

Índice

<i>TEMA 13: Análisis de circuitos amplificadores</i>	<i>13.1</i>
13.1. INTRODUCCIÓN	13.1
13.2. AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN	13.3
13.3. AMPLIFICADOR EN COLECTOR COMÚN (SEGUIDOR DE EMISOR)	13.6
13.4. AMPLIFICADOR EN BASE COMÚN	13.10
13.5. COMPARACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES	13.11
13.6. AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR	13.12

Tema 13

Análisis de circuitos amplificadores

13.1.- Introducción

Como se aprecia en el circuito equivalente con parámetros “h”, una pequeña i_b , puede dar lugar a una i_c proporcional pero de valor bastante mayor. Esa fuente de corriente dependiente representa el efecto transistor, base de la amplificación.

Por lo tanto, si consideramos la base como entrada y el colector como salida, es decir, configuración de emisor común, se aprecia una ganancia de corriente. ¿Qué podemos decir de las tensiones? ¿Qué ocurre con las distintas configuraciones? Por otra parte, ¿qué tensión tenemos que aplicar a la entrada para obtener una determinada corriente?, es decir, ¿cuánto vale la impedancia de entrada? ¿Qué cargas podemos atacar sin que la corriente solicitada para una determinada tensión de salida

provoque pérdidas de ganancia?, es decir, ¿cuál es la impedancia de salida? Este tema tiene como objetivo dar respuesta a todas estas preguntas.

Para ello, se analizarán diferentes circuitos amplificadores con el BJT en emisor, base y colector común para, finalmente, hacer una comparación entre las distintas configuraciones.

Por otra parte, existen muchos circuitos que no consisten simplemente en las configuraciones de emisor, base y colector común. Así, por ejemplo, un amplificador en emisor común puede tener una resistencia de realimentación entre colector y base o tener una resistencia de emisor. Además, un circuito puede estar formado por varios transistores interconectados de alguna forma. En cualquier caso, para determinar analíticamente el comportamiento de pequeña señal, pueden seguirse los siguientes pasos:

- 1. Identificar la configuración en la que está trabajando el BJT.*
- 2. Sustituir el BJT por su circuito equivalente de pequeña señal, identificando claramente los terminales de emisor, base y colector. Procurar mantener la misma posición relativa que en el circuito original.*
- 3. Transferir todos los componentes (resistencias, condensadores y fuentes de señal) desde la red al circuito equivalente.*
- 4. Puesto que sólo estamos interesados en las componentes de señal, cada fuente de continua independiente se sustituye por su resistencia interna: las fuentes de tensión ideales se sustituyen por un cortocircuito, mientras que, las fuentes de corriente ideales se sustituyen por un circuito abierto.*
- 5. Finalmente, se resuelve el circuito lineal resultante aplicando las leyes de Kirchoff.*

13.2.- AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN

La Figura 13.1 representa esta configuración. Antes de analizar la amplificación, se deberá analizar la polarización. El análisis de la polarización servirá, por una parte, para garantizar que el transistor se encuentre polarizado en la zona activa y, por otra, para fijar los valores de los elementos del circuito equivalente de pequeña señal.

Una vez resuelta la polarización, es el momento de analizar las señales alternas que se superponen a las componentes continuas.

Para el análisis del régimen dinámico, se deberá plantear el circuito equivalente correspondiente a la frecuencia de la señal alterna. Además de sustituir el transistor por su circuito equivalente, se eliminarán las fuentes de componentes continuas (cortocircuitando las fuentes de tensión y dejando en circuito abierto las fuentes de corriente) y se sustituirán los condensadores por las impedancias que les correspondan. Normalmente, y con el objetivo de facilitar el análisis, se dará por supuesto que la impedancia de los condensadores es nula o infinita. Como trabajaremos a bajas frecuencias, aproximaremos a circuito abierto todos los condensadores presentes en el circuito equivalente del transistor (condensadores de pequeño valor), y a cortocircuito todos los condensadores presentes en el circuito exterior (condensadores de valores elevados, *infinitos*).

Así, partiendo del circuito de la Figura 13.1, obtendremos los circuitos de las Figuras 13.2 y 13.3.

Las magnitudes de salida serán la corriente y la tensión que se medirán en la carga R_L . Se debe tener en cuenta que la carga es, en general, otro circuito (u otra etapa amplificadora), si bien se representa por su impedancia Thevenin (en nuestro caso, por una resistencia).

Las características del circuito amplificador de interés fundamental son: ganancia de tensión, ganancia de corriente, resistencia de entrada y resistencia de salida.

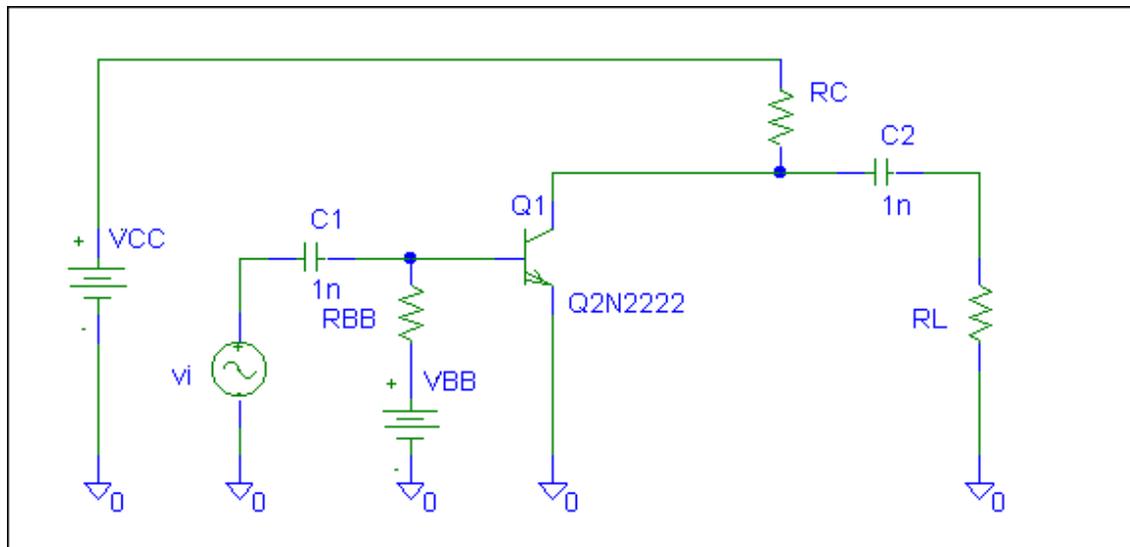


Figura 13.1.- Amplificador en emisor común.

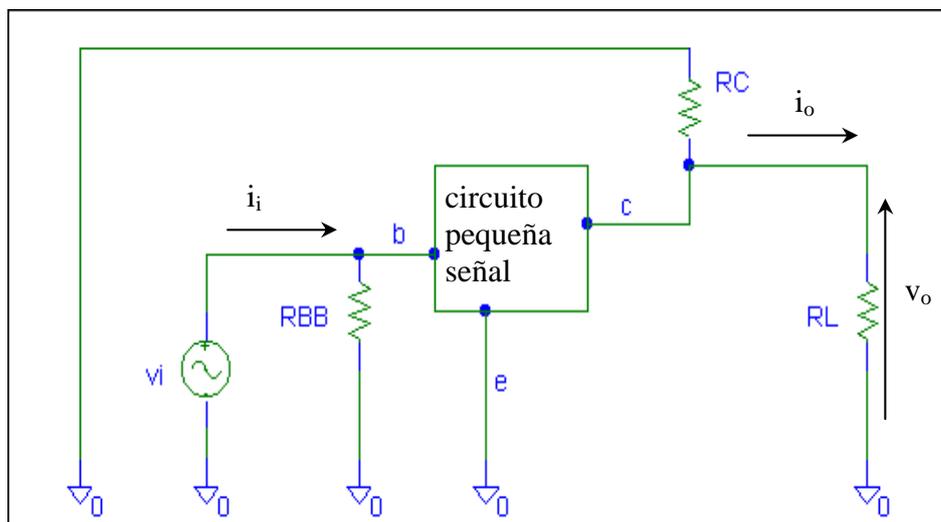


Figura 13.2.- Circuito completo para pequeña señal.

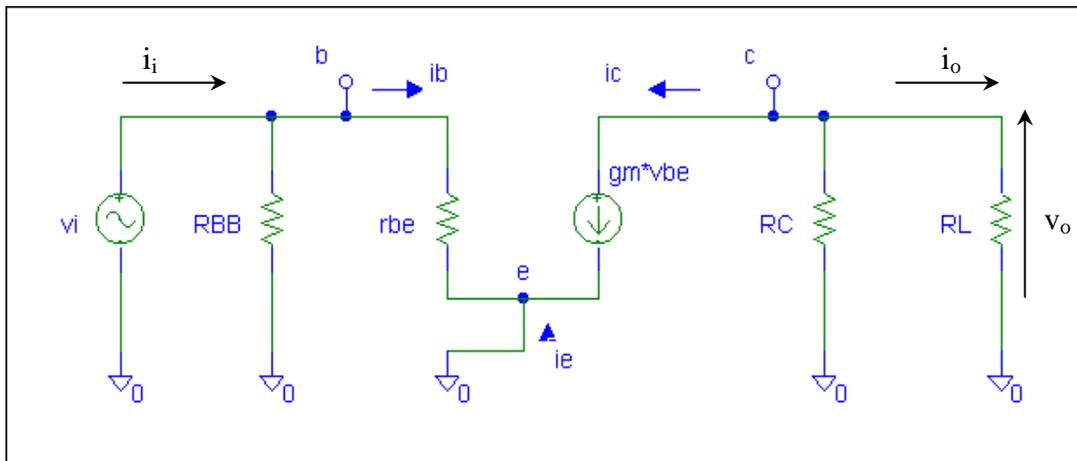


Figura 13.3.- Circuito π simplificado para pequeña señal.

Ganancia de tensión. Es la relación entre las tensiones de salida y entrada:

Conocidos todos los elementos del circuito, podemos calcular las tensiones y corrientes analíticamente. En efecto, si suponemos que $r_{be} = 1\text{ k}\Omega$, $\beta = 100$, $R_C = 50\ \Omega$ y $R_L = 50\ \Omega$ resulta que

$$A_V \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

$$v_o = -(R_C // R_L) \cdot i_c = -(R_C // R_L) \cdot g_m v_{be} = -(R_C // R_L) \cdot g_m r_{be} i_b$$

$$v_o = -(R_C // R_L) \cdot \frac{g_m}{g_b} i_b = -(R_C // R_L) \cdot \beta i_b$$

$$v_i = r_{be} \cdot i_b$$

$$A_V = -\beta \frac{(R_C // R_L)}{r_{be}} = -(R_C // R_L) \beta g_{be} \qquad A_V = \frac{v_o}{v_i} = -2,5$$

Como puede observarse, obtenemos a la salida una **tensión** de la misma forma que la señal de entrada, pero **amplificada**, de mayor amplitud. Además, en este caso la señal de salida está invertida (desfasada 180°); de ahí el signo menos.

Ganancia de corriente. Es la relación entre las corrientes de salida y entrada:

$$A_I \equiv \frac{i_o}{i_i}$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_L} = - \frac{(R_C // R_L)}{R_L} \beta i_b$$

$$i_i = \frac{r_{be}}{R_{BB} // r_{be}} i_b$$

$$A_I = - \frac{(R_C // R_L)(R_{BB} // r_{be})}{R_L r_{be}} \beta$$

Impedancia de entrada. La impedancia que ve el generador de entrada (a su derecha):

$$Z_{in} \equiv \frac{v_i}{i_i} = (R_{BB} // r_{be})$$

Impedancia de salida. La impedancia que ve la carga (a su izquierda):

$$Z_{out} \equiv R_C$$

También podríamos haber utilizado los parámetros “h” para el análisis de pequeña señal.

13.3.- AMPLIFICADOR EN COLECTOR COMÚN (SEGUIDOR DE EMISOR)

El circuito de la Figura 13.4 corresponde a un amplificador en colector común. Adelantando resultados, veremos que su ganancia de tensión es aproximadamente igual a 1, de ahí que se le denomine también seguidor de emisor (el emisor sigue a la señal de entrada, es decir, un cambio en la tensión de la base se manifiesta con un cambio igual en la carga de emisor). Veremos, además, que la impedancia de entrada es habitualmente muy alta (centenares de $k\Omega$), mientras que, la impedancia de salida es muy baja (decenas de ohmios). Por lo tanto, la utilización más corriente de un circuito

en colector común es ser etapa separadora, que cumple la función de transformación de resistencias (de alta a baja) dentro de un amplio rango de frecuencias con $A_v \cong 1$. Finalmente, señalar que el seguidor de emisor proporciona ganancia de potencia.

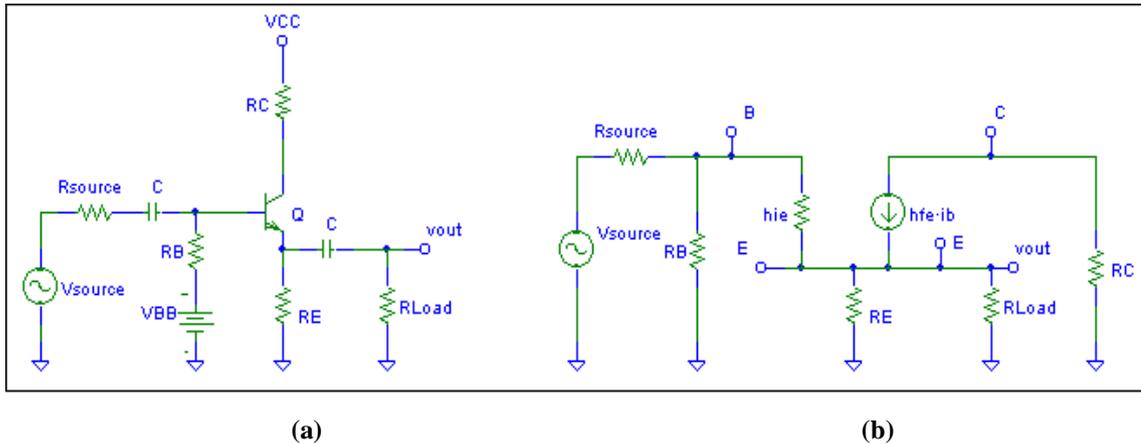


Figura 13.4.- (a) Circuito amplificador en colector común; (b) Circuito equivalente con parámetros h.

Ganancia de tensión

$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i}$$

$$v_{out} = R_E i_e = R_E (i_b + h_{fe} i_b) = R_E (1 + h_{fe}) i_b$$

$$v_{in} = R_B i_R = v_b = v_{be} + v_e$$

$$v_{in} = h_{ie} i_b + v_{out} = [h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})] i_b$$

Por lo tanto, $A_v = \frac{R_E (1 + h_{fe})}{h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})} \leq 1$. Esta ganancia de tensión se ha calculado con

independencia de la carga y del generador de tensión utilizado.

Si tenemos en cuenta el circuito completo, podemos definir:

$$A_{V_s} \equiv \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{v_{out}}{v_{in}} \cdot \frac{v_{in}}{v_s} = A_V \cdot \frac{v_{in}}{v_s}$$

$$v_{out} = R_E // R_L \cdot i_e = R_E // R_L \cdot (i_b + h_{fe} i_b) = (R_E // R_L)(1 + h_{fe}) i_b$$

$$v_s = R_s i_s + v_{in}$$

$$i_s = i_R + i_b = \frac{v_{in}}{R_B} + \frac{v_{in}}{h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})}$$

$$i_s = \frac{v_{in}}{R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]}$$

$$v_s = R_s \frac{v_{in}}{R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]} + v_{in}$$

En definitiva,
$$A_{V_s} = \frac{(R_E // R_L)(1 + h_{fe})}{h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})} \cdot \frac{R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]}{R_s + R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]}$$

expresión que de nuevo es ≤ 1 . Si en esta expresión consideramos generador de tensión ideal, $R_s = 0$, y no tenemos en cuenta la carga, $R_L = \infty$, resulta que $A_{V_s} = A_V$.

El hecho de no conseguir ganancia de tensión, hace que la salida “siga” a la entrada. De ahí el nombre de “seguidor de emisor”.

Ganancia de corriente

Su cálculo dependerá del cálculo que hayamos hecho para la ganancia de tensión.

Considerando el circuito completo, resulta que $A_I \equiv \frac{i_o}{i_s}$, siendo i_o en este caso la

corriente que circula por la carga R_L e i_s la corriente de salida del generador. Es decir,

$i_o = \frac{v_{out}}{R_L}$. Tomando los valores de i_s , v_{out} y v_{in} del apartado anterior, resulta que:

$$A_I = \frac{R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]}{R_L} \cdot \frac{(R_E // R_L)(1 + h_{fe})}{h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})}$$

Impedancia de entrada

$$Z_{in} \equiv \frac{v_{in}}{i_s} = R_B // [h_{ie} + (R_E // R_L)(1 + h_{fe})]$$

Impedancia de salida

Podemos calcularla como $Z_{out} \equiv Z_{out}' // R_E$, siendo $Z_{out}' = \left. \frac{V_2}{I_2} \right|_{v_s=0}$ la impedancia vista por

R_E con $v_s = 0$. Esto es,

$$V_2 = v_e = v_{eb} + v_b = -h_{ie} i_b - (R_s // R_B) i_b = -[h_{ie} + (R_s // R_B)] i_b$$

$$I_2 = -i_e = -(i_b + h_{fe} i_b) = -(1 + h_{fe}) i_b$$

Por lo tanto, $Z_{out}' = \frac{[h_{ie} + (R_s // R_B)]}{(1 + h_{fe})}$ con lo que

$$Z_{out} = R_E // \frac{[h_{ie} + (R_s // R_B)]}{(1 + h_{fe})}$$

A la vista de los resultados obtenidos, resulta que con el amplificador en colector común la ganancia de tensión es aproximadamente la unidad, esto es, la salida sigue a la entrada, la ganancia de corriente es positiva y elevada, la impedancia de entrada es alta y la de salida baja.

13.4.- AMPLIFICADOR EN BASE COMÚN

El circuito de esta configuración es el representado en la Figura 13.5.

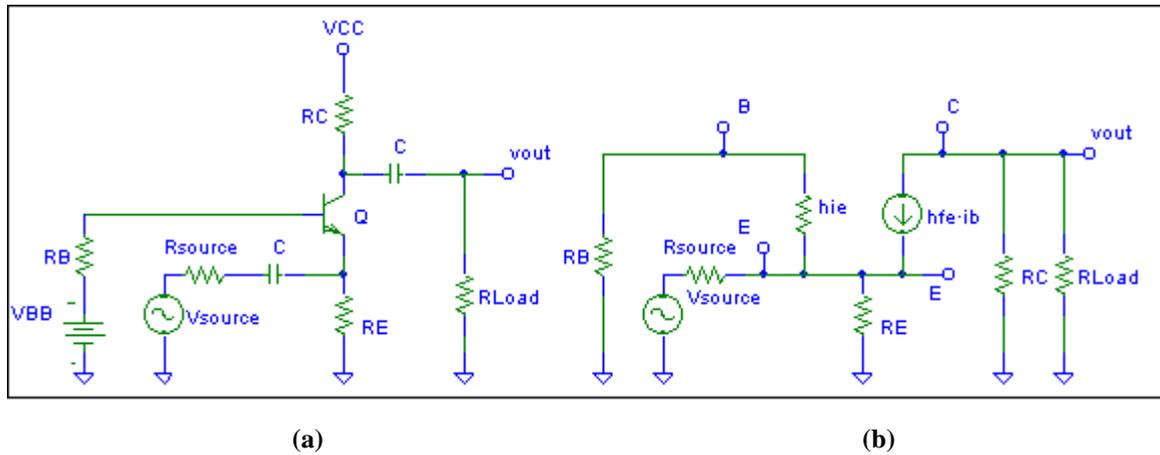


Figura 13.5.- (a) Circuito amplificador en base común; (b) Circuito equivalente con parámetros h de la configuración de emisor común.

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_i}$$

$$v_{out} = -(R_C // R_L) h_{fe} i_b = R_L i_L$$

$$v_i = R_E i_R = -(h_{ie} + R_B) i_b$$

$$A_v = \frac{(R_C // R_L) h_{fe}}{h_{ie} + R_B}$$

$$A_{v_s} = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{v_{out}}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s}$$

$$v_s = R_s i_s + v_i$$

$$i_s = - \frac{R_E (1 + h_{fe}) + (h_{ie} + R_B)}{R_E} \cdot i_b$$

$$A_{Vs} = \frac{(R_C // R_L) h_{fe}}{h_{ie} + R_B} \cdot \frac{\frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}}{R_s + \frac{R_s}{R_E} \cdot \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}} + \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}} = \frac{(R_C // R_L) h_{fe}}{h_{ie} + R_B} \cdot \frac{R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}}{R_s + R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}}$$

$$A_I = \frac{i_L}{i_s}$$

$$i_L = -\frac{R_C // R_L}{R_L} h_{fe} i_b \quad A_I = \frac{R_C // R_L}{R_L} \cdot \frac{R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}}{\frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe}}} \leq 1$$

$$Z_{in} = \frac{v_i}{i_s} \quad Z_{in} = R_E // \frac{h_{ie} + R_B}{1 + h_{fe}}$$

$$Z_{out} = R_C$$

Según estos resultados, aunque la ganancia de tensión sea elevada (y positiva), la ganancia de corriente es pequeña. Respecto a las impedancias, la de entrada es pequeña y la de salida de valor medio (aunque puede ser elevada).

13.5.- COMPARACIÓN ENTRE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES

En un amplificador ideal interesarían altos valores de ganancia de tensión, ganancia de corriente e impedancia de entrada y bajos valores de impedancia de salida. Los valores elevados de la impedancia de entrada garantizan que al conectar el amplificador al generador de señal, toda la señal entra al amplificador. En la tabla 13.1, aparecen resumidos los resultados obtenidos para las diferentes configuraciones.

Recordar que Z_{out} es la impedancia equivalente que “ve” la carga R_L . La impedancia de salida, además de facilitar el análisis de circuitos con más de una etapa, nos da una medida de lo bueno de la adaptación de los circuitos.

PARÁMETRO	CONFIGURACIONES		
	EMISOR COMÚN	COLECTOR COMÚN	BASE COMÚN
A_v (ganancia de tensión)	Elevada y negativa	< 1	Elevada y positiva
A_i (ganancia de corriente)	$\cong -\beta$	$\cong 1 + \beta$	$\cong \frac{\beta}{\beta + 1}$
Z_{in}	Mediana	Elevada	Baja
Z_{out}	Elevada / Mediana	Baja	Elevada / Mediana

Tabla 13.1.- Resumen de resultados para las diferentes configuraciones.

La única configuración que nos da ganancia tanto en corriente como en tensión (potencia) es la de emisor común. Además, las impedancias de entrada y salida que presenta esta configuración suelen ser aceptables en la mayoría de los casos. Todo esto hace que sea la configuración más utilizada.

La configuración en colector común (*seguidor de emisor*) se utiliza para adaptar etapas con impedancias muy diferentes, esto es, como etapa intermedia entre una fuente (de tensión) de gran impedancia y una carga de impedancia baja.

La configuración en base común, nos proporciona una ganancia de tensión elevada sin inversión de la señal de salida (ganancia positiva). Además, también es utilizada para adaptar impedancias, desde el punto de vista de la corriente, entre varias etapas. Es decir, cuando buscamos una Z_{in} pequeña y una Z_{out} elevada.

13.6.- AMPLIFICADOR EN EMISOR COMÚN CON RESISTENCIA DE EMISOR

Del resumen visto en el apartado anterior, hemos dicho que sólo la configuración de emisor común es capaz de proporcionar valores elevados de A_v y A_i . Ahora bien, estas magnitudes dependen del parámetro β , parámetro que presenta grandes dispersiones incluso entre transistores del mismo tipo. Interesaría, por lo tanto, que la A_v y la A_i fueran lo más independientes posible de β . Un procedimiento sencillo para

estabilizar la ganancia de tensión y de corriente consiste en introducir una R_E tal y como se muestra en la Figura 13.6a. Esta estabilización es consecuencia de la realimentación proporcionada por dicha resistencia.

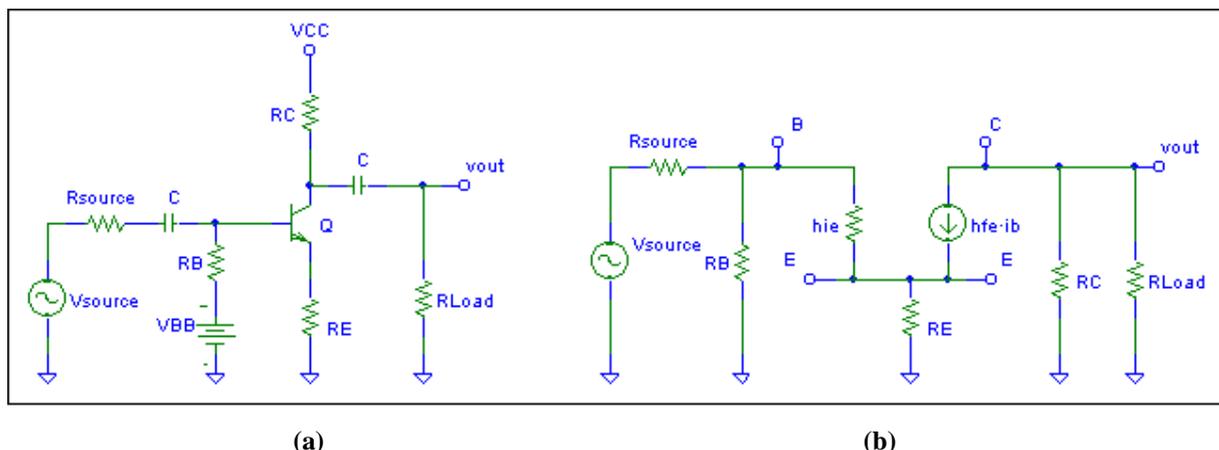


Figura 13.6.- (a) Circuito amplificador en emisor común con resistencia de emisor; (b) Circuito equivalente con parámetros h.

En este apartado se va a demostrar que la presencia de R_E tiene los siguientes efectos sobre el comportamiento del amplificador, además del efecto beneficioso en la estabilidad de la polarización comentado en el tema 11: deja la A_V prácticamente constante; aumenta la Z_{in} ; mantiene la Z_{out} y, con la condición de que $(1 + h_{fe})R_E \gg h_{ie}$ hace disminuir el valor de la ganancia de tensión pero estabilizándolo de manera que es más independiente del transistor utilizado. En efecto,

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}} \quad \text{con independencia de la carga y generador utilizado.}$$

$$v_{out} = -R_C h_{fe} i_b$$

$$v_{in} = [h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})] i_b$$

$$A_V = - \frac{R_C h_{fe}}{h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})} \stackrel{R_E (1 + h_{fe}) \gg h_{ie}}{\cong} - \frac{R_C h_{fe}}{R_E (1 + h_{fe})} \cong - \frac{R_C}{R_E}$$

Si tenemos en cuenta todo el circuito, incluida la carga y el generador

$$A_V = \frac{v_{out}}{v_s} = \frac{v_{out}}{v_{in}} \cdot \frac{v_{in}}{v_s}$$

$$v_{out} = -(R_C // R_L) h_{fe} i_b = R_L i_L$$

$$v_s = R_s i_s + v_{in}$$

$$i_s = \frac{v_{in}}{R_B} + \frac{v_{in}}{h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})}$$

$$A_{V_s} = - \frac{(R_C // R_L) h_{fe}}{h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_B // [h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})]}} \stackrel{R_E (1 + h_{fe}) \gg h_{ie}}{\cong} \frac{(R_C // R_L)}{R_E} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_B // R_E (1 + h_{fe})}}$$

$$A_I = \frac{i_L}{i_s} = - \frac{(R_C // R_L) h_{fe} R_B}{R_L [h_{ie} + R_E (1 + h_{fe}) + R_B]}$$

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_s} = R_B // [h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})]$$

$$Z_{out} = R_C$$

Si $R_E = 0$ las magnitudes anteriores se reducen a

$$A_V = - R_C \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$A_{V_s} = - (R_C // R_L) \cdot \frac{R_B // h_{ie}}{R_B // h_{ie} + R_s} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$$A_I = \frac{i_L}{i_s} = - h_{fe} \cdot \frac{(R_C // R_L)}{R_L} \cdot \frac{R_B}{h_{ie} + R_B}$$

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_S} = R_B // h_{ie}$$

$$Z_{out} = R_C$$

