisor Común sin Resistencia de Emisor ($R_o = 5 \text{ K}\Omega$)**
- 4.-Punto de operación ($I_C = 2,13\text{mA}$ $V_{CE} = 5,04\text{V}$)**

CONDENSADORES DE ACOUPLE Y DESACOPLE

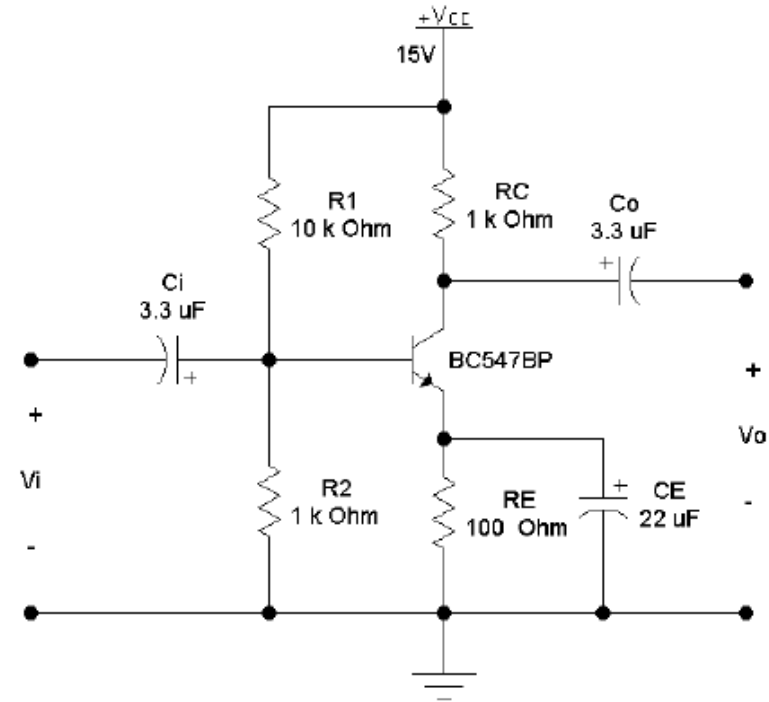
En el amplificador Emisor Común mostrado hay tres condensadores que a las frecuencias de operación se comportan como cortocircuitos:

*Entre el generador de entrada y la base del transistor: La señal AC no afecta el punto de operación.

*En la salida, para conectar la resistencia de carga: La carga no afecta el punto de operación

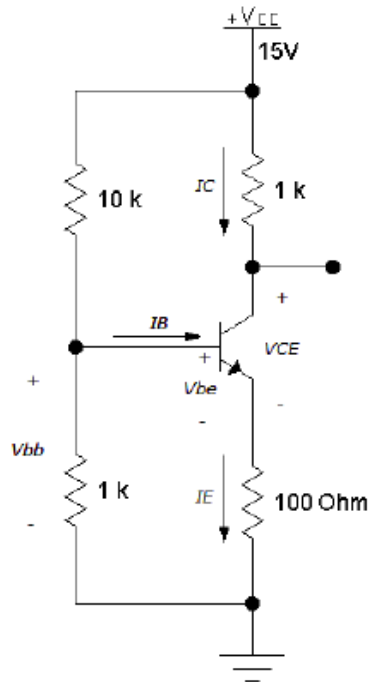
*En paralelo con la resistencia de Emisor: La resistencia R_E no afecta la ganancia AC.

*Para el análisis DC la impedancia de los condensadores se considera infinita.

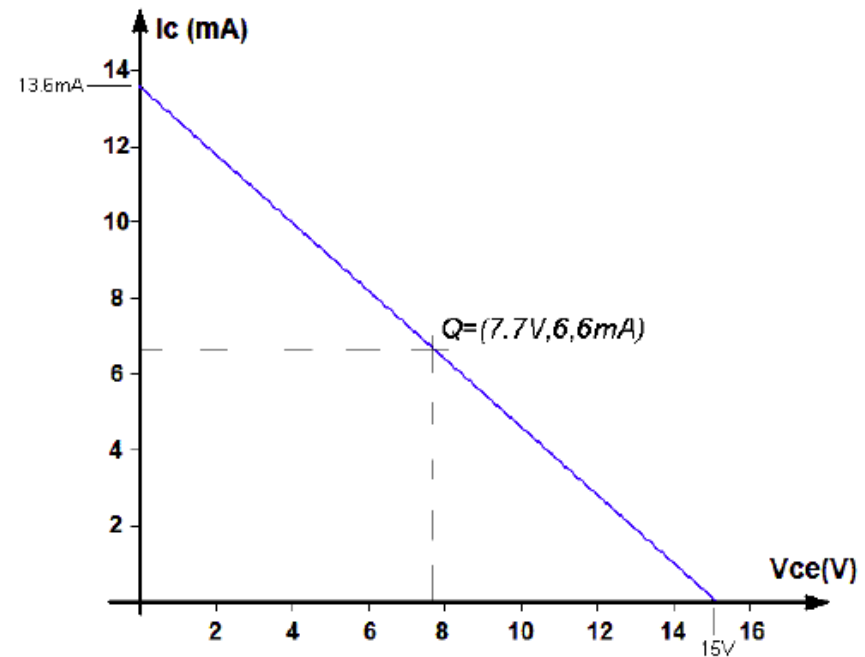


RECTA DE CARGA EN DC

Al hacer el análisis, y especialmente el diseño de un amplificador, hay que estudiar con cuidado las rectas de carga. Para el análisis en DC se considera el circuito mostrado, se determina el punto de operación y se ubica la recta de carga en el plano I_C vs V_{CE} . Al diseñar, es usual ubicar el punto de operación para tener el mayor rango de amplificación posible.



Circuito equivalente de continua



Recta de carga en continua

RECTA DE CARGA EN AC

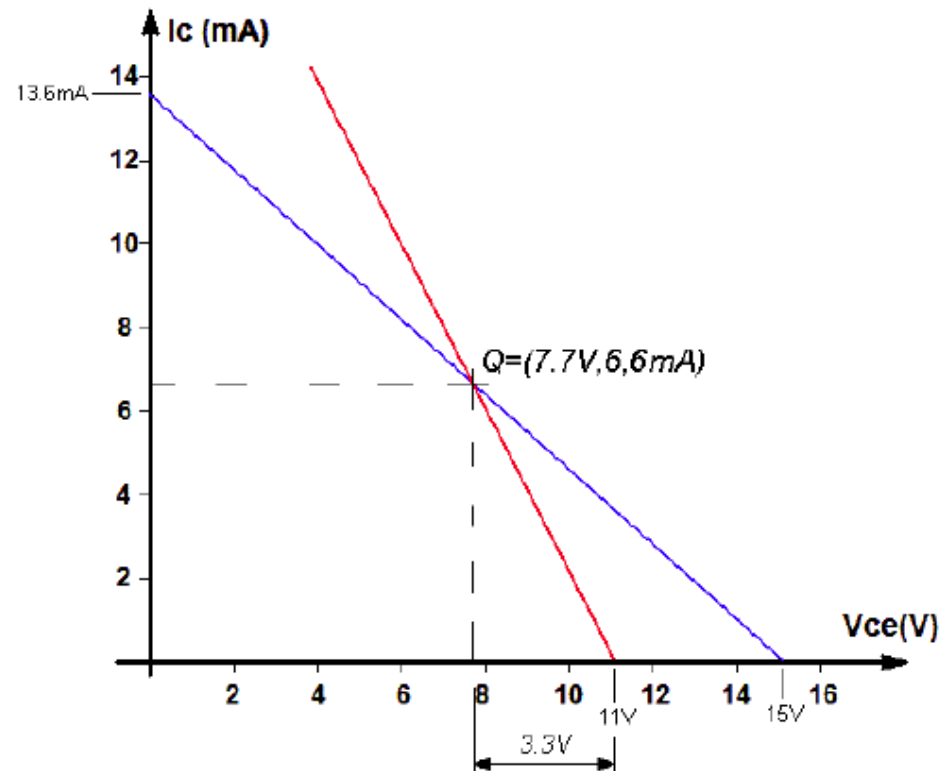
Al conectar la fuente y la carga a través de los condensadores y desacoplar la resistencia de Emisor, la pendiente de la recta de carga, sobre la que verdaderamente va a realizar su excursión la señal de salida, se modifica.

Con condensador de emisor:

$$m_{AC} = \frac{1}{R_C // R_L}$$

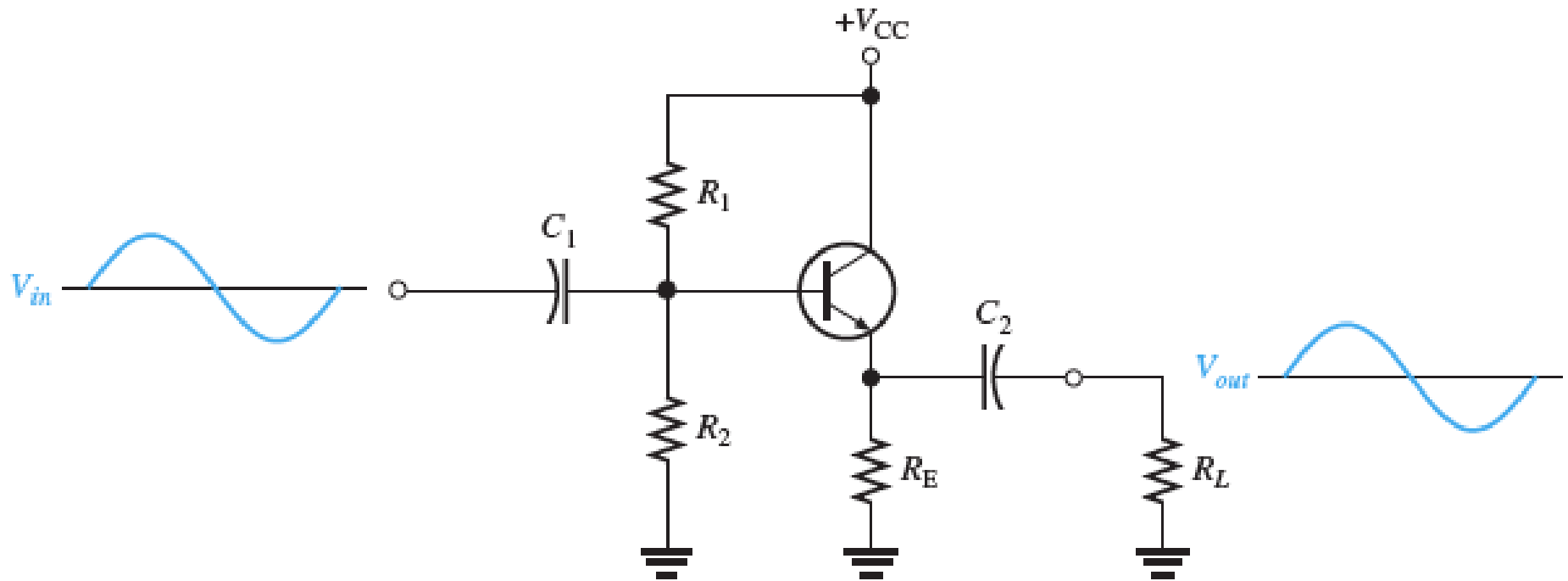
Sin condensador de emisor:

$$m_{AC} = \frac{1}{R_E + R_C // R_L}$$

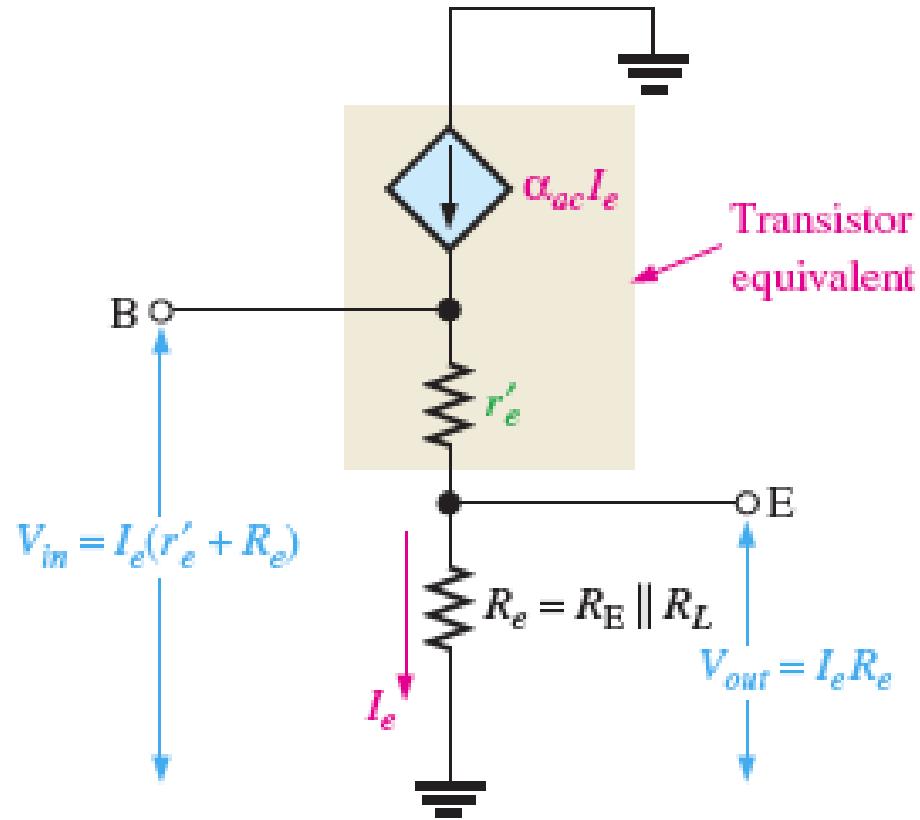


Recta de carga en alterna

CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN (UTILIZANDO EL MODELO T)



GANANCIA DE VOLTAJE

$$V_{out} = I_e R_e$$

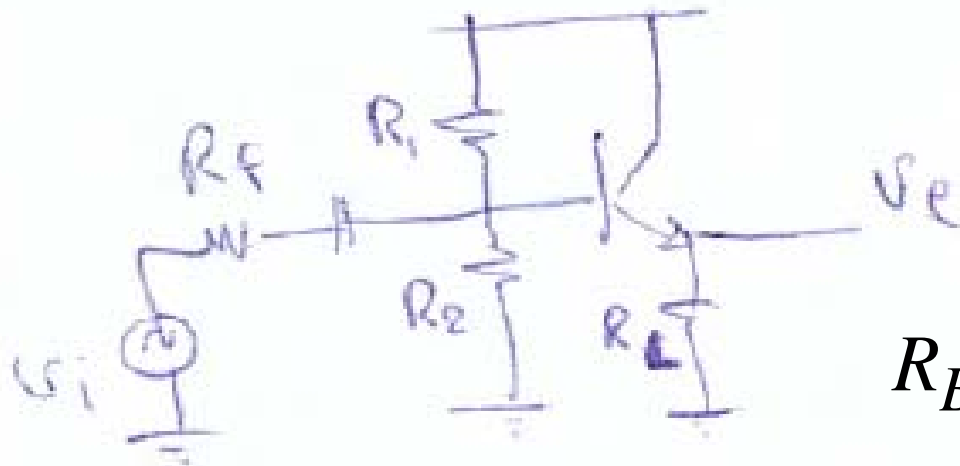
$$V_{in} = I_e (r'_e + R_e)$$

$$A_v = \frac{R_e}{r'_e + R_e}$$

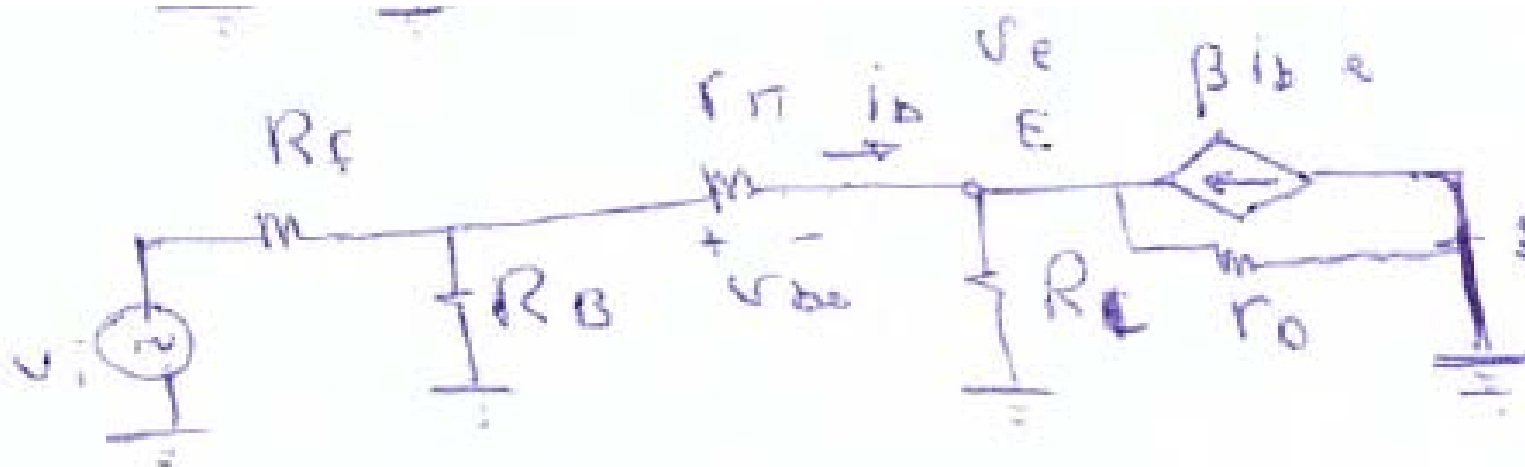
Si $R_e \gg r'_e$ $A_v \cong 1$

Esta es la razón por la que se llama seguidor de emisor

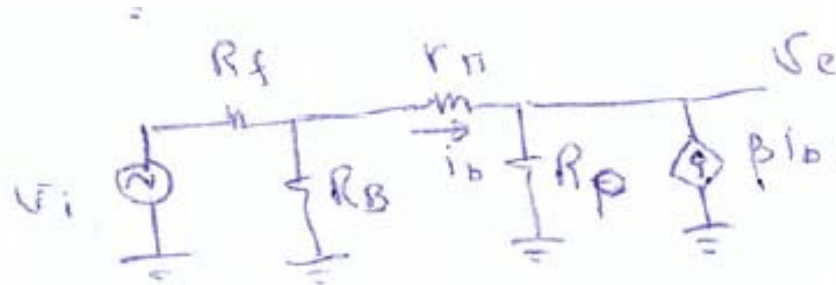
**MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO
EL PUNTO DE OPERACIÓN (UTILIZANDO EL MODELO π)**



$$R_B = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

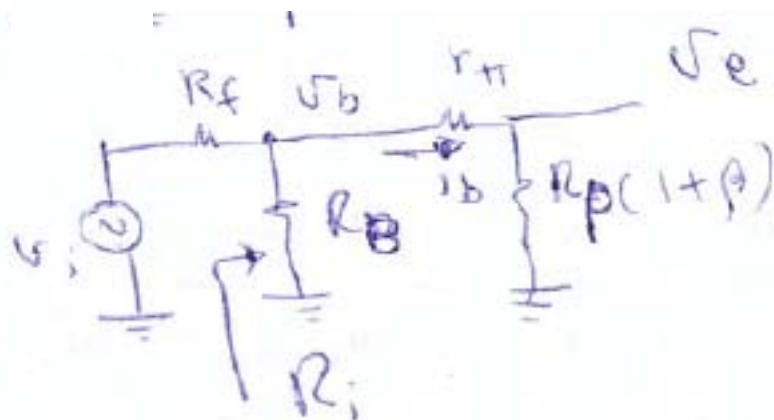


Arreglando el circuito



$$R_p = R_L // r_o = \frac{R_L r_o}{R_L + r_o}$$

Aplicando el teorema de sustitución

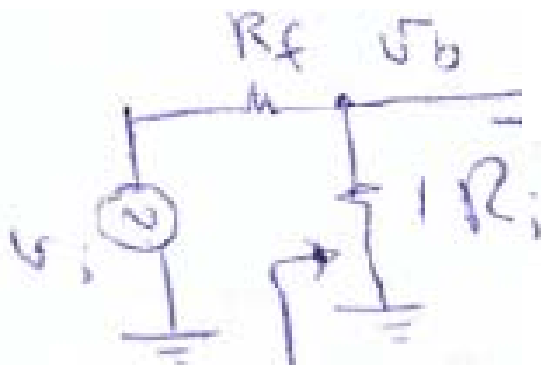


$$v_e = R_p(1 + \beta)i_b$$

**IMPEDANCIA DE ENTRADA
ES ALTA**

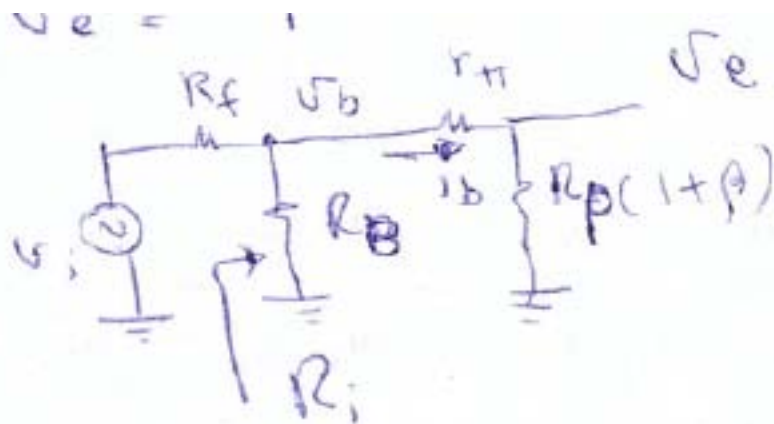
$$R_i = R_B // (r_\pi + R_p(1 + \beta))$$

R_p reflejada hacia la base



$$v_b = \frac{R_i}{R_i + R_f} v_i$$

Volviendo al circuito anterior:



$$i_b = \frac{v_b}{r_{\pi} + R_p(1 + \beta)}$$

$$v_b = (r_{\pi} + R_p(1 + \beta))i_b$$

GANANCIA DE VOLTAJE a partir del voltaje de base

$$A_{vb} = \frac{v_e}{v_b} = \frac{R_p(1 + \beta)i_b}{(r_{\pi} + R_p(1 + \beta))i_b} = \frac{R_p(1 + \beta)}{(r_{\pi} + R_p(1 + \beta))}$$

GANANCIA DE VOLTAJE desde el voltaje de entrada v_i

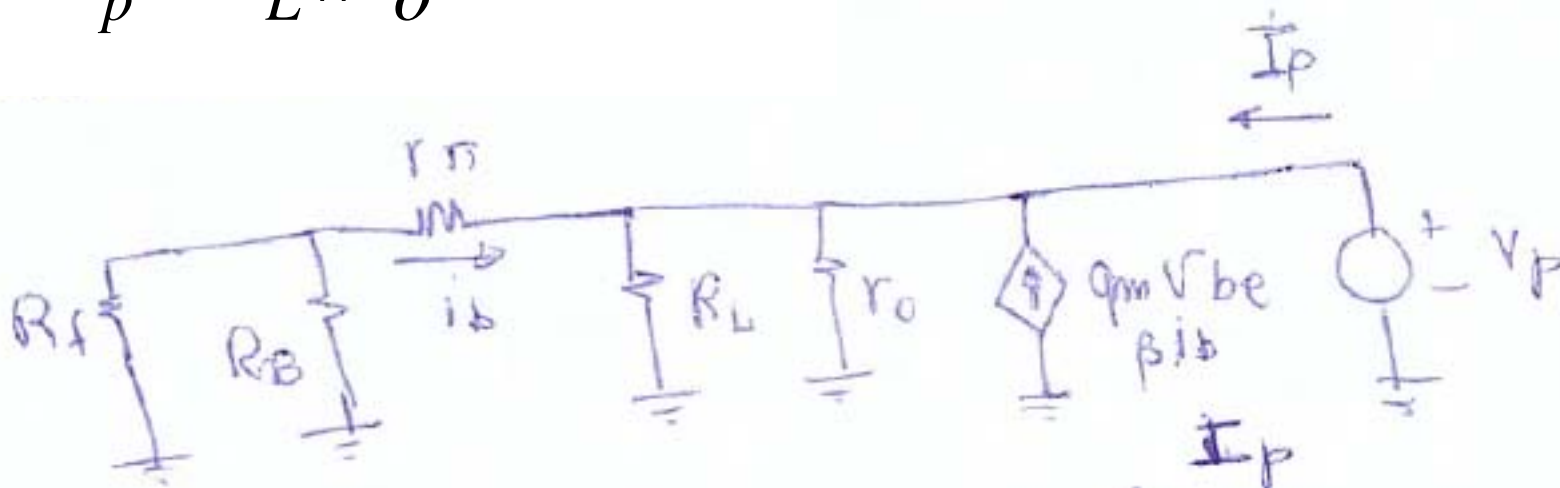
$$A_v = \frac{v_e}{v_i} = \frac{v_e}{v_b} \frac{v_b}{v_i} = \frac{R_p(1 + \beta)}{(r_{\pi} + R_p(1 + \beta))} \frac{R_i}{R_i + R_f} \approx 1$$

IMPEDANCIA DE SALIDA

Colocamos una fuente de prueba V_p y sustituimos v_i por un corto.

La impedancia de salida se define como $R_o = V_p / I_p$

$$R_p = R_L // r_o$$



Corriente en el nodo superior

$$R_a = R_B // R_f + r_\pi$$

$$I_p + \beta i_b + i_b - \frac{V_p}{R_p} = 0$$

$$i_b = \frac{-V_p}{R_a} = \frac{-V_p}{R_B // R_f + r_\pi}$$

$$I_p + (\beta + 1)i_b - \frac{V_p}{R_p} = I_p - (\beta + 1) \frac{V_p}{R_B // R_f + r_\pi} - \frac{V_p}{R_p} = 0$$

$$I_p = (\beta + 1) \frac{V_p}{R_B // R_f + r_\pi} + \frac{V_p}{R_p} = V_p \left[\frac{(\beta + 1)}{R_B // R_f + r_\pi} + \frac{1}{R_p} \right]$$

$$\frac{1}{R_o} = \frac{I_p}{V_p} = \left[\frac{(\beta + 1)}{R_B // R_f + r_\pi} + \frac{1}{R_p} \right]$$

$$R_o = \frac{V_p}{I_p} = \frac{R_B // R_f + r_\pi}{(\beta + 1)} // R_p$$

R base reflejada hacia el emisor

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR

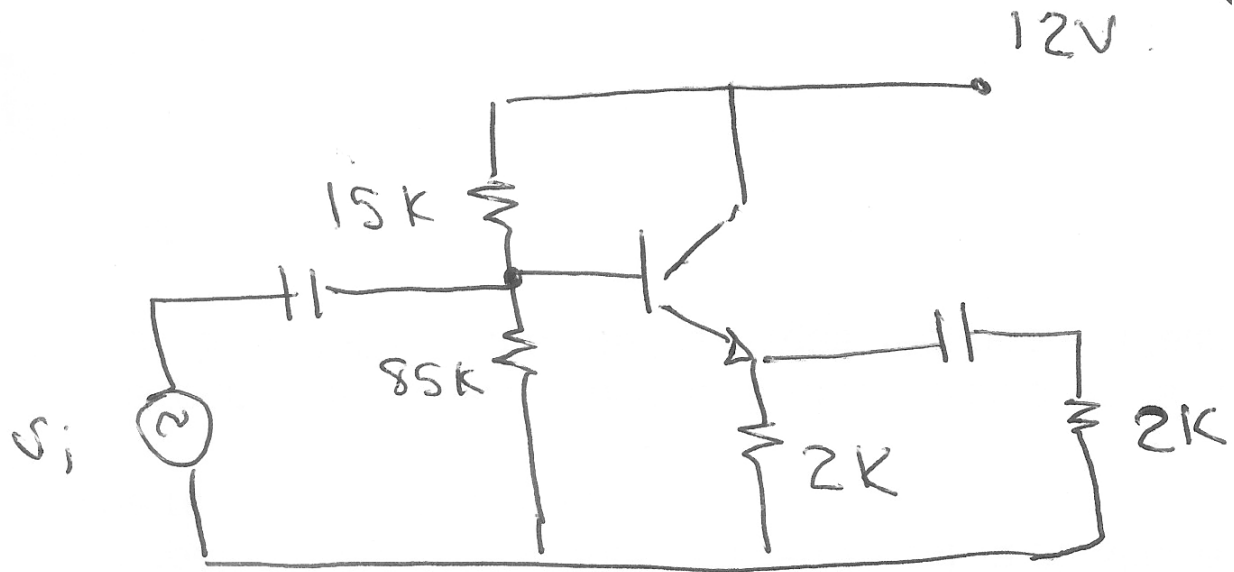
- 1.- La resistencia de entrada es elevada (Resistencia de Resistencia emisor reflejada hacia la base, multiplicada por $\beta + 1$).**
- 2.- La resistencia de salida es reducida (Resistencia de base reflejada hacia emisor, dividida entre $\beta + 1$).**
- 3.- La ganancia de voltaje es menor que 1 pero cercana a ese valor.**
- 4.- Es útil para acoplar un circuito de alta impedancia de salida (considerado como fuente) con otro circuito de baja impedancia de entrada (considerado como carga).**

EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN COLECTOR COMÚN O SEGUIDOR DE EMISOR

En el siguiente amplificador, calcule A_v , R_i y R_o .

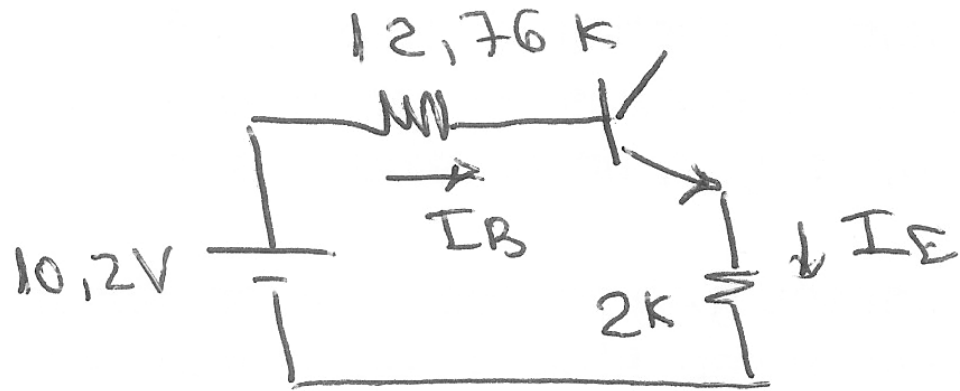
$\beta = 100$, $V_{BE} = 0,7V$

Polarización



$$V_{BB} = \frac{85k}{85k + 15k} \times 12V = 10,2V$$

$$R_B = 85k \parallel 15k = 12,76 k\Omega$$



$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$10,2V = 12,76 I_B + 0,7 + 2k I_E$$

$$10,2V = [12,76 + 2k(101)] I_B + 0,7V$$

$$I_B = \frac{(10,2 - 0,7)V}{(12,76 + 202)k\Omega} = 0,04424 \text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 4,424 \text{ mA}$$

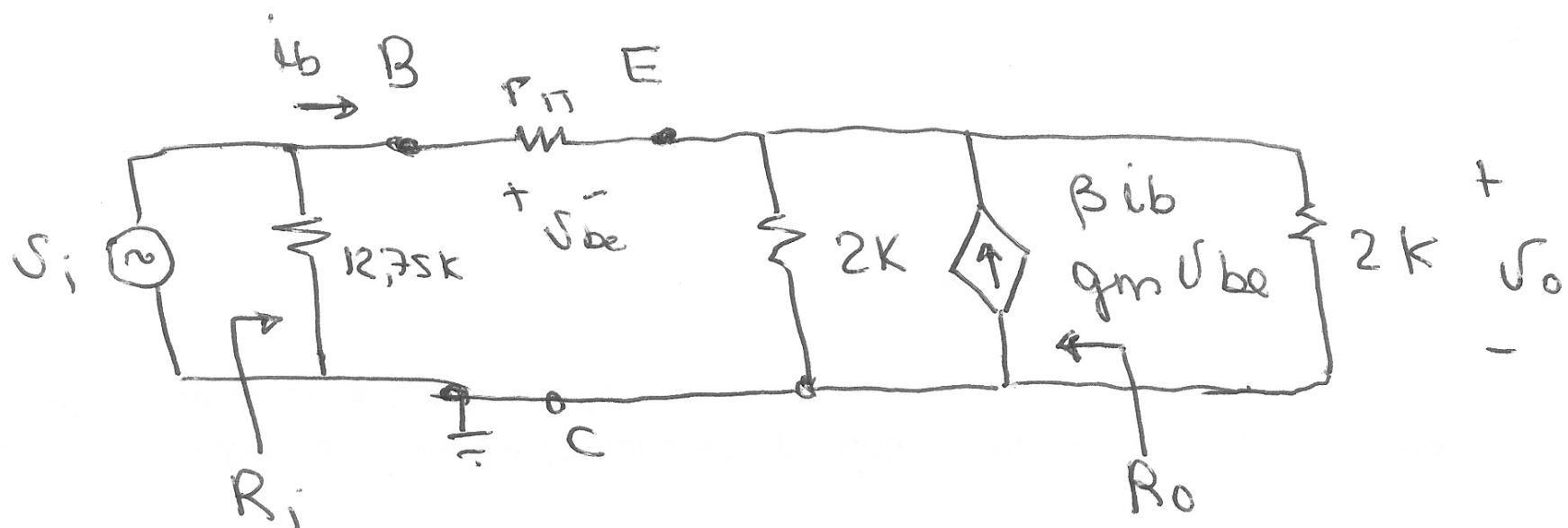
$$V_{CE} = 12V - 2k \times 4,424 \text{ mA} = 3,15V$$

Parámetros

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{4,424 \text{ mA}}{0,025 \text{ V}} = 176,96 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{176,96 \frac{\text{mA}}{\text{V}}} = 565 \Omega$$

Análisis de pequeña señal. Modelo π



$$v_o = (2k // 2k)(\beta + 1) i_b$$

$$v_o = (2k // 2k)(\beta + 1) \frac{v_{be}}{r_{\pi}}$$

$$v_i = v_{be} + v_o$$

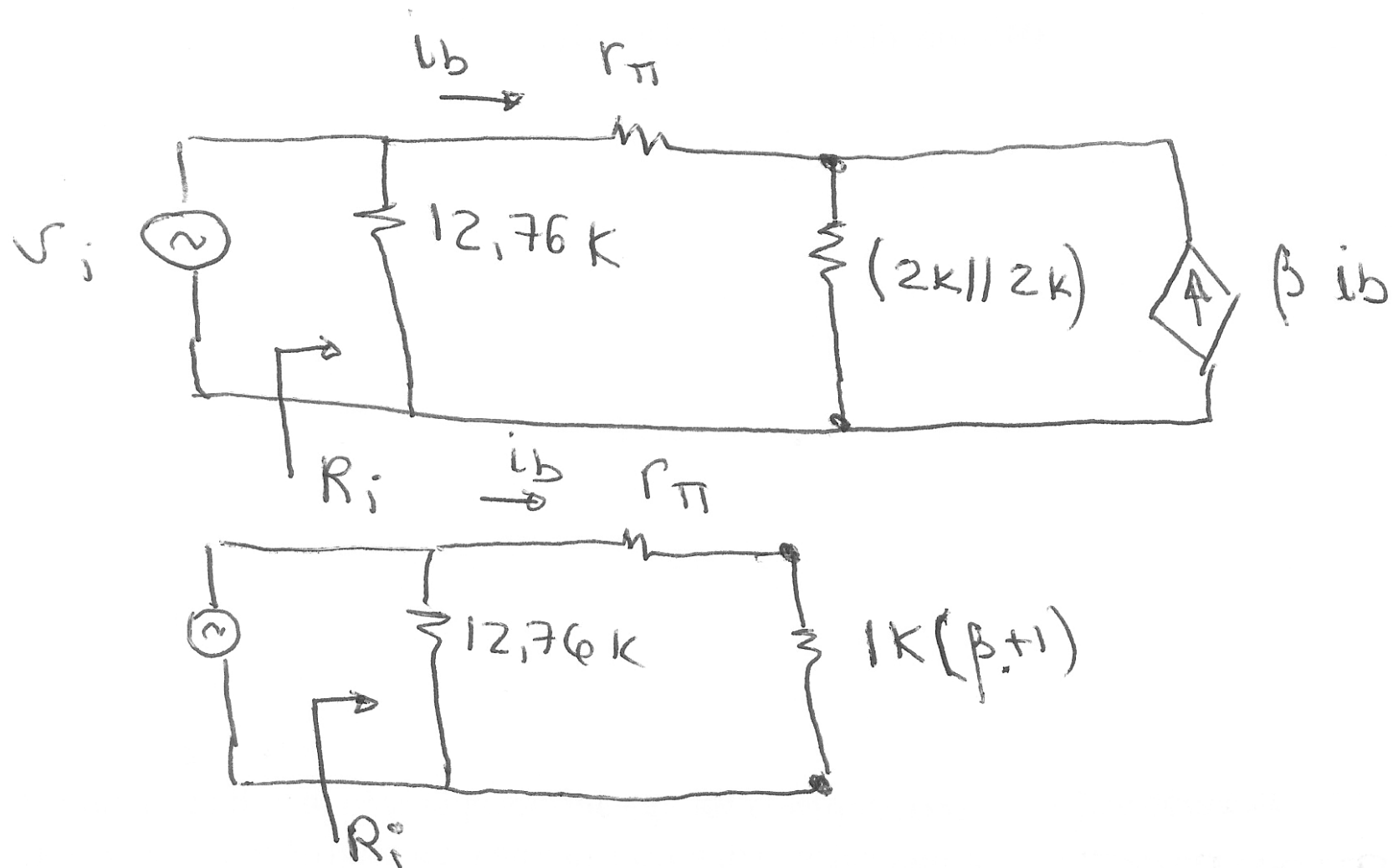
$$v_{be} = v_i - v_o$$

$$v_o = (1k) \frac{(\beta + 1)}{r_{\pi}} (v_i - v_o)$$

$$v_o = (1k) \frac{101}{0,565k} (v_i - v_o) = 178,76 (v_i - v_o)$$

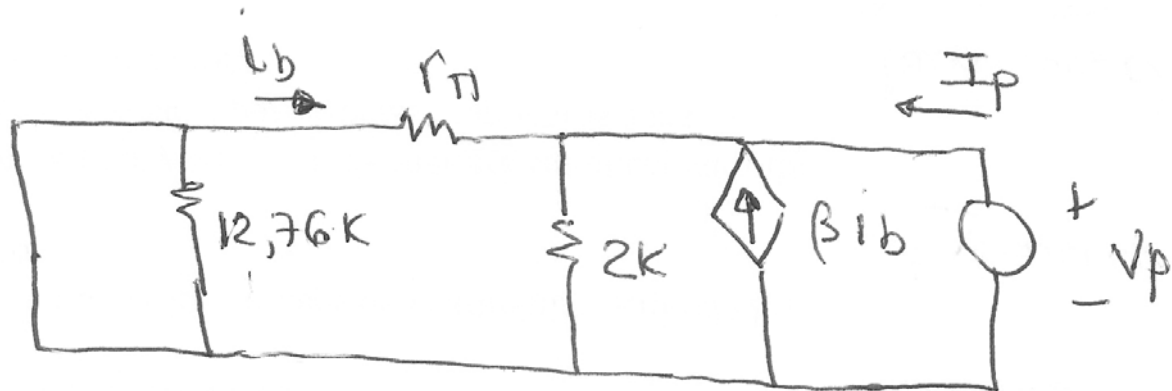
$$v_o (179,76) = v_i (178,76) \quad A = \frac{v_o}{v_i} = 0,994$$

Resistencia de entrada



$$R_i = 12,76\text{ k} \parallel 101\text{ k} = 11,32\text{ k}\Omega$$

Resistencia de salida



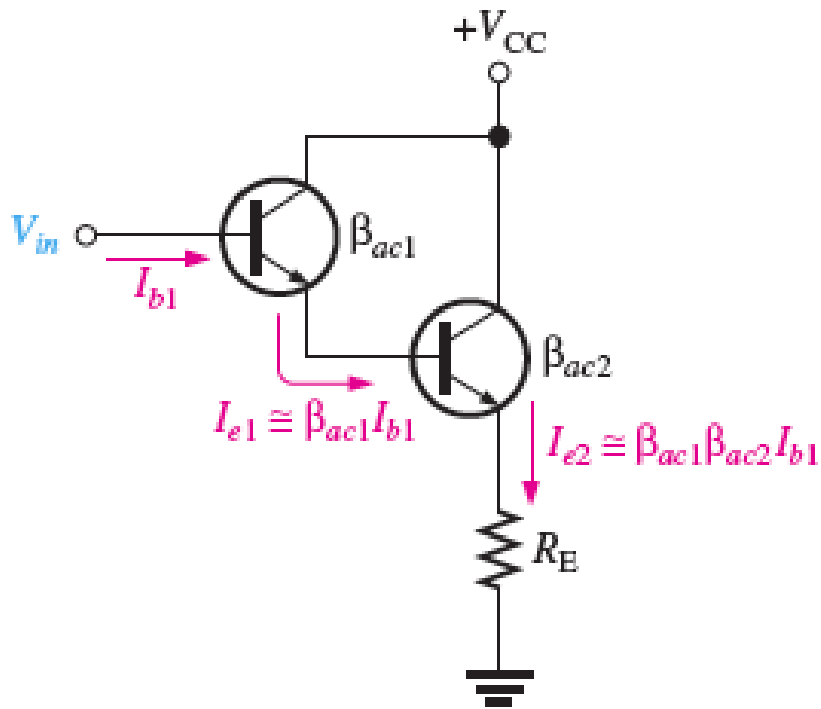
$$I_p = -\beta i_b - i_b + \frac{V_p}{2k} = -(\beta+1)i_b + \frac{V_p}{2k}$$

$$i_b = -\frac{V_p}{r_{\pi}} \quad I_p = (\beta+1)\frac{V_p}{r_{\pi}} + \frac{V_p}{2k}$$

$$\frac{I_p}{V_p} = \frac{(\beta+1)}{r_{\pi}} + \frac{1}{2k}$$

$$R_o = \frac{r_{\pi}}{\beta+1} \parallel 2k\Omega$$

PAR DARLINGTON



* Es un arreglo de dos transistores en cascada, conectados en la configuración Colector Común.

* La corriente de emisor del primero es la corriente de base del segundo. Por lo tanto:

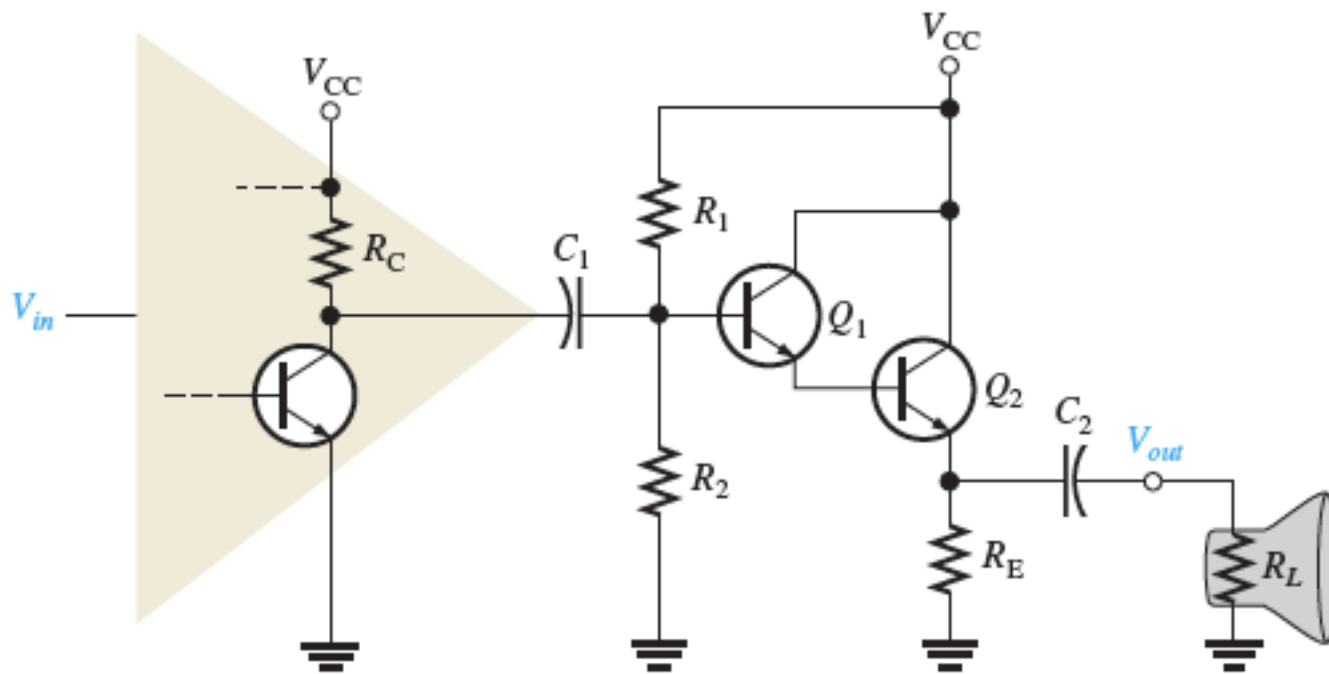
$$i_{e_2} = (\beta_2 + 1)i_{b_2} = (\beta_2 + 1)i_{e_1} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)i_{b_1} \approx \beta_1 \beta_2 i_{b_1}$$

Puede considerarse como un solo dispositivo BJT conectado en la configuración colector Común, con un valor de β muy elevado.

APLICACIÓN DEL PAR DARLINGTON: CONEXIÓN DE UNA CORNETA A UN AMPLIFICADOR CONFIGURACIÓN EMISOR COMÚN

Para el amplificador Emisor Común: $V_{CC}=12V$; $R_C=1k\Omega$; $r_e=5\Omega$

Para el Colector Común con Darlington: $R_1=10k\Omega$; $R_2=22k\Omega$; $R_E=22\Omega$; $R_L=8\Omega$; $V_{CC}=12V$; $\beta =100$ para cada transistor.



Análisis AC del amplificador Emisor Común:

Haciendo un análisis rápido del primer amplificador, buscamos en la página resumen de los parámetros del transistor y considerando que la corneta no está conectada encontramos:

$$A_{vo} = -\frac{\alpha R_C}{r_e} \approx -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{1000\Omega}{5\Omega} = -200$$

Ahora bien, si la corneta está conectada a través del condensador de acople:

$$R_P = -\frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = -\frac{1000 \times 8}{1000 + 8} = 7,94\Omega \quad A_{vE1} = -\frac{R_P}{r_e} = -\frac{7,94\Omega}{5\Omega} = -1,59$$

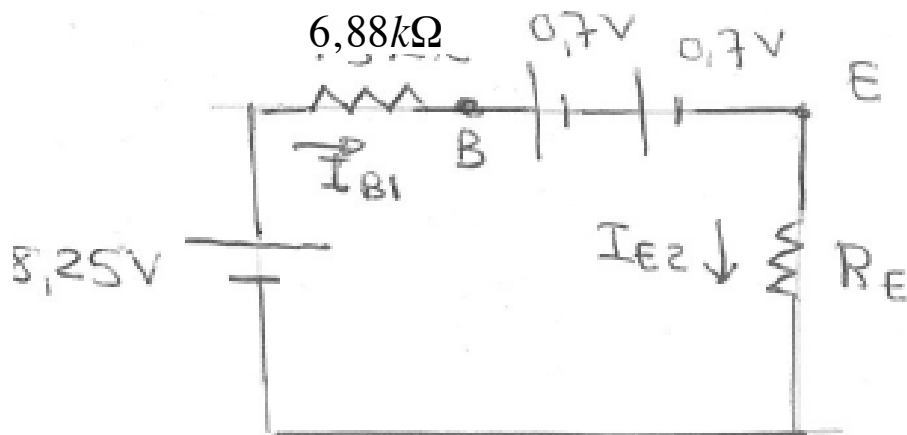
La ganancia es ínfima. Tenemos que conseguir in circuito con alta impedancia de entrada. Utilizamos un Par Darlington.

Análisis DC del Par Darlington

Voltaje de Thevenin: $V_{TH} = \frac{22k\Omega}{22k\Omega + 10k\Omega} 12V = 8,25V$

Resistencia de Thevenin: $R_{TH} = \frac{22k\Omega \times 10k\Omega}{22k\Omega + 10k\Omega} = 6,88k\Omega$

Circuito equivalente:



La ecuación de polarización es:

$$V_{TH} = 6,88k\Omega I_{B_1} + 1,4V + R_E I_{E_2}$$

En DC se cumple

$$I_{E_2} = (\beta_2 + 1)I_{B_2} = (\beta_2 + 1)I_{E_1} = (\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)I_{B_1}$$

$$I_{B_1} = \frac{I_{E_2}}{(\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)}$$

El término $6,88k\Omega I_{B_1} = 6,88k\Omega \frac{I_{E_2}}{(\beta_2 + 1)(\beta_1 + 1)}$

va a ser muy pequeño, por lo tanto:

$$V_{TH} = 6,88k\Omega I_{B_1} + 1,4V + R_E I_{E_2} \approx 1,4V + R_E I_{E_2}$$

$$I_{E_2} = \frac{V_{TH} - 1,4V}{R_E} = \frac{8,25V - 1,4V}{22\Omega} = 311,4mA$$

Análisis AC del Par Darlington

La resistencia de emisor en AC del Darlington está dada por:

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25mV}{311,4mA} = 0,080\Omega = 80m\Omega$$

La resistencia de carga del Par Darlington es:

$$R_P = \frac{R_E \times R_L}{R_E + R_L} = \frac{8\Omega \times 22\Omega}{8\Omega + 22\Omega} = 5,87\Omega$$

La ganancia para el par Darlington es aproximadamente igual a 1, ya que es una configuración Colector Común.

$$A_{vD} \approx 1$$

La resistencia de entrada equivalente del par Darlington es igual al paralelo de las dos resistencias de base con la resistencia reflejada del emisor hacia la base (aquí pasamos por los dos transistores).

$$R_{in} = 10k\Omega // 22k\Omega // 5,87\Omega(\beta + 1)^2 = 10k\Omega // 22k\Omega // 59,85k\Omega = 6,16k\Omega$$

Análisis de la etapa Emisor Común cuando su carga es el par Darlington:

Resistencia total de carga:

$$R_P = -\frac{R_C R_L}{R_C + R_L} = \frac{1k\Omega \times 6,16k\Omega}{1k\Omega + 6,16k\Omega} = 860\Omega$$

La ganancia del Emisor Común cuando su carga es el par Darlington es:

$$A_{vE2} = -\frac{R_P}{r_e} = -\frac{860\Omega}{5\Omega} = -172$$

La ganancia total del amplificador formado por el Emisor Común y el par Darlington, que están conectados en cascada, es el producto de las ganancias de cada una de las etapas, aproximadamente 172.

Cálculo de Potencias

La resistencia R_E del par Darlington debe disipar la potencia dada por:

$$P_{R_E} = I_E^2 R_E = (311,4mA)^2 \times 22\Omega = 2,13W$$

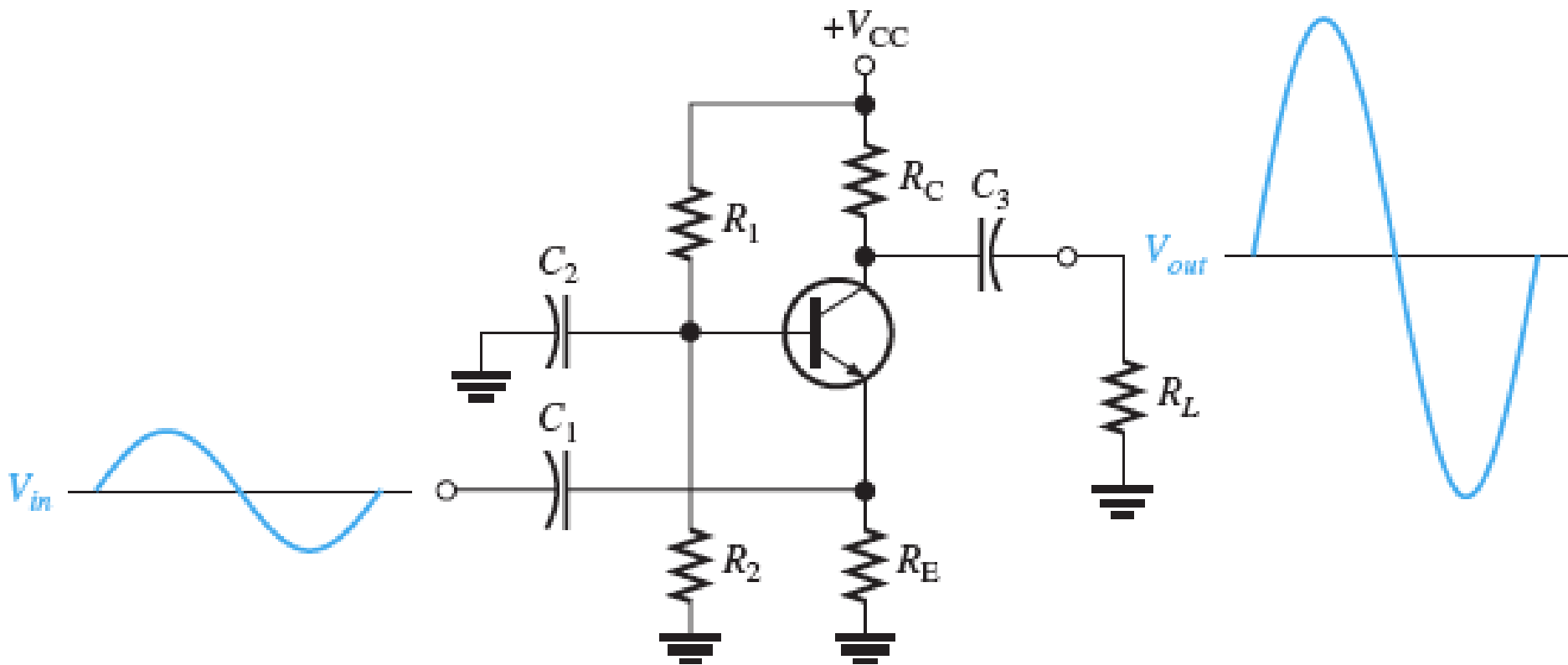
El voltaje V_{CE} del transistor de salida del par Darlington Q_2 es:

$$V_{CE_2} = 12V - I_{E_2} R_E = 12V - 22\Omega \times 311,4mA = 5,15V$$

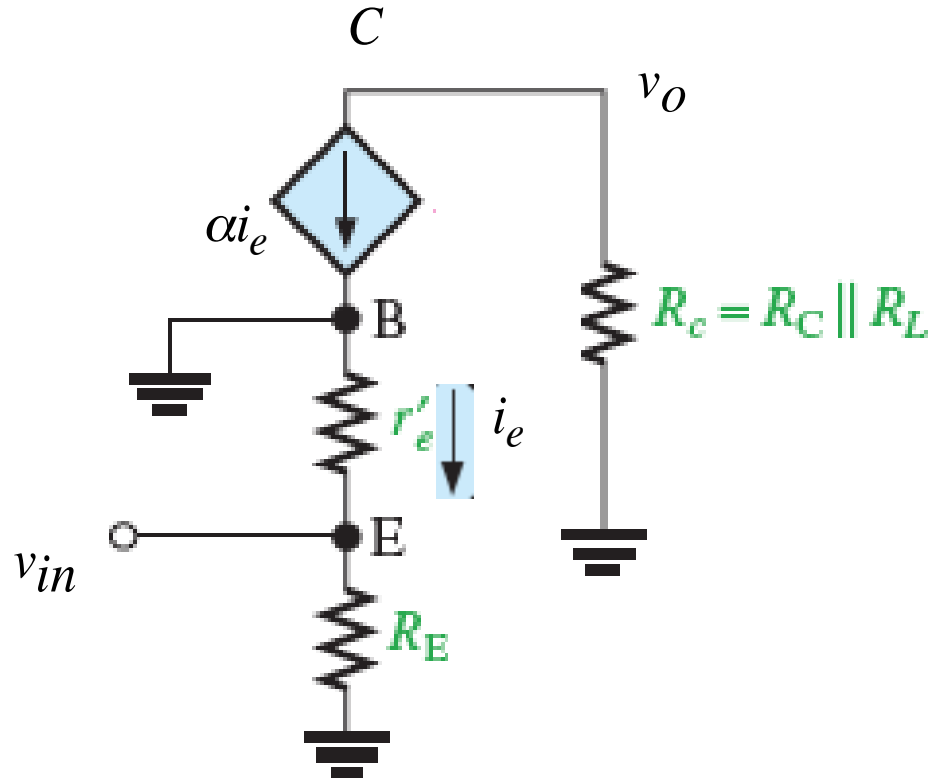
La potencia disipada por Q_2 está dada por

$$P_{Q_2} = I_{E_2} V_{CE_2} = 311,4mA \times 5,15V = 1,6W$$

CONFIGURACIÓN BASE COMÚN



MODELO EQUIVALENTE AC UNA VEZ CALCULADO EL PUNTO DE OPERACIÓN



$$A_i \approx 1$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} \quad v_{in} = -r_e i_e$$

$$v_o = -(R_C // R_L) \alpha i_e$$

$$A_v = \frac{-(R_C // R_L) \alpha i_e}{-r_e i_e} = \frac{\alpha (R_C // R_L)}{r_e}$$

$$R_{in} = R_E // r_e$$

$$R_{out} = R_C // R_L$$

CONCLUSIONES SOBRE LA CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

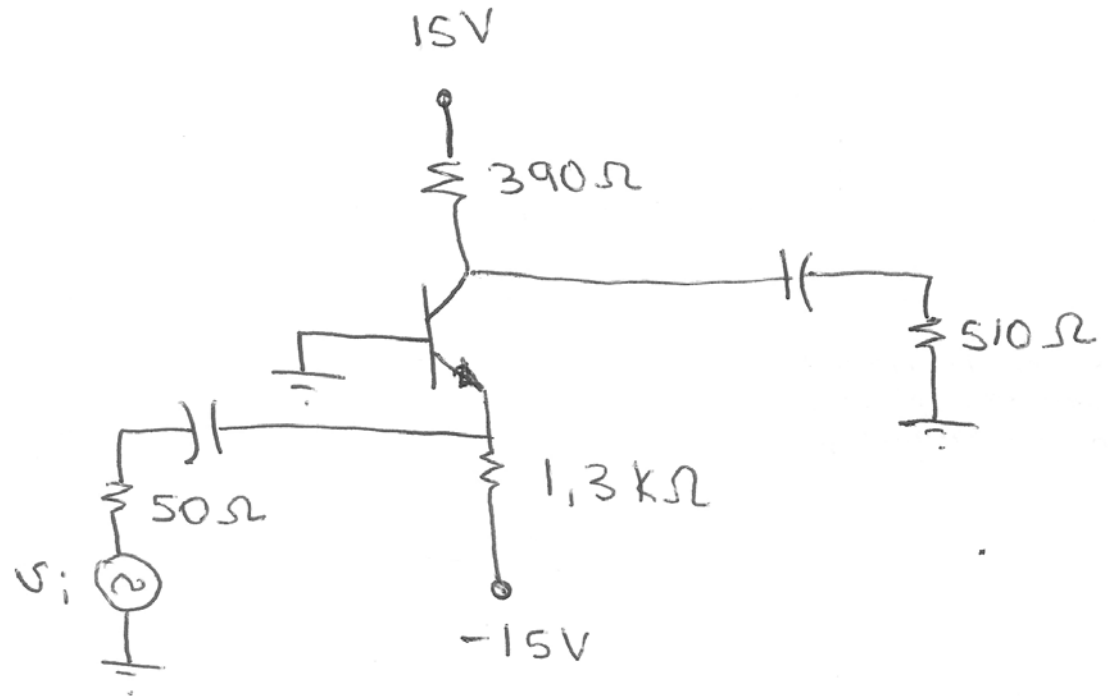
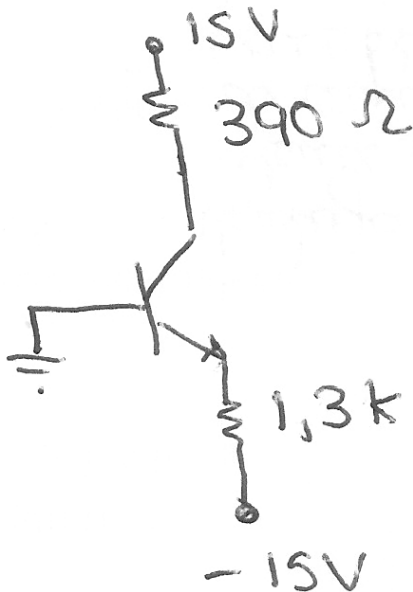
- 1.- La resistencia de entrada es muy baja.**
- 2.- La ganancia de voltaje en circuito abierto (en relación a v_{be}) es como la de la configuración emisor común, pero la ganancia total, cuando se toma en cuenta la resistencia de la fuente de voltaje es mucho mas baja.**
- 3.- La resistencia de salida es igual a la de las otras configuraciones analizadas.**
- 4.- Esta configuración es excelente para el diseño de amplificadores de alta frecuencia.**

EJEMPLO DE ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

En el siguiente
amplificador, calcule A_v ,
 R_i y R_o .

$$\beta = 100, V_{BE} = 0,7V$$

Polarización



$$0 = V_{BE} + i_c 1,3 \text{ k}\Omega - 15 \text{ V}$$

$$i_c = \frac{15 - 0,7}{1,3} = 11 \text{ mA}$$

$$15 = 0,39 \text{ k}\Omega i_c + V_{CE} + 1,3 \text{ k}\Omega i_c - 15 \text{ V}$$

$$15 + 15 = (0,39 + 1,3) \times 11 \neq V_{CE}$$

$$V_{CE} = 11,41 \text{ V}$$

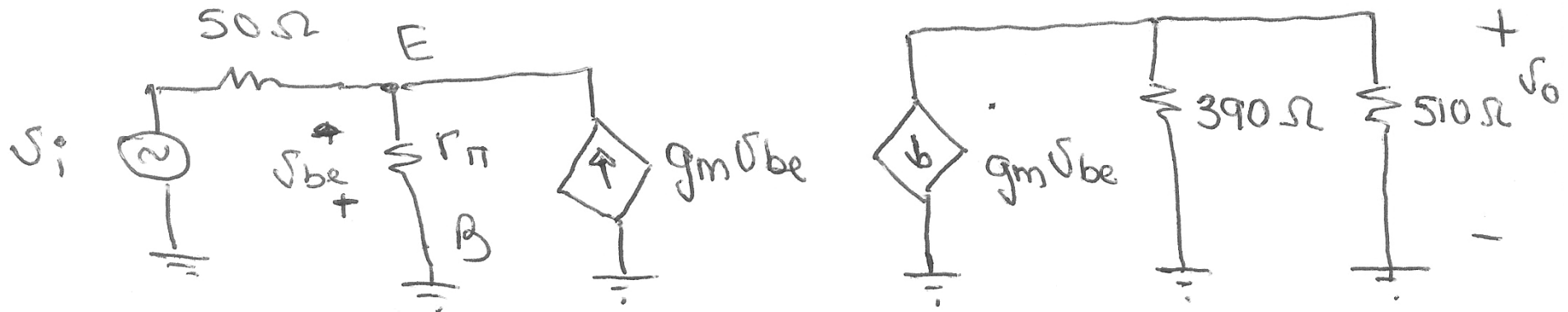
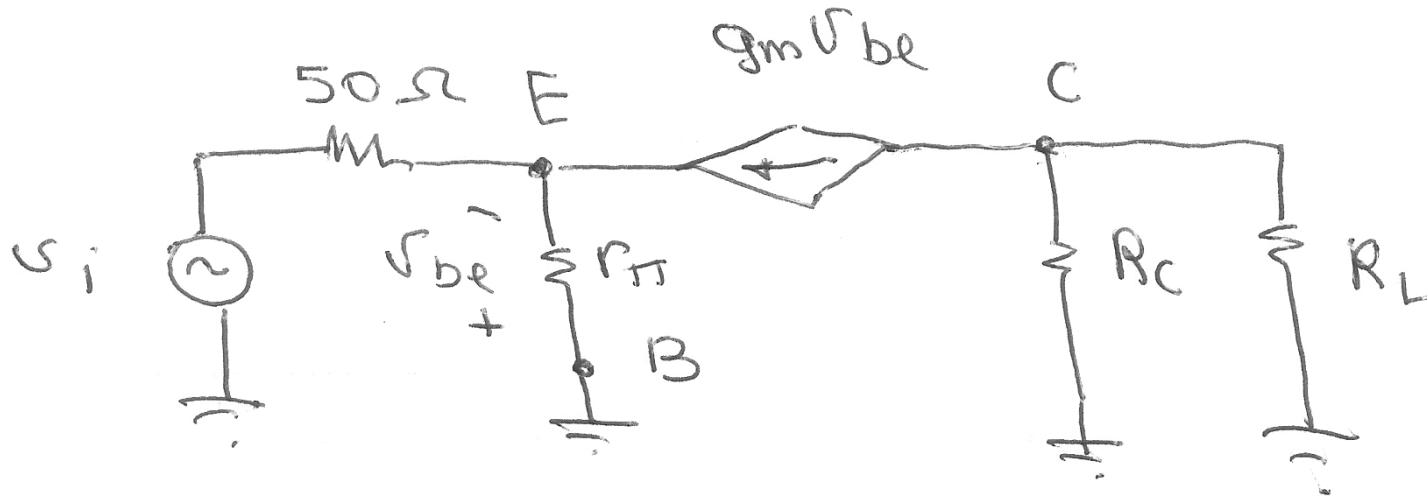
$$i_B = \frac{11 \text{ mA}}{\beta} = 0,11 \text{ mA}$$

Parámetros

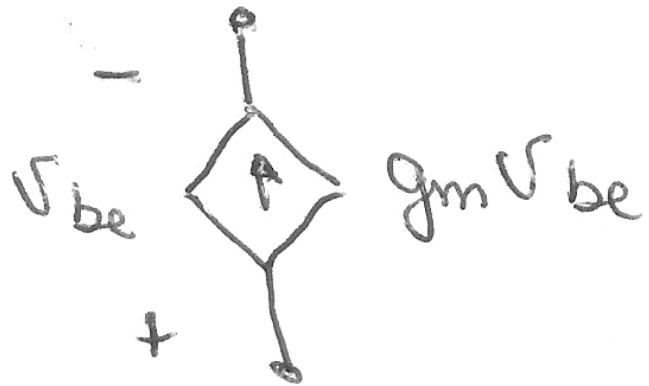
$$g_m = \frac{I_c}{V_T} = \frac{11 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 0,44 \text{ S} = \frac{440 \text{ mA}}{\text{V}}$$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{\frac{440 \text{ mA}}{\text{V}}} = 227 \Omega$$

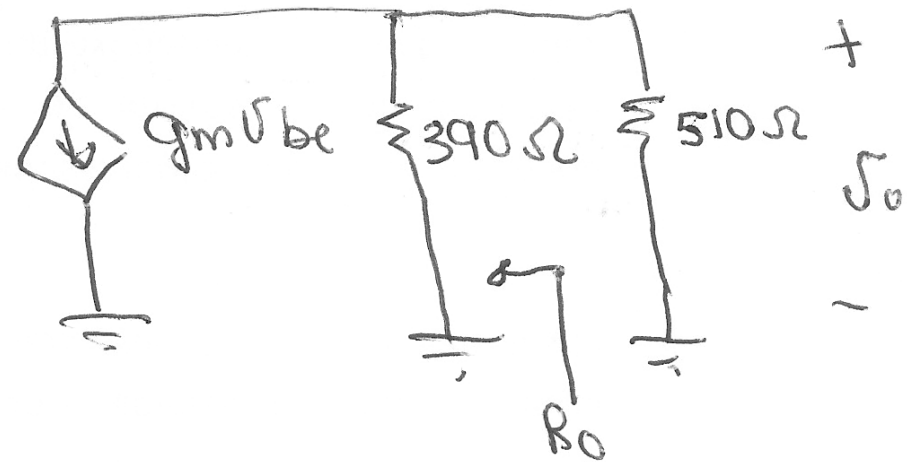
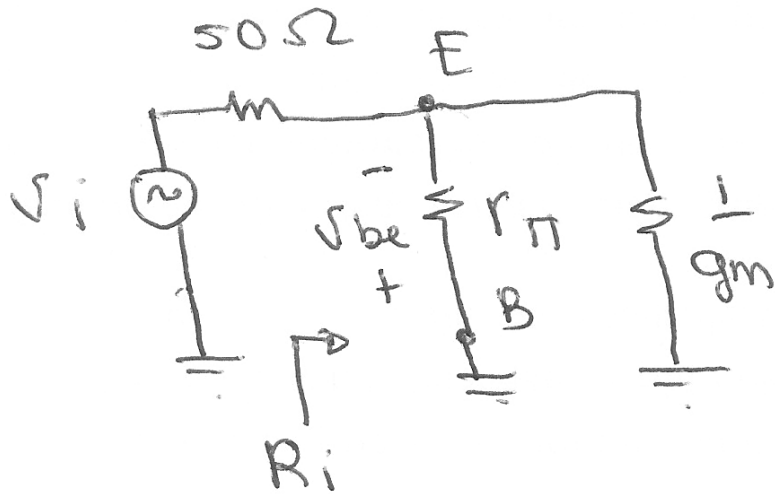
Análisis de pequeña señal. Modelo π



Circuito equivalente (otra aplicación del Teorema de Sustitución)



$$R_{eq} = \frac{V_{be}}{g_m V_{be}} = \frac{1}{g_m}$$



Ganancia de voltaje v_o vs. v_{be}

$$v_o = -g_m (390 \parallel 510) v_{be}$$

$$v_o = -440 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \left(0,221 \frac{\text{V}}{\text{mA}}\right) v_{be}$$

$$v_o = -97,24 v_{be}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{be}} = -97,24$$

Resistencia de entrada y de salida

$$R_i = r_{\pi} \parallel \frac{1}{g_m} \quad r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m}$$

$$R_i = \frac{\frac{\beta}{g_m} \cdot \frac{1}{g_m}}{\frac{\beta}{g_m} + \frac{1}{g_m}} = \frac{\frac{\beta}{g_m^2}}{\frac{\beta+1}{g_m}} = \frac{\beta}{\beta+1} \cdot \frac{1}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$

$$R_i = 2,27 \Omega$$

$$R_o = 390 \Omega$$

Ganancia de voltaje $A_v = V_o/V_i$



$$v_{be} = \frac{-2,27}{50 + 2,27} v_{in}$$

$$v_{be} = -0,043 v_{in}$$

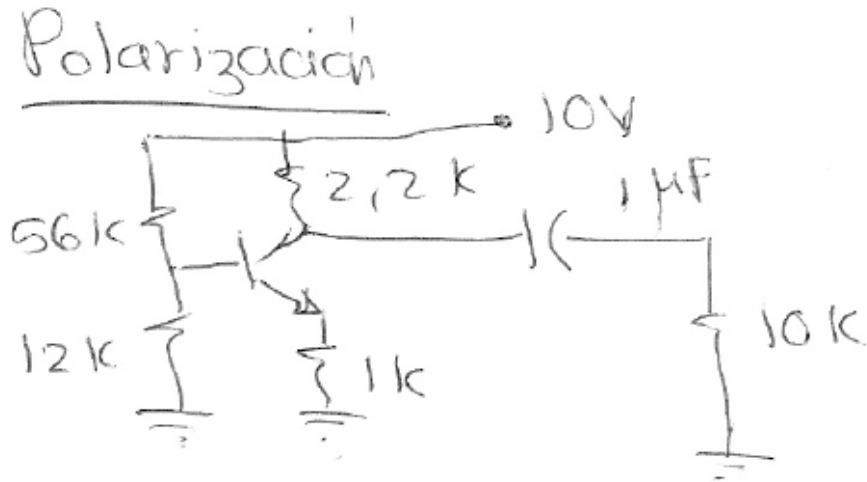
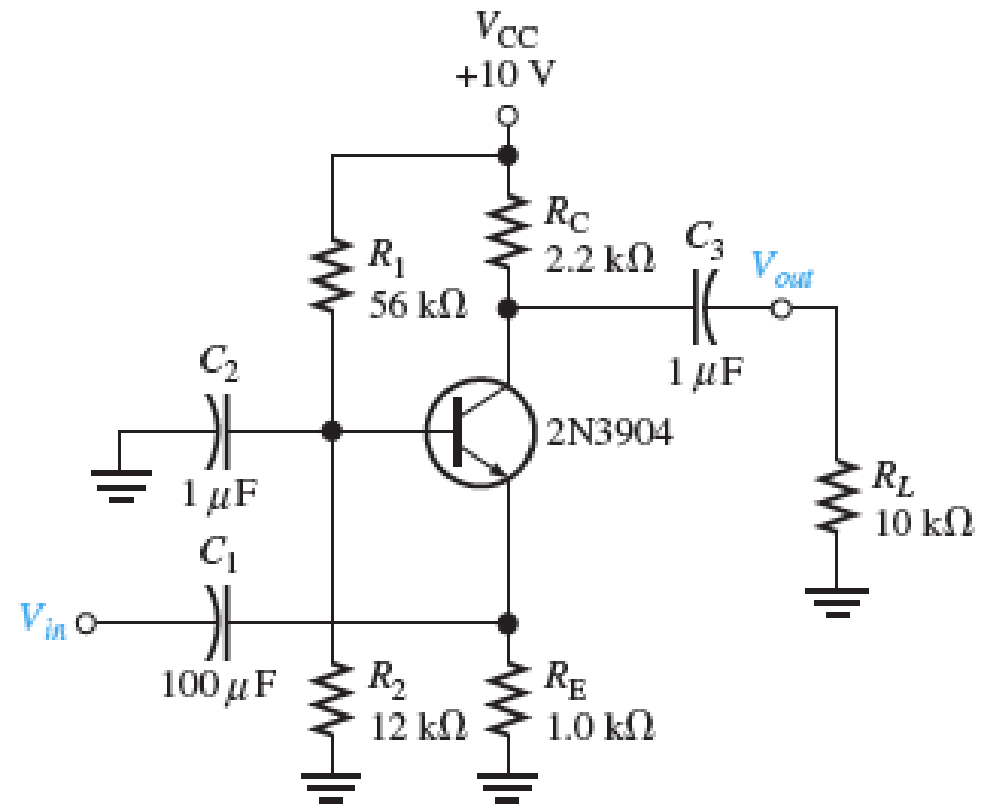
$$v_o = -97,24 v_{be} = (-97,24)(-0,043) v_{in}$$

$$v_o = 4,18 v_{in}$$

$$A_{v_{tot}} = \frac{v_o}{v_{in}} = 4,18$$

EJERCICIO CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

Para el circuito mostrado en la figura, calcule la ganancia de voltaje, la impedancia de entrada y la impedancia de salida, considerando que $\beta = 100$ y $V_{BE} = 0,7V$.



$$V_{BB} = \frac{12}{12 + 56} \times 10 = 1,76V$$

$$R_{BB} = 56 \parallel 12 = 9,88$$

Cálculo de la corriente de base, colector y emisor y voltaje colector-emisor

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$1,76V = 9,88 I_B + 0,7V + 1k I_E$$

$$1,76V - 0,7V = (9,88 + 251) I_B$$

$$I_B = \frac{1,06V}{260,88k} = 0,0041mA$$

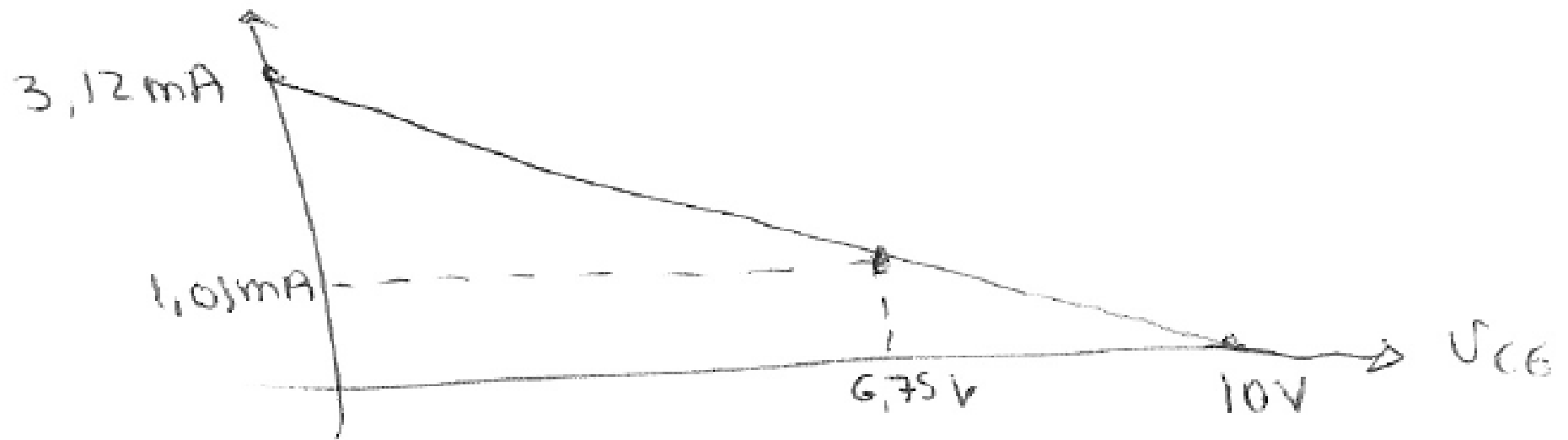
$$I_E = 1,02mA$$

$$I_C = 1,01mA$$

$$V_{CE} = 10V - 2,2 \times 1,01 - 1k \times 1,02 = 6,75V$$

¿Transistor en la zona activa? Ubicación del punto de operación

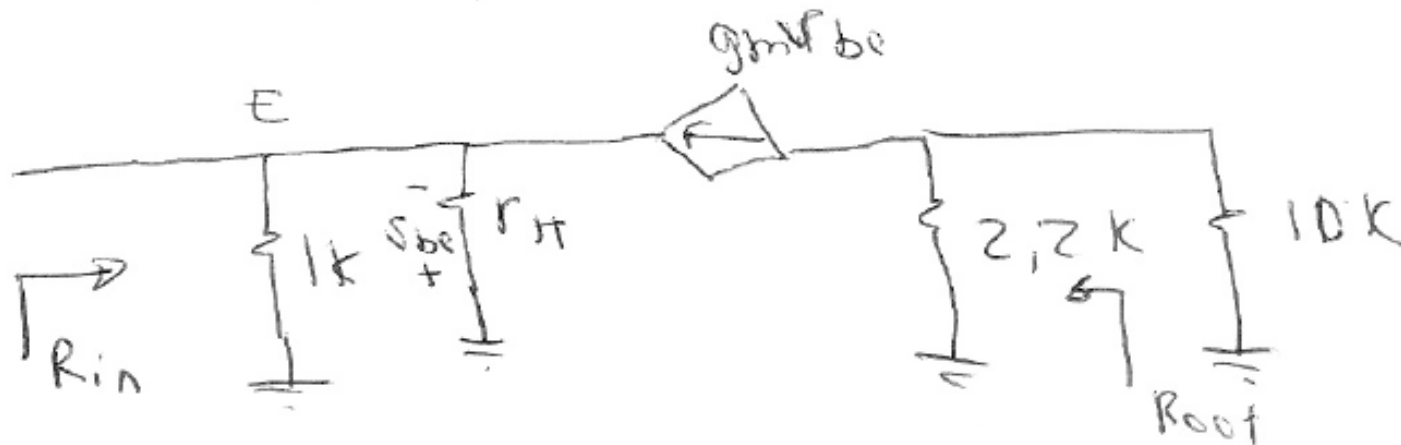
$$I_{C\max} = \frac{10V}{3,2k} = 3,12mA$$



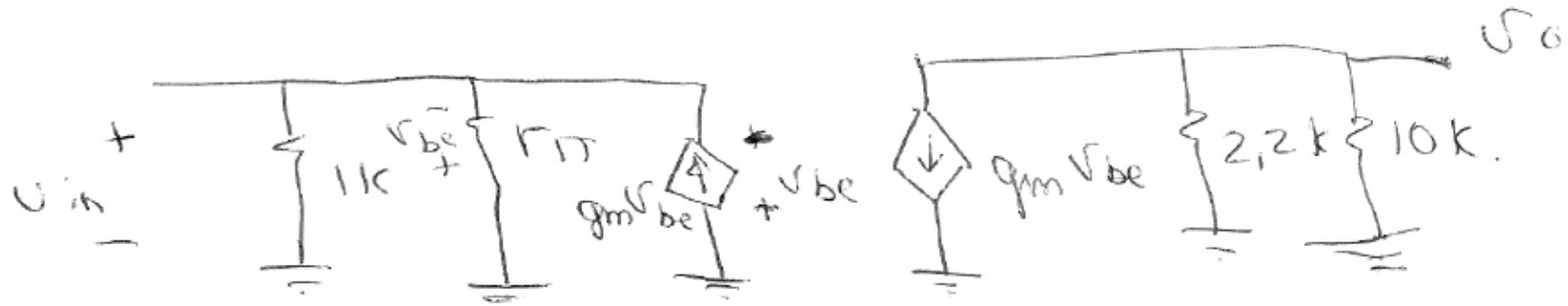
Modelo de pequeña señal

$$r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B} = \frac{25 \text{ mV}}{0,0041 \text{ mA}} = 6.097,56 \text{ } \Omega = 6,1 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = \frac{I_c}{V_T} = \frac{1,01 \text{ mA}}{25 \text{ mV}} = 0,04 \text{ S} \quad \frac{1}{g_m} = 24,75 \text{ } \Omega$$



Desarrollo y simplificación del circuito de entrada. Resultados



$$v_o = -g_m (2.2k \parallel 10k) v_{be}$$



$$v_{be} = -v_{in} \quad v_o = 0.042(1.80k\Omega) v_i$$

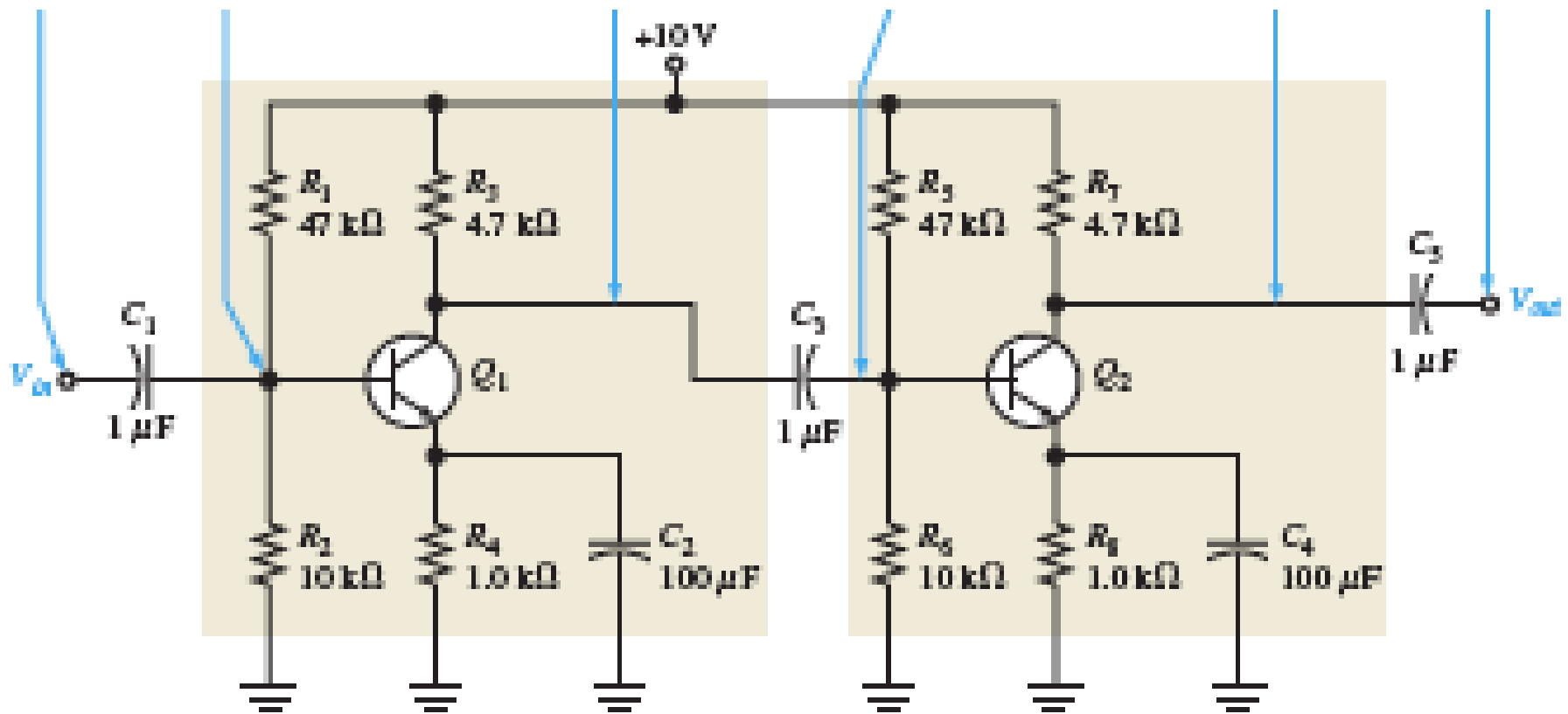
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 72$$

$$R_{in} = 1k \parallel 6.1k \parallel 24.75\Omega = 24.06\Omega$$

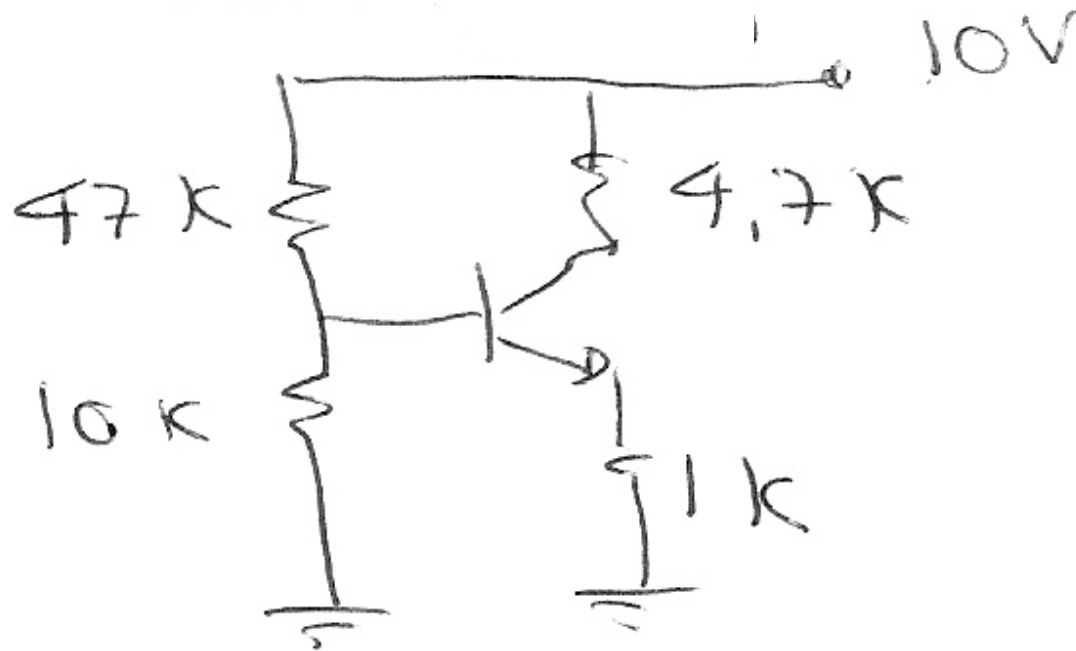
$$R_{out} = 2.2k\Omega$$

EJERCICIO ETAPAS ACOPLADAS CAPACITIVAMENTE

Para el circuito mostrado en la figura, determine la ganancia total, la resistencia de entrada y la resistencia de salida. Considere $\beta = 150$ y $V_{BE} = 0,7V$.



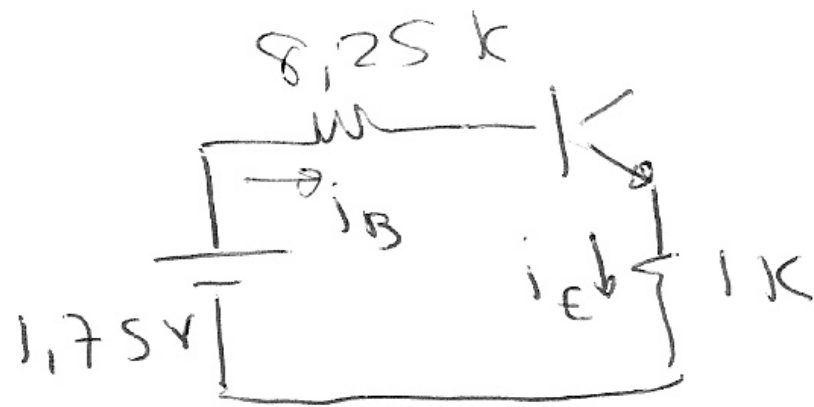
Polarización: Ambas etapas son iguales



$$V_{BB} = \frac{10}{10+47} \times 10V = 1,75V$$

$$R_{BB} = 8,25 k\Omega$$

Circuito de base



$$1,75V = 8,25i_B + 0,7 + 1k i_E$$

$$i_E = (\beta + 1) i_B$$

$$i_B = \frac{1,75 - 0,7V}{8,25 + 151} = \frac{1,05}{159,25} = 0,01 \text{ mA}$$

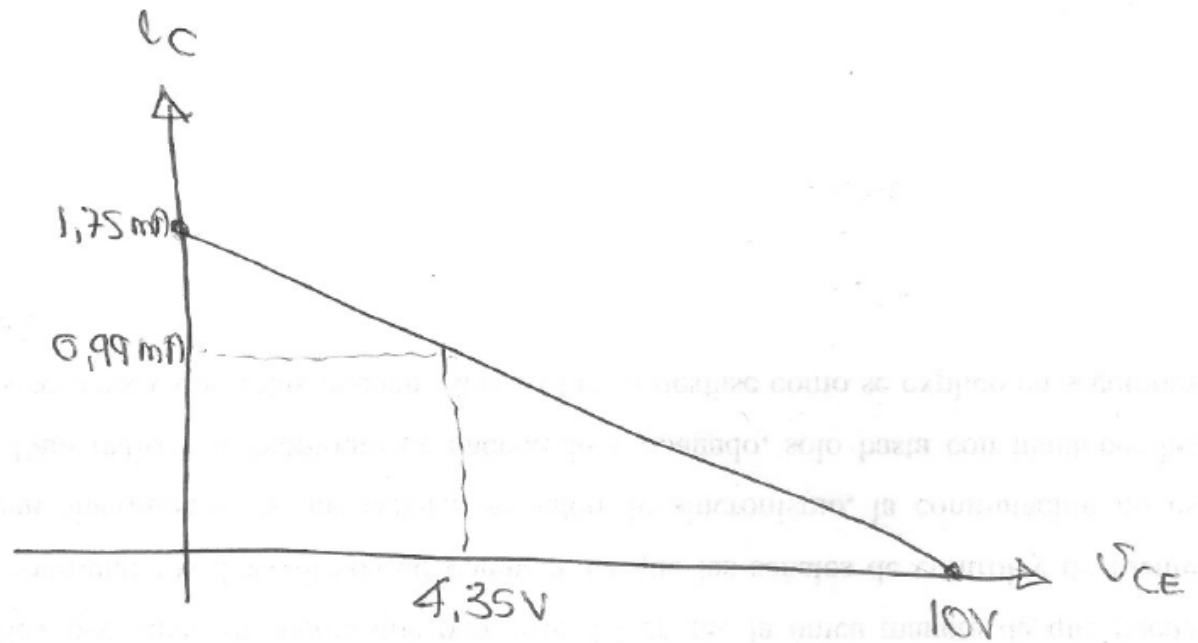
$$i_E = 1 \text{ mA}$$

$$i_{C \text{ max}} = 1,75 \text{ mA}$$

$$i_C = 0,99 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10V - 4,7 \times 0,99 - 1 \times 1 = 4,35V$$

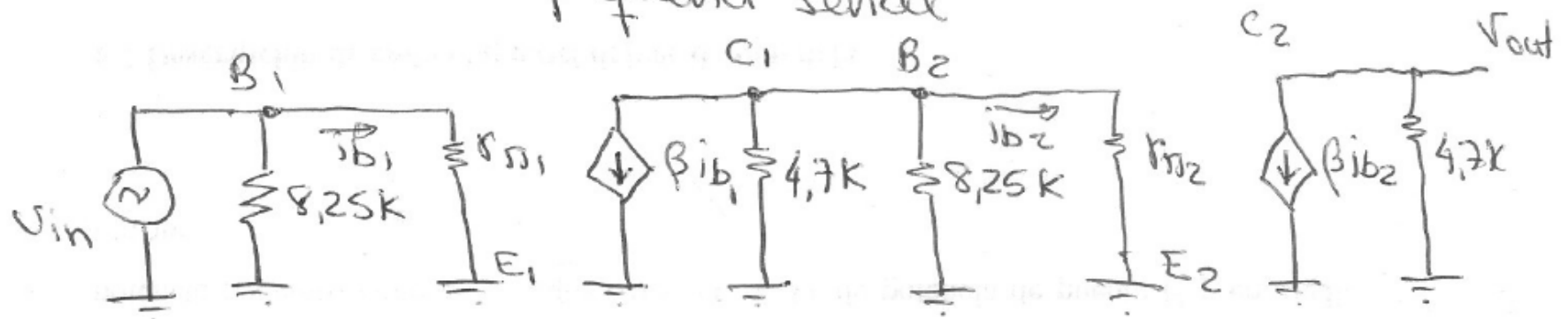
Punto de operación



Parámetros para el modelo de pequeña señal

$$r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B} = 3,775\text{ K}$$

Modelo de pequeña señal



$$V_{out} = -4,7k \beta i_{b2}$$

$$R_{par} = 4,7k \parallel 8,25k = 2,99k$$

$$i_{b2} = \frac{-R_{par}}{R_{par} + r_{\pi 2}} \beta i_{b1} = \frac{-2,99}{2,99 + 3,775} \beta i_{b1} = -66,3 i_{b1}$$

$$i_{b1} = \frac{V_{in}}{3,775}$$

$$i_{b2} = -\frac{66,3 \text{ V}_{in}}{3,775} = -17,56 \text{ V}_{in}$$

$$V_{out} = -4,7 \times 150 (-17,56) \text{ V}_{in} = 12.381,32 \text{ V}_{in}$$

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 12.381,32$$

$$R_{in} = 8,25 \text{ k} \parallel r_{\pi} = 8,25 \text{ k} \parallel 3,775 \text{ k} = 2,59 \text{ k}$$

$$R_{out} = 4,7 \text{ k}$$

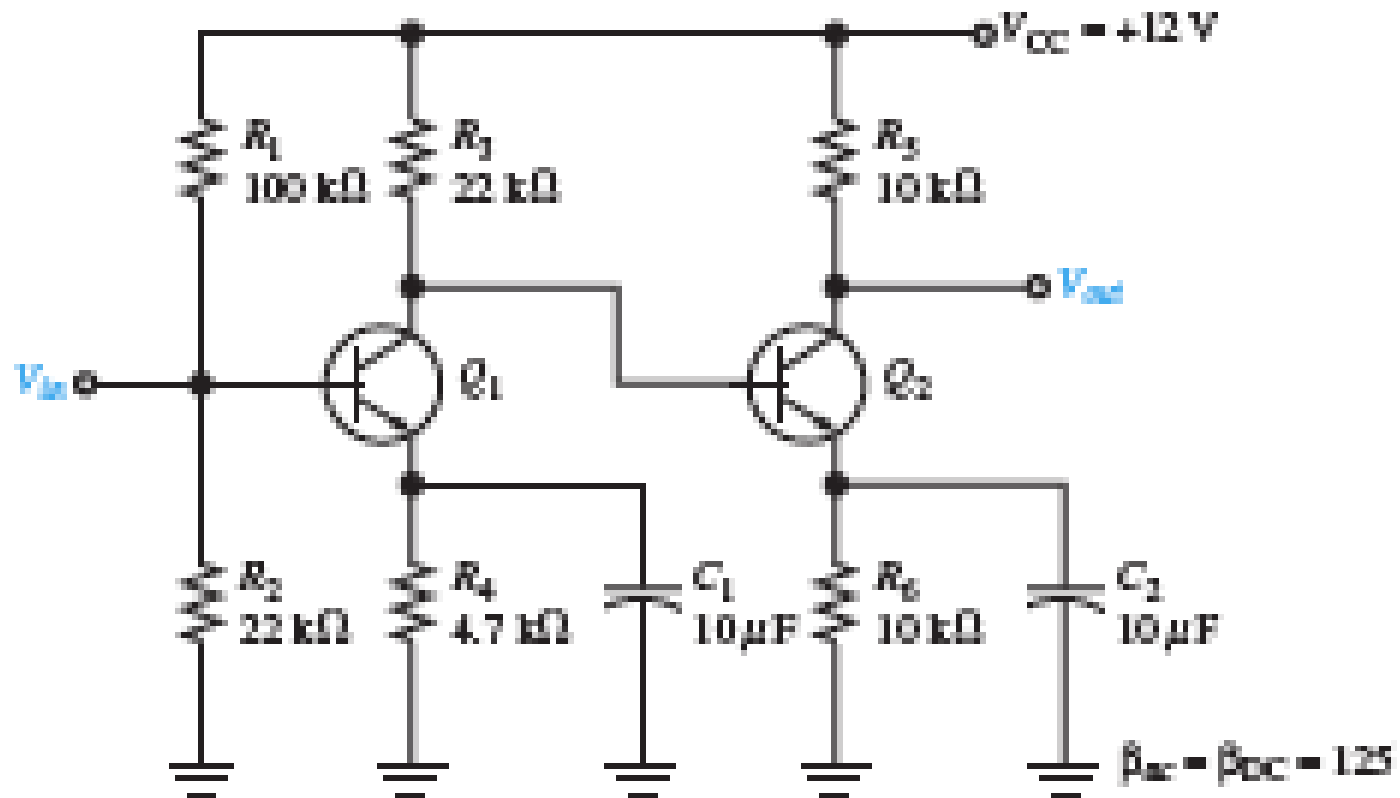
Impedancias de los condensadores a 1 kHz

$$\text{Para } C_1, C_3 \text{ y } C_5 \quad Z_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi 1000 \text{ C}} = 159,25 \Omega$$

$$\text{Para } C_2 \text{ y } C_4 \quad Z_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi 1000 \text{ C}} = 1,59 \Omega$$

EJERCICIO ETAPAS ACOPLADAS DIRECTAMENTE

Para el circuito mostrado en la figura, determine la ganancia total, la resistencia de entrada y la resistencia de salida. $\beta = 125$ y $V_{BE} = 0,7V$



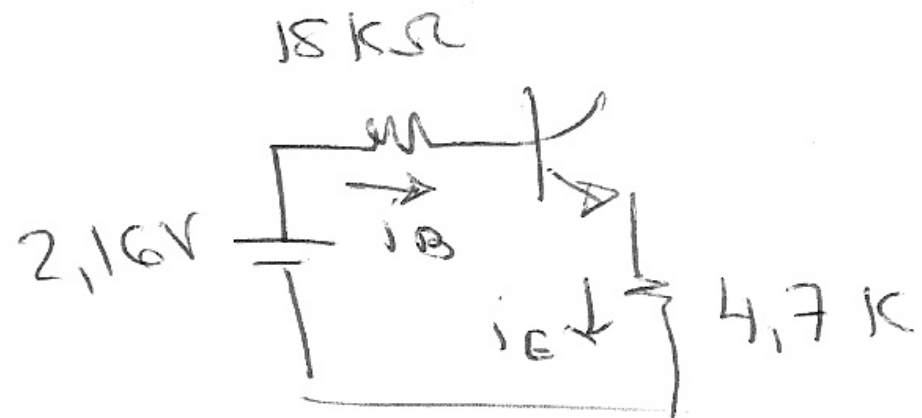
Circuitos de polarización. Circuito de base del primer transistor

$$V_{BB} = \frac{22 \text{ k}}{(100 + 22) \text{ k}} \times 12 \text{ V} = 2,16 \text{ V}$$

$$R_{BB} = 18 \text{ k}\Omega$$

$$i_E = (\beta + 1) i_B$$

$$\beta = 125$$



$$2,16 \text{ V} = 18 i_B + 0,7 + 4,7 \times 126 \times i_B$$

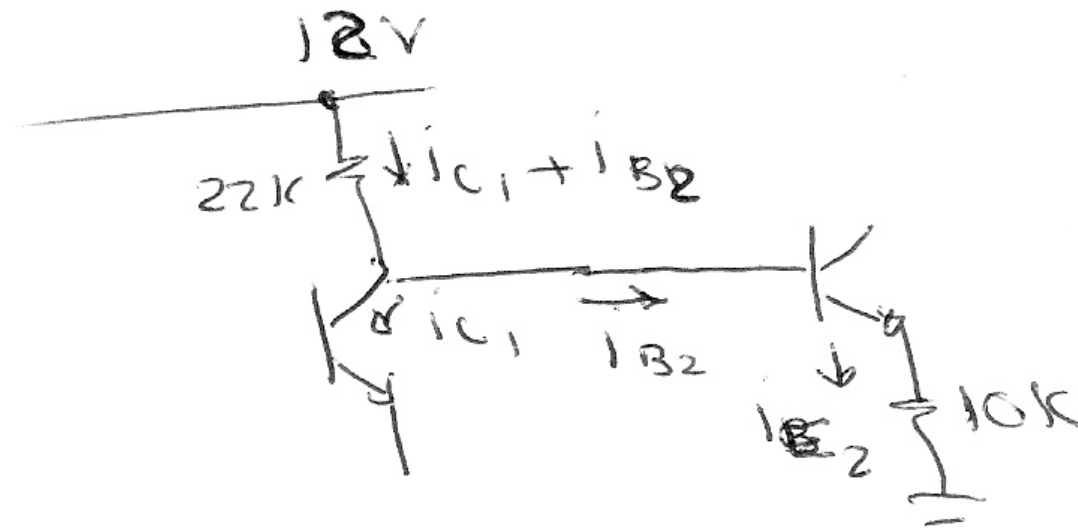
$$i_{B1} = \frac{2,16 - 0,7}{18 + 592,2} = 2,40 \mu\text{A}$$

$$i_{E1} = 0,30 \text{ mA}$$

$$i_{C1} = 0,30 \text{ mA}$$

$$i_{C1 \text{ max}} = 0,45 \text{ mA}$$

Circuito de base del segundo transistor



$$12V = 22(i_{c1} + i_{B2}) + 0,7 + (\beta + 1)i_{B2} \quad 10 \text{ k} \Rightarrow$$

$$12 = 22i_{c1} + 22i_{B2} + 0,7 + 126 \times 10 i_{B2} =$$

$$12 = 22 \times 0,30 + 0,7 + 22i_{B2} + 1260 i_{B2}$$

$$12 = 6,65V + 0,7V + 22i_{B2} + 10(126)i_{B2}$$

$$I_{B2} = \frac{12 - 6,65 - 0,1}{22 + 1260} = \frac{4,65}{1282} = 3,63 \mu\text{A}$$

$$I_{E2} = 0,46 \text{ mA} \quad I_{C2} = 0,45 \text{ mA} \quad I_{C2 \text{ max}} = 0,6 \text{ mA}$$

$$V_{CE1} = 12\text{V} - 8,07 = 3,93\text{V}$$

$$V_{CE2} = 12 - 20 \times 0,45 = 12 - 9,06 = 2,94$$

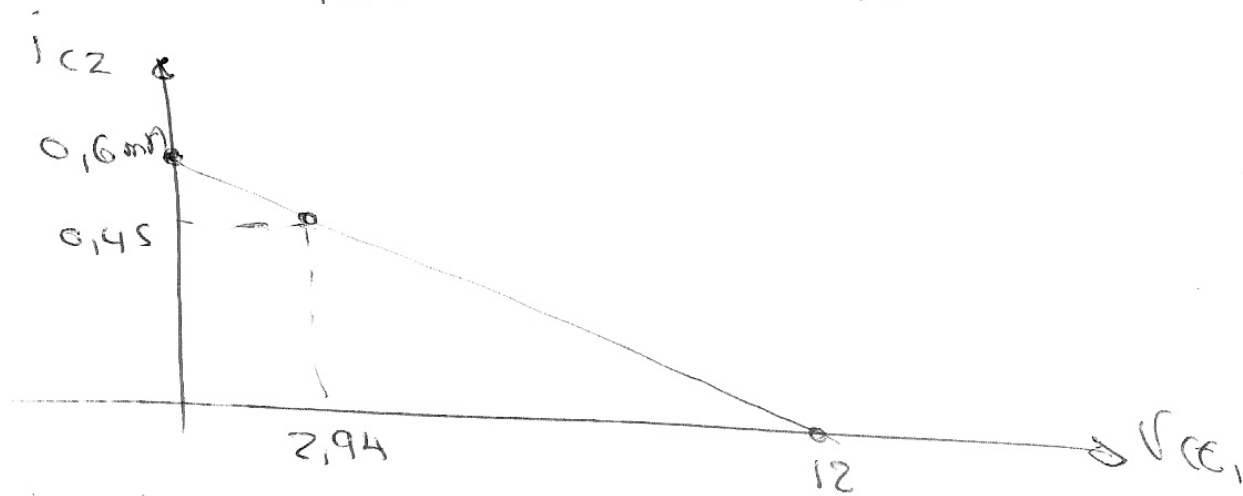
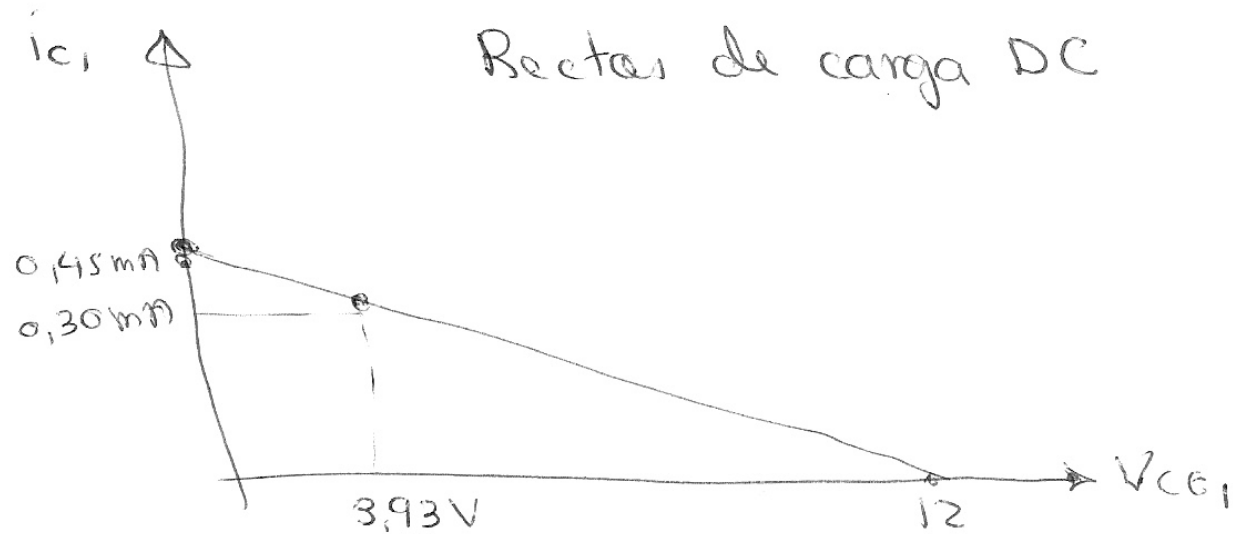
Parámetros para el modelo de pequeña señal

$$r_{\pi 1} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{B1}} = \frac{25 \text{ mV}}{2,40 \mu\text{A}} = 10,42 \text{ k}\Omega$$

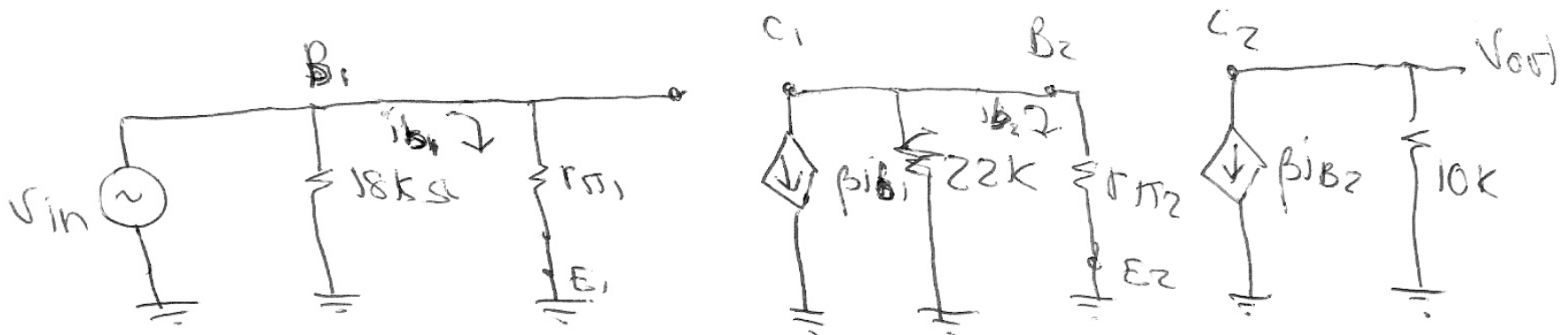
$$r_{\pi 2} = \frac{25 \text{ mV}}{I_{B2}} = \frac{25 \text{ mV}}{3,63 \mu\text{A}} = 6,89 \text{ k}\Omega$$

Rectas de carga DC : $V_{CE} = V_C$ porque $V_E = 0$

La excursión de salida no puede ser mayor que 2,9V.



Modelo AC



$$V_{out} = -\beta i_{b2} 10K = -1250 i_{b2}$$

Divisor de corrente

$$i_{b2} = -\frac{22K}{22K + r_{\pi 2}} \beta i_{b1} = \frac{-22}{22 + 6,89} 125 i_{b1} =$$

$$= 95,19 i_{b1}$$

$$V_{out} = -1250 \times 95,19 i_{b1} = 118.987,50 i_{b1}$$

$$\beta_i = \frac{v_{in}}{r_{\pi 1}} = \frac{v_{in}}{10,42}$$

$$v_{out} = \frac{118.987,50}{10,42} v_{in} = 11.419,15 v_{in}$$

$$A_v = 11.419,15$$

$$A_{vS} = 11.419,15$$

$$R_{out} = 10 \text{ k}$$

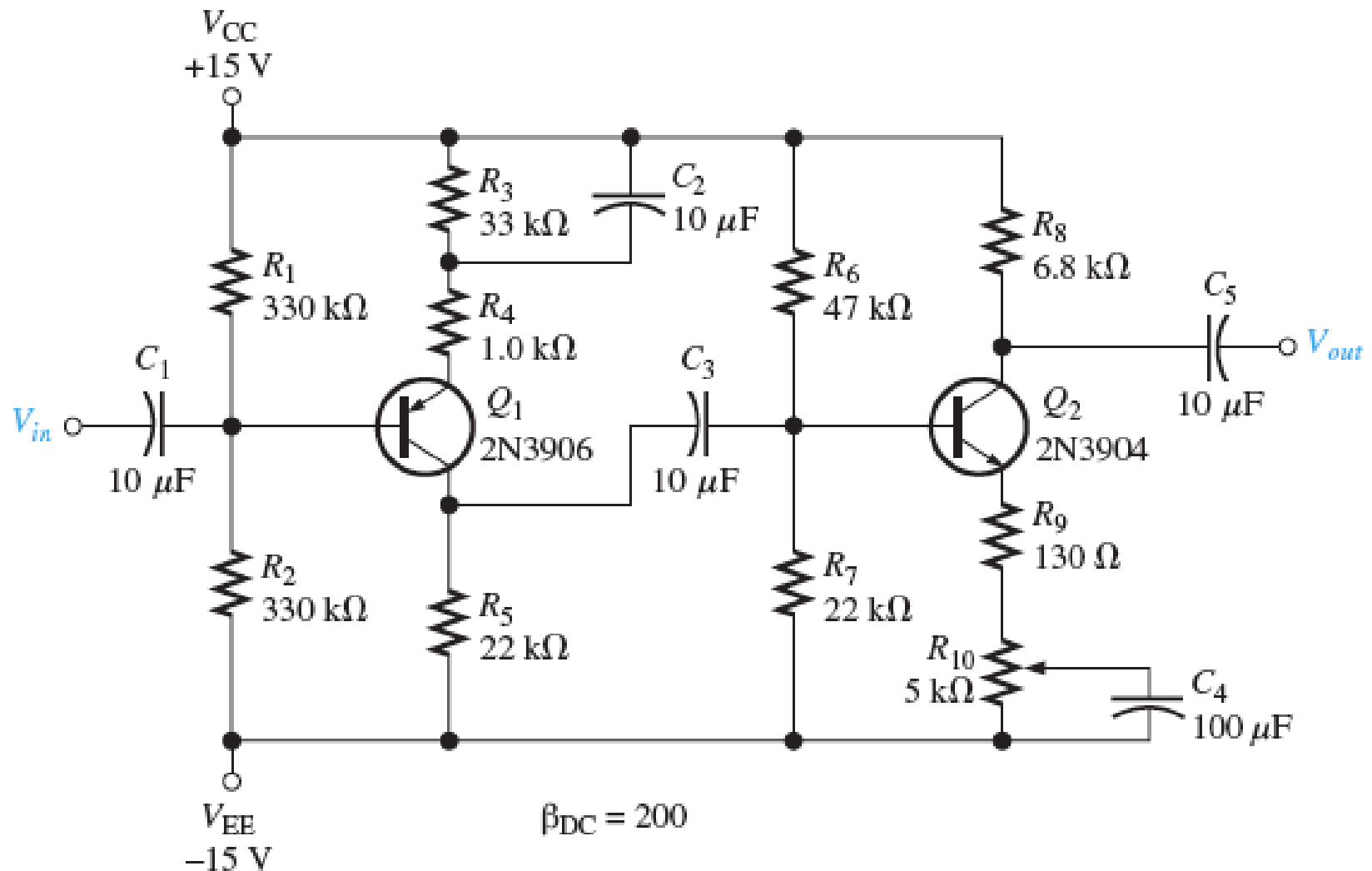
$$R_{in} = 18 \text{ k} \parallel r_{\pi 1} = 18 \text{ k} \parallel 10,42 = 6,6 \text{ k}$$

Maximo voltaje de entrada sin distorsión

$$v_{imax} = \frac{V_{emax}}{11.419,15} = \frac{2,9 \text{ V}}{11.419,15} = 2,54 \times 10^{-4} \text{ V} = 254 \mu\text{V}$$

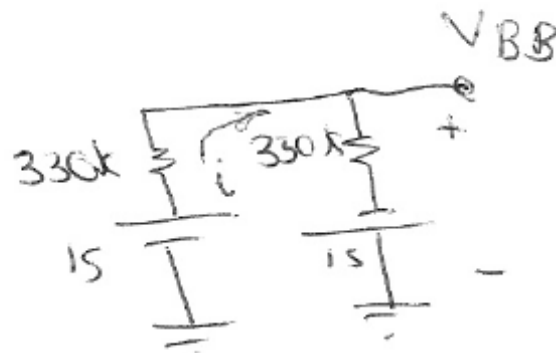
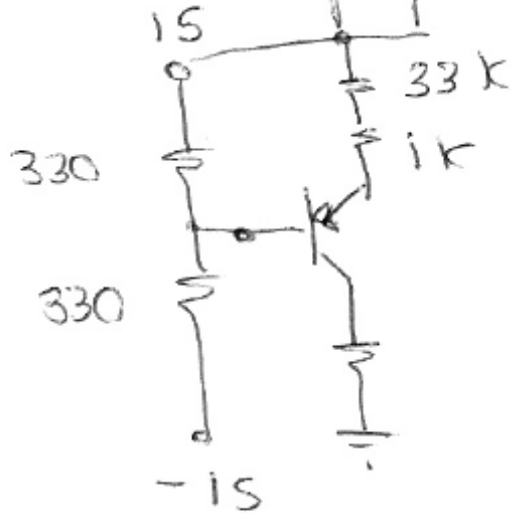
EJERCICIO ETAPAS ACOPLADAS DIRECTAMENTE

Para el circuito mostrado en la figura, determine la ganancia total, la resistencia de entrada y la resistencia de salida.



Transistor pnp - Polarización

$$\beta = 200$$

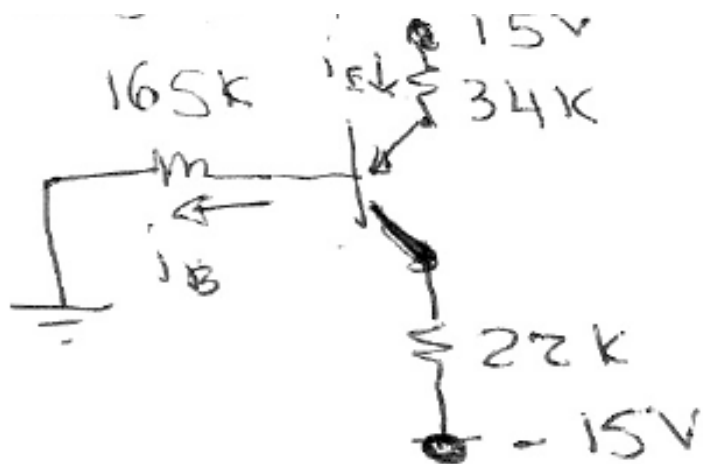


$$i = \frac{30 \text{ V}}{660 \text{ k}} = 0,05 \text{ mA}$$

$$R_B = 330 \parallel 330 = 165 \text{ k}$$

$$V_{BB} = 330 \text{ k} \times i - 15 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

$$V_{EB} = 0,7 \text{ V}$$



$$i_E = (\beta + 1) i_B = 201 i_B$$

$$15V = 34 i_E + V_{EB} + 165 i_B$$

$$15V = 34 \times 201 i_B + V_{EB} + 165 i_B$$

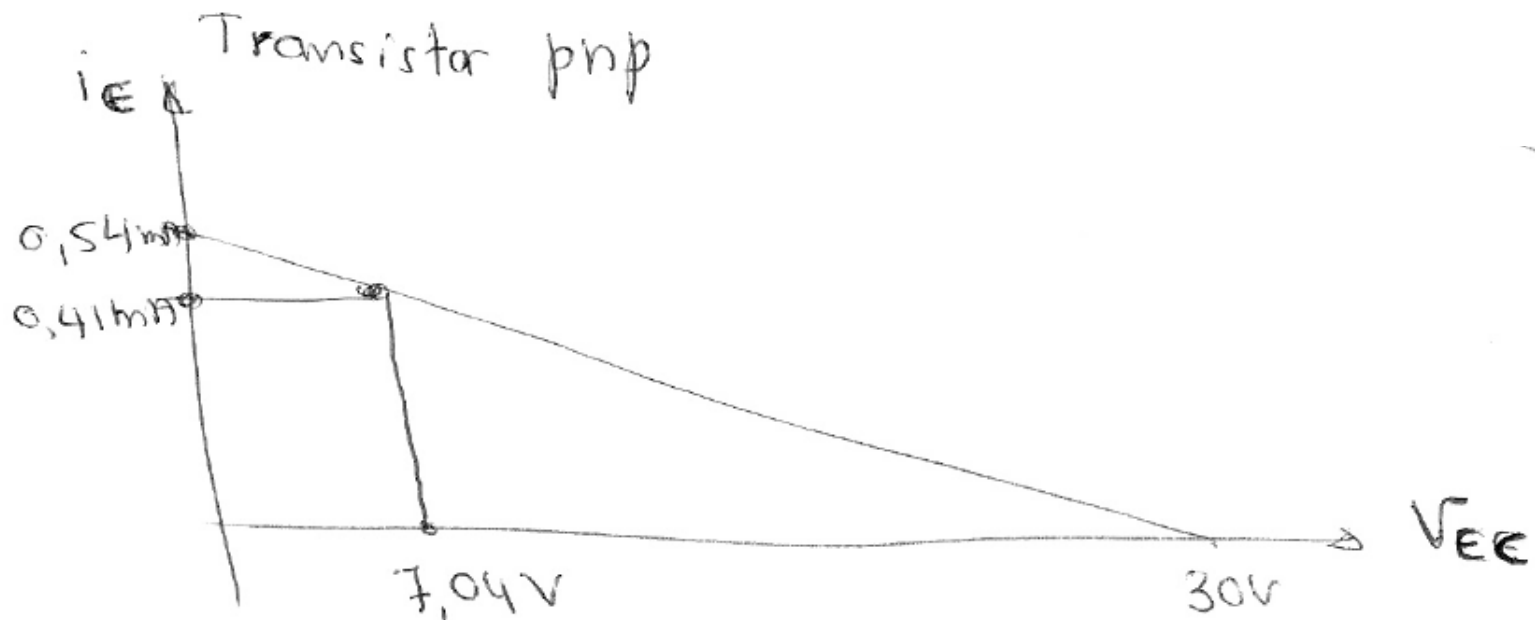
$$i_B = \frac{(15 - 0,7)V}{6834 + 165 k\Omega} = 2,04 \times 10^{-3} \text{ mA} = 2,04 \mu\text{A}$$

$$i_C = 0,41 \text{ mA}$$

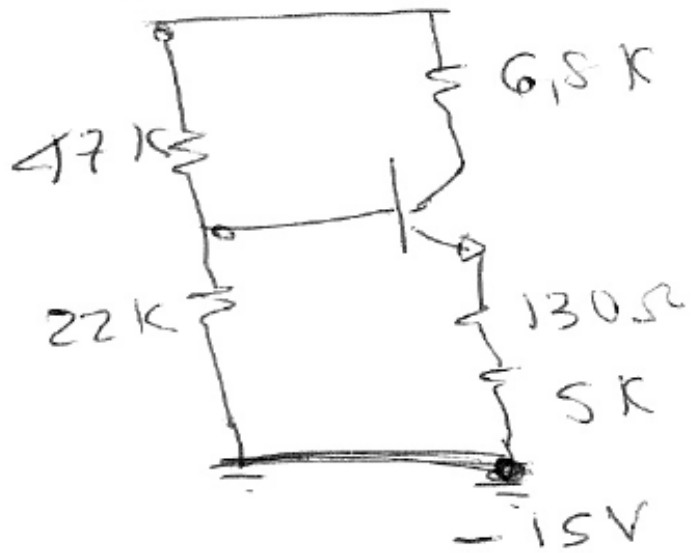
$$i_E = 0,41 \text{ mA}$$

$$i_{Cmax} = \frac{30V}{56 k} = 0,54 \text{ mA}$$

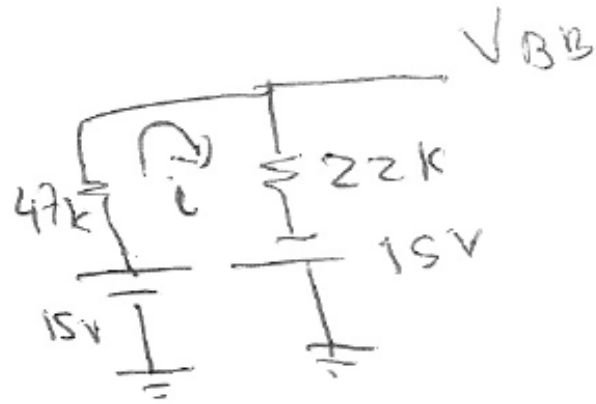
$$V_{EC} = 30 - (34 + 22) i_C = 30 - 22,96 = 7,04 \text{ V}$$



Transistor npn
15V



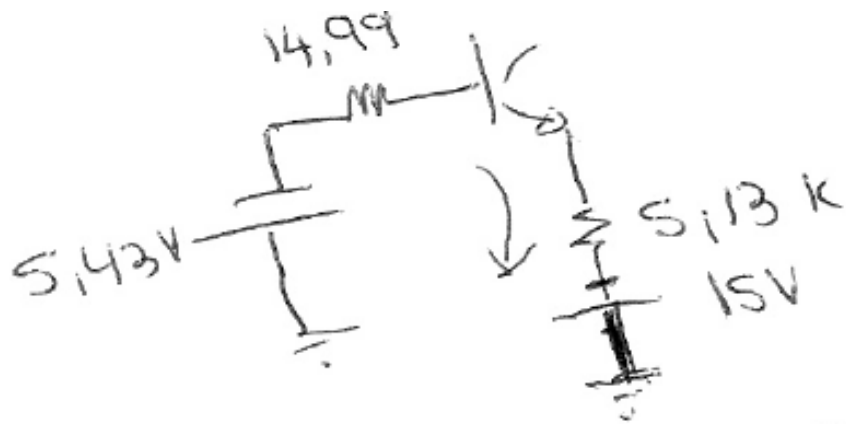
Polarización



$$i = \frac{30V}{(47+22)k} = \frac{30V}{69k} = 0,43 \text{ mA}$$

$$V_{BB} = 0,43 \text{ mA} \times 22k - 15V = 9,57V - 15V = -5,43V$$

$$R_{BB} = 14,99k$$



$$-5.43 = 14.99 i_B + 0.7V + i_E 5.13k - 15V$$

$$i_B = \frac{15 - 5.43 - 0.7}{14.99 + 5.13(\beta+1)} = \frac{8.87V}{1.046,12k} = 8.48 \mu A$$

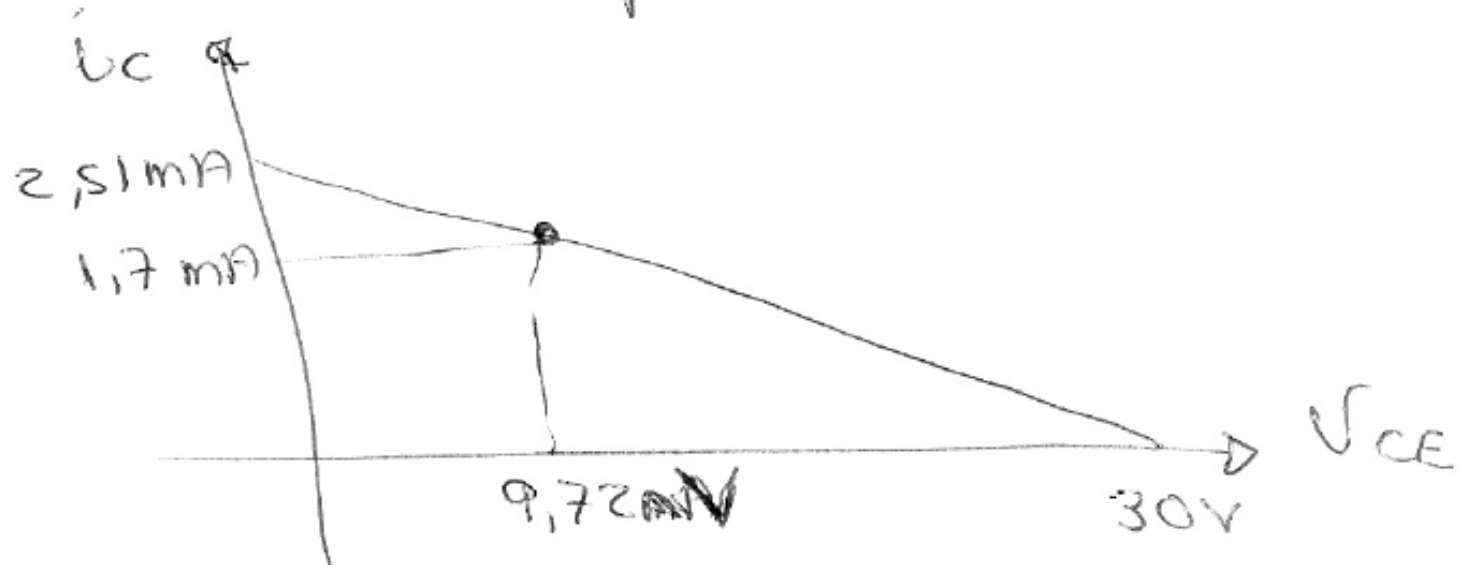
$$i_C = 1.7 \text{ mA}$$

$$i_E = 1.704 \text{ mA}$$

$$i_{C \text{ max}} = \frac{30V}{6.8 + 5.13} = 2.51 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 30 - (6.8 + 5.13) 1.7 = 9.72V.$$

Transistor npn

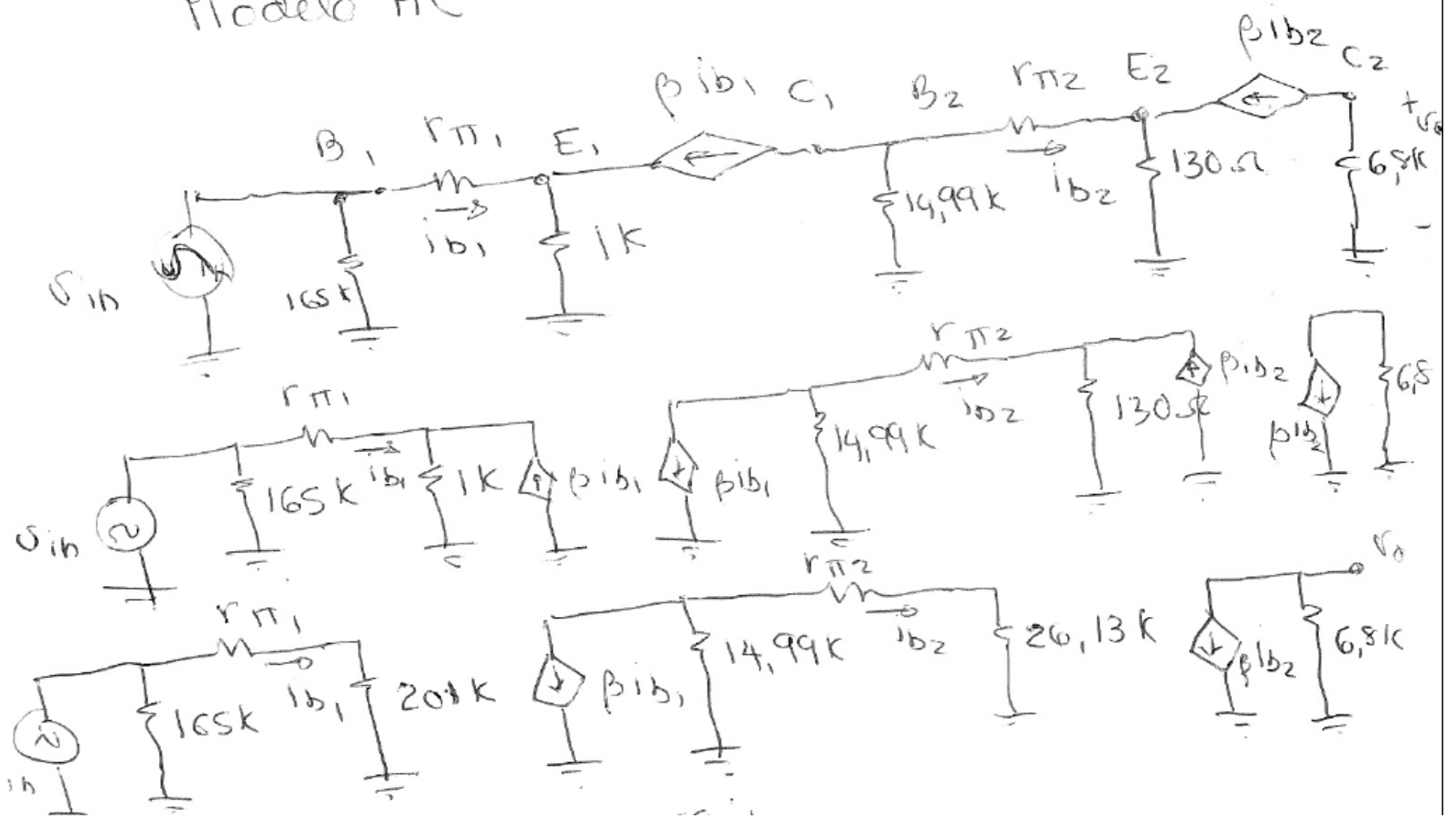


Parâmetros

$$r_{\pi_1} = \frac{V_T}{I_{B1}} = \frac{25 \text{ mV}}{2,04 \mu\text{A}} = 12,25 \text{ k}\Omega$$

$$r_{\pi_2} = \frac{V_T}{I_{B2}} = \frac{25 \text{ mA}}{8,48 \mu\text{A}} = 2,94 \text{ k}\Omega$$

Modelo AC



$$V_o = -6,8 \beta i_{b2} = -1360 i_{b2}$$

$$i_{b2} = - \frac{14,99}{14,99k + r_{\pi 2} + 26,13k} \beta i_{b1} = 68,04 i_{b1}$$

$$i_{b1} = \frac{v_{in}}{12,25 + 201k} = \frac{v_{in}}{213,25} \quad V_o = \pm \frac{1360 \times 68,04}{213,25} v_{in}$$

$$V_o = 436,23 v_i$$

$$A_v = \frac{V_o}{v_i} = 436,23$$

$$R_{in} = 165k \parallel (12,25 + 201) =$$

$$= 165 \parallel 213,25k = 93,02k\Omega$$

$$R_{out} = 6,8k$$

Excursión a la salida 9,7 V.

Máximo voltaje de entrada

$$V_{i,max} = \frac{V_{o,max}}{436,23} = 0,022 \text{ V} = 22,24 \text{ mV}$$