

13.1. El amplificador

En los amplificadores, gracias a los transistores, se consigue elevar la intensidad de los sonidos y de las señales en general. El amplificador posee una entrada por donde se introduce la señal débil, y otra por donde se alimenta con C.C. La señal de salida se ve aumentada gracias a la aportación de esta alimentación, siguiendo las mismas variaciones que la de entrada (Figura 13.1).

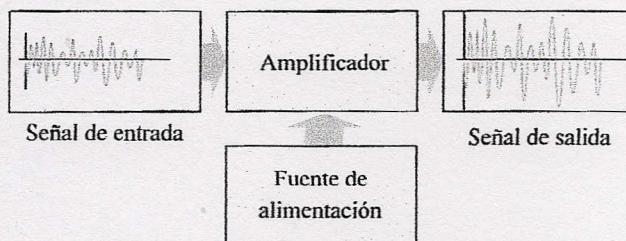


Figura 13.1. El amplificador eleva el nivel de la señal aplicada a su entrada.

En la Figura 13.2 se muestra la disposición básica de un amplificador de sonido. La señal de entrada, de bajo nivel (del orden de unos pocos milivoltios), la aportan dispositivos como: el micrófono (transforma las ondas sonoras en señales eléctricas que siguen las mismas variaciones que las primeras), el reproductor de discos (transforma las señales grabadas en los surcos del disco en señales eléctricas), el magnetófono (transforma las señales grabadas magnéticamente en una cinta en señales eléctricas), etc. El amplificador de audio toma estas señales eléctricas y, manteniendo intacta sus cualidades, las eleva de valor (del orden de unos cuantos voltios). Estas señales ya son lo suficientemente fuertes como para poder ser transformadas en sonidos audibles por parte del altavoz.

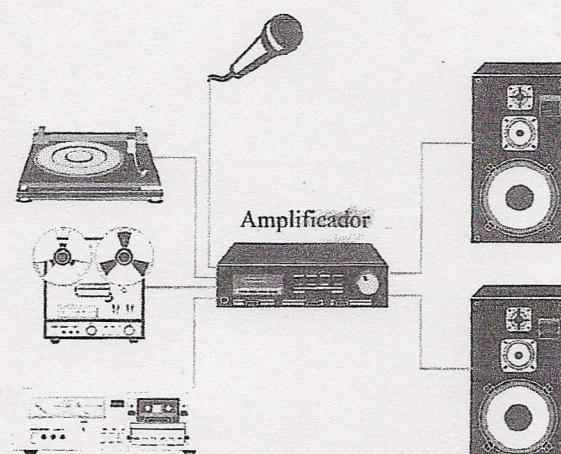


Figura 13.2. Amplificador de audio

Estudiaremos ahora algunas de las características de los amplificadores que nos ayudarán a entender la función propia de los mismos.

13.2. Ganancia de un amplificador

Cuando un amplificador realiza la función de elevar la señal que ha sido aplicada a su entrada, se dice que ha produ-

cido una determinada **ganancia**. Se puede decir que la ganancia de un amplificador es la relación que existe entre el valor de la señal obtenida a la salida y el de la entrada. Dependiendo de la magnitud eléctrica que estemos tratando, se pueden observar tres tipos de ganancias (Figura 13.3):

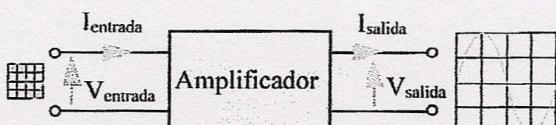


Figura 13.3. El amplificador produce ganancia en la señal de entrada.

- **Ganancia de tensión:** que se obtiene midiendo el valor de la tensión de entrada y el de salida y realizando su cociente.

$$A_v = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}}$$

- **Ganancia de corriente:** se obtiene midiendo el valor de la intensidad de salida y el de entrada, efectuando su cociente.

$$A_i = \frac{I_{\text{salida}}}{I_{\text{entrada}}}$$

- **Ganancia de potencia:** se obtiene al dividir la potencia obtenida en la salida entre la potencia entregada a la entrada. Se puede comprobar con facilidad que, al realizar esta operación, el resultado que se obtiene coincide con el producto de las ganancias de tensión y corriente.

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

Es corriente encontrarnos con la ganancia expresada en decibelios (dB). El decibelio es una unidad que se emplea para medir el nivel sonoro. Para calcular la ganancia de un amplificador en dB aplicamos las siguientes expresiones:

- Ganancia de tensión: $a_v = 20 \log A_v$
- Ganancia de corriente: $a_i = 20 \log A_i$
- Ganancia de potencia: $a_p = 10 \log A_p$

Ejemplo 13.1

La señal de entrada de un amplificador es de 10 mV y 1 mA. Determinar la ganancia de tensión, potencia y corriente de este amplificador, si la señal que se obtiene en la salida es de 1 V y 10 mA.

Solución:

$$A_v = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{1}{0,01} = 100$$

$$A_i = \frac{I_{\text{salida}}}{I_{\text{entrada}}} = \frac{10}{1} = 10$$

$$A_p = A_v \cdot A_i = 100 \cdot 10 = 1.000$$

En decibelios:

$$\begin{aligned}a_v &= 20 \log A_v = 20 \cdot \log 100 = 40 \text{ dB} \\a_i &= 20 \log A_i = 20 \cdot \log 10 = 20 \text{ dB} \\a_p &= 10 \log A_p = 10 \cdot \log 1000 = 69 \text{ dB}\end{aligned}$$

En conclusión, con este amplificador hemos conseguido una ganancia de 100 veces para la tensión y de 10 para la corriente, habiendo conseguido multiplicar por 1.000 la potencia de la señal de entrada.

13.3. Adaptación de impedancias en un amplificador

Los amplificadores poseen una característica fundamental, que es la impedancia que presentan a su entrada y a su salida.

- Impedancia de entrada:** es la impedancia que ofrece un amplificador a la entrada, y se calcula aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$Z_e = \frac{V_{\text{entrada}}}{I_{\text{entrada}}}$$

- Impedancia de salida:** es la impedancia que ofrece el amplificador a su salida:

$$Z_s = \frac{V_{\text{salida}}}{I_{\text{salida}}}$$

Para el amplificador del ejemplo anterior, la impedancia de entrada y salida sería:

$$Z_{\text{ent}} = \frac{V_{\text{entrada}}}{I_{\text{entrada}}} = \frac{0,01}{0,001} = 10 \Omega$$

$$Z_{\text{sal}} = \frac{V_{\text{salida}}}{I_{\text{salida}}} = \frac{1}{0,01} = 100 \Omega$$

La impedancia de entrada de un amplificador "Z_{ent}" limita el paso de corriente proporcionado por el generador de señales, de tal forma que se podría decir que es la carga que presenta a dicho generador de señales.

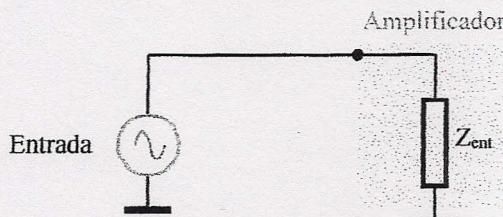


Figura 13.4. Impedancia de entrada del amplificador y del generador de señales.

Los generadores de señal también poseen una impedancia característica, dependiendo este valor del tipo de generador. Así, por ejemplo, para un receptor de radio, la antena es el generador de señales y su impedancia es de unos 50 Ω. En el caso de que el generador de señales fuera un micrófono, la impedancia podría ser algo mayor, del orden de los 10 KΩ.

Para que un sistema posea un rendimiento máximo, la impedancia del generador debe ser igual a la entrada del amplificador. Esto es lo que se conoce como "adaptación de impedancias".

Para entender esto mejor vamos a suponer los siguientes tres casos:

- a) En el primer caso, tal como se muestra en la Figura 13.5, tenemos un generador de señales de 10 V con una impedancia Z_G de 50 Ω. La impedancia de entrada del amplificador Z_{ent} es también de 50 Ω.

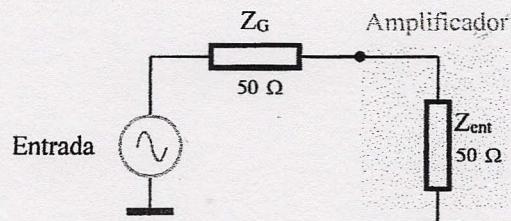


Figura 13.5. Impedancias iguales.

Las dos impedancias quedan en serie, por lo que la corriente que se establece en el circuito es igual a:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 50} = 0,1 \text{ A}$$

Suponiendo que las dos impedancias son resistivas, la potencia que aparece en el amplificador es:

$$P = Z_{\text{ent}} I^2 = 50 \cdot 0,1^2 = 0,5 \text{ W}$$

- b) En el caso de que la impedancia de entrada del amplificador hubiese sido de 10 Ω, la potencia que aparecería en el amplificador se calcularía de la misma forma:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 10} = 0,166 \text{ A}$$

$$P = Z_{\text{ent}} I^2 = 10 \cdot 0,166^2 = 0,27 \text{ W}$$

- c) Veamos qué ocurre cuando la impedancia de entrada del amplificador sea superior a la del generador. En este caso hemos supuesto que dicha impedancia es igual a 100 Ω.

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10}{50 + 100} = 0,066 \text{ A}$$

$$P = Z_{\text{ent}} I^2 = 100 \cdot 0,066^2 = 0,44 \text{ W}$$

En conclusión, la máxima potencia en el amplificador se consigue cuando las dos impedancias son iguales.

La impedancia de entrada de los amplificadores depende fundamentalmente del tipo de configuración que se emplee. Seguidamente proporcionamos una relación aproximativa de estos valores:

Colector común: gran impedancia de entrada (Z_{ent} ≈ 300 KΩ).

Base común: muy pequeña impedancia de entrada (Z_{ent} ≈ 50 Ω).

Emisor común: valor intermedio de impedancia de entrada (Z_{ent} ≈ 50 KΩ).

13.4. Clasificación de los amplificadores

No todos los amplificadores son iguales; existen diferencias entre unos y otros, dependiendo de la magnitud de la señal que se va a amplificar, configuración, clase, acoplamiento y aplicaciones. En Tabla 13.1 se hace una clasificación de los mismos:

CLASIFICACION DE LOS AMPLIFICADORES	
Dependiendo de la señal	De pequeña señal De señales fuertes o de potencia
Por su configuración	Emisor común Colector común Base común
Por su clase	Clase A Clase B Clase C Clase AB
Por la frecuencia de señal	De corriente continua De audiofrecuencia (AF) De vídeo frecuencia (VF) De radiofrecuencia (RF) De VHF y UHF

Tabla 3.1.

- **Dependiendo de la señal:** existen muchas aplicaciones donde el uso de una sola etapa amplificadora no es suficiente para elevar la señal de entrada al nivel deseado. Por esta razón, se emplean varias etapas amplificadoras acopladas adecuadamente, con el fin de imprimir en cada una de ellas el nivel de amplificación adecuado y, así, conseguir una señal de salida sin distorsión y con el máximo rendimiento por parte del conjunto del amplificador.

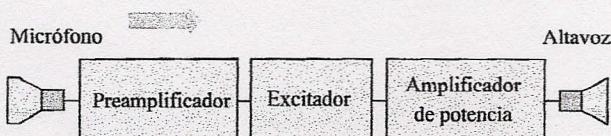


Figura 13.6. Diagrama de bloques de las diferentes etapas amplificadoras de un amplificador de audio.

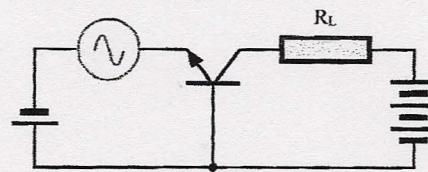
Así, por ejemplo, la señal de audio proporcionada por un micrófono o la señal recogida en la antena de un receptor de radio posee un nivel que en la mayoría de las ocasiones no alcanza unos pocos milivoltios o incluso microvoltios. En estos casos se hace necesario por lo menos de dos, tres o más etapas amplificadoras. Éste es el caso del ejemplo mostrado en la Figura 13.6, donde se aprecia la estructura de un amplificador de audio en un diagrama de bloques. Existe un amplificador previo, o preamplificador de pequeña señal, que toma la débil señal proveniente del micrófono y la eleva hasta un nivel adecuado. Esta señal

se vuelve a amplificar en la etapa excitadora hasta obtener el nivel suficiente para excitar la etapa correspondiente al amplificador de potencia. Esta última etapa consigue elevar el nivel de la señal suficientemente como para excitar el altavoz de salida.

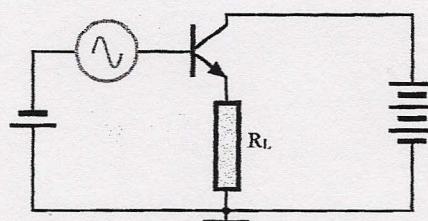
Los amplificadores de pequeña señal se utilizan en etapas previas y poseen una ganancia muy grande de tensión. Este tipo de amplificadores posee una respuesta lineal, es decir, debe ser fiel y no distorsionar las señales.

Un amplificador de potencia maneja señales más fuertes y se emplea en las etapas finales. En este amplificador la zona de trabajo es del todo lineal.

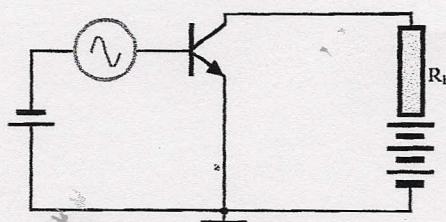
- **Por su configuración** (ver Figura 13.7).



Base común



Colector común



Emisor común

Figura 13.7. Clasificación de los amplificadores por su configuración.

- **Por su clase:** esta clasificación es debida a que no todos los amplificadores presentan todo el conjunto del ciclo de señal de entrada en la salida.

Clase A: en la Figura 13.8 se muestra el aspecto de las señales de entrada y salida de un amplificador de clase A.

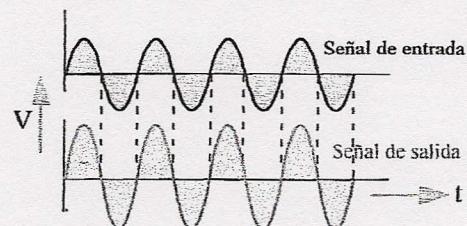


Figura 13.8. Respuesta de un amplificador de clase A.

La señal que aparece en la salida no está distorsionada con respecto a la de entrada.

Clase B: la señal que aparece en la salida está recortada, de tal forma que únicamente parecen los semicírculos positivos, tal como se puede apreciar en los oscilogramas de la Figura 13.9.

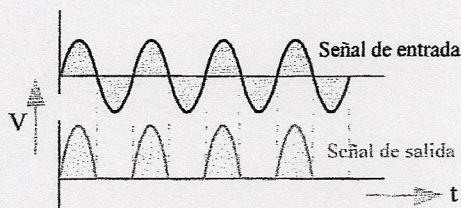


Figura 13.9. Respuesta de un amplificador de clase B.

Clase C: en este caso, la corriente que aparece como señal de salida fluye menos de un semicírculo, tal como se aprecia en la Figura 13.10.

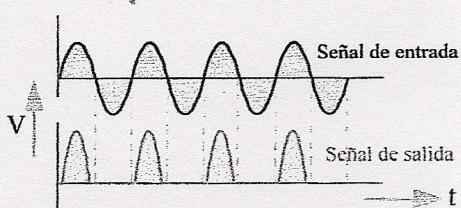


Figura 13.10. Respuesta de un amplificador de clase C.

Clase AB: La señal que aparece en la salida es una combinación de la clase A y B, es decir, aparece una pequeña distorsión en los picos de la señal de salida (ver Figura 13.11).

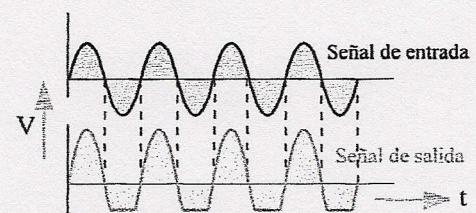


Figura 13.11. Respuesta de un amplificador de clase AB.

● **Por la frecuencia de la señal:** como las señales que se quieren amplificar son alternativas, es necesario diseñar los circuitos amplificadores teniendo en cuenta el valor de la frecuencia de las mismas.

Los amplificadores de corriente continua trabajan con señales no alternativas y, por lo tanto, poseen una frecuencia cero.

Los de audiofrecuencia o de baja frecuencia trabajan con frecuencias audibles en un margen de 20 a 20 KHz.

Los amplificadores de videofrecuencia se utilizan para señales en un margen de frecuencias de entre 20 Hz y 15 MHz.

Los amplificadores radiofrecuencia o de alta frecuencia, se utilizan en sistemas de transmisión de señales de radio y manejan frecuencias del orden de 200 KHz a 300 MHz.

Los de VHF y UHF trabajan en frecuencias de cientos o miles de MHz y se utilizan para la transmisión de señales de audio y televisión.

14.1. Amplificador de emisor común

Este tipo de amplificador es muy empleado en etapas previas en los amplificadores de audio, ya que proporciona una respuesta lineal, es decir, pertenece a la clase A.

En la Figura 14.1 se muestra un amplificador de emisor común.

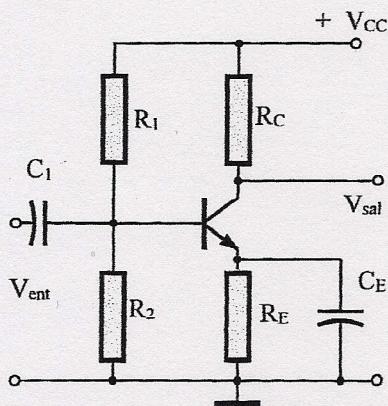


Figura 14.1. Amplificador de emisor común.

Este circuito es similar al que ya estudiamos en los circuitos de polarización de la Unidad de Contenido 12, con la única diferencia de que aquí aparece un condensador C_E conectado en paralelo con la resistencia de emisor R_E . Al mismo se le conoce por el nombre de condensador de paso.

La señal de entrada se introduce al amplificador a través del condensador de acoplamiento C_1 y la señal de salida aparece amplificada entre los terminales del colector y masa.

La tensión V_{CC} de la fuente de alimentación y las resistencias R_1 , R_2 y R_E consiguen fijar y estabilizar el punto de trabajo del transistor, no interviniendo en la amplificación de la señal inyectada a la entrada.

El transistor debe estar polarizado adecuadamente con un punto Q de funcionamiento próximo a la mitad de la recta de carga. De esta forma, conseguimos que el amplificador opere de una forma lineal o de alta fidelidad (sin distorsión en la salida).

Para que el transistor trabaje dentro de la zona lineal, las fluctuaciones de la señal deben de abarcar una pequeña parte de la recta de carga. En el caso de que esta señal fuese demasiado grande, el transistor entraría en las zonas de corte y saturación y la señal de salida aparecería distorsionada. Así, por ejemplo, si un amplificador de audio distorsiona la señal, en el altavoz aparece un sonido no deseado, que ya no se corresponde con el sonido original.

La señal que aparece en la salida de este amplificador queda desfasada 180° respecto a la señal de entrada; es decir, cuando la señal de entrada crece en sentido positivo, la señal de salida lo hace en sentido negativo. A este fenómeno se le conoce por *inversión de fase*.

A continuación vamos a ocuparnos de la misión de los condensadores de acoplamiento y de paso, así como a determinar las ganancias de tensión, resistencias de entrada y salida mediante circuitos equivalentes.

14.1.1. Condensador de acoplamiento

Al estudiar las polarizaciones del transistor ya indicamos como este condensador permite el paso de la señal de C.A. proveniente del generador de señales y bloquea la componente continua que pudiese contener la misma.

Así, por ejemplo, si realizamos un circuito equivalente, como el que se muestra en la Figura 14.2, donde únicamente aparezca la impedancia del generador de señales, el condensador de acoplamiento y la impedancia de entrada del amplificador, podemos analizar más fácilmente los fenómenos que se producen.

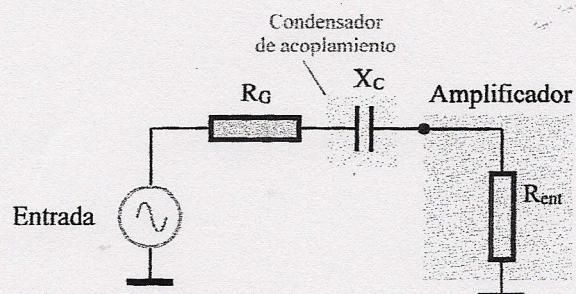


Figura 14.2. Circuito equivalente con condensador de acoplamiento.

Se ha supuesto que tanto la impedancia del generador como la de entrada del amplificador son resistencias, de ahí que aparezcan con las notaciones R_G y R_{ent} .

Como el circuito está en serie, la resistencia total será: $R = R_G + R_{ent}$. Para calcular la corriente que se establece en este circuito, aplicamos la ley de Ohm para C.A.:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}$$

Como el condensador no debe bloquear el paso de la corriente eléctrica, la reactancia capacitiva X_c deberá ser bastante menor que la resistencia total del circuito R.

Para un buen diseño, X_c debe ser menor o igual que el 10% de R para la frecuencia más baja de trabajo del amplificador, es decir $X_c \leq 0,1 R$. Cumpliendo esta norma se consigue que la corriente disminuya sólo un 1%.

Ejemplo 14.1

Determinar la capacidad del condensador de acoplamiento si el amplificador que se muestra en la figura 14.3 trabaja dentro de las frecuencias de audio (20 Hz a 20 KHz).

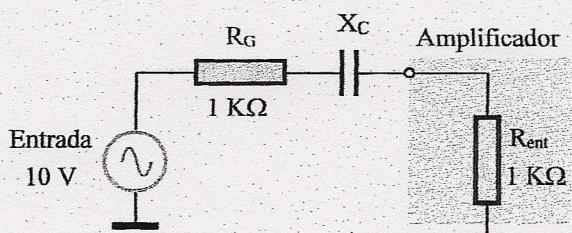


Figura 14.3.

Solución:

La resistencia en serie del circuito es:

$$R = 1.000 + 1.000 = 2.000 \Omega$$

y para la frecuencia más baja la reactancia del condensador será:

$$X_C \leq 0,1 R, X_C = 0,1 \cdot 2.000 = 200 \Omega$$

Determinaremos ahora la capacidad del condensador para una frecuencia de 20 Hz.

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 200} = 3,98 \cdot 10^{-5} F = 39,8 \mu F$$

Consultando en un catálogo comercial encontraremos que el condensador más aproximado por exceso es el de 47 μF .

Determina tu mismo el valor de la corriente por el circuito con el condensador de 47 μF y sin él. ¿Se cumple la relación mínima del 1% indicada en la exposición teórica?

14.1.2. Condensador de paso

El condensador de paso C_E se conecta en paralelo con la resistencia de emisor R_E , de tal forma que ésta quede prácticamente cortocircuitada para la señal de C.A. Sin embargo, la componente continua fluye por R_E como si no hubiese condensador.

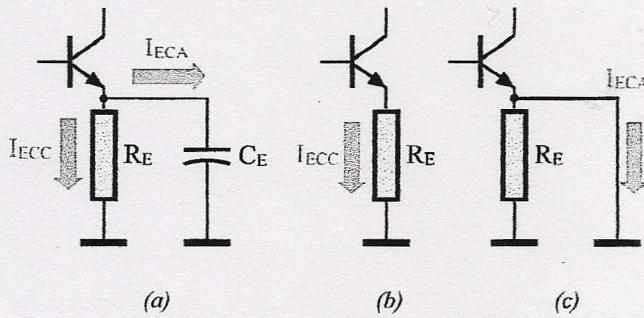


Figura 14.4. a) Condensador de paso. b) circuito equivalente de C.C. c) circuito equivalente de C.A.

En la Figura 14.4a se muestra cómo el condensador hace que la componente alterna de la corriente de emisor se derive directamente a masa, mientras que la continua atraviesa a la resistencia R_E .

En la Figura 14.4b se ha hecho un circuito equivalente para la C.C. El condensador actúa para la C.C. como un interruptor abierto.

En el circuito equivalente para la C.A. de la Figura 14.4 c, el condensador cortocircuita R_E y pone el emisor directamente a masa. Por esta razón, cuando a un amplificador de emisor común se le conecta un condensador de paso entre el emisor y masa, se le conoce como *amplificador con emisor a masa*. Como ya veremos más adelante, este condensador mejora notablemente la ganancia del amplificador.

14.1.3. Circuitos equivalentes de C.A. y C.C.

Dado que los elementos que componen un circuito amplificador no se comportan de la misma forma para corriente alterna que para corriente continua, es de gran ayuda encontrar circuitos equivalentes para cada una de estas componentes. De esta manera se pueden determinar con más facilidad las características propias del mismo.

Circuito equivalente de C.C.

Se trata de encontrar el circuito equivalente de la Figura 14.5

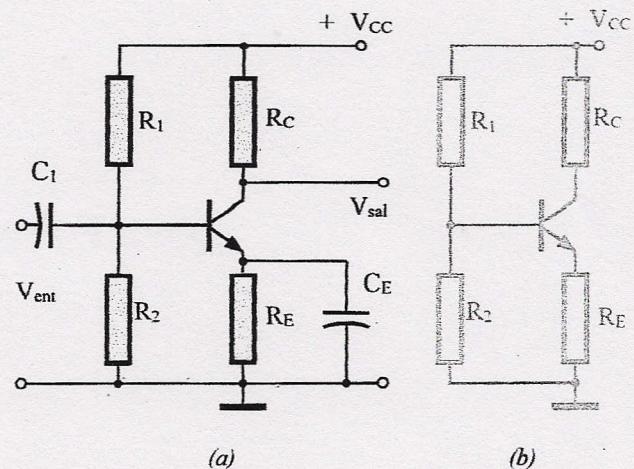


Figura 14.5. a) Amplificador de emisor común. b) Circuito equivalente de C.C.

Para ello habrá que seguir los siguientes pasos:

- Como estamos en el equivalente de C.C., hay que eliminar las fuentes de C.A. Para ello, basta con cortocircuitar las mismas.
- Como los condensadores en C.C. se comportan como interruptores abiertos, hay que abrir todas las partes del circuito que contengan condensadores.

El circuito equivalente obtenido es el que se muestra en la Figura 14.5 b.

Circuito equivalente de C.A.

En este caso, los pasos a seguir para encontrar el equivalente de C.A. son los siguientes:

- Por la misma razón expuesta anteriormente, ahora hay que eliminar las fuentes de C.C. cortocircuitándolas.
- Como estamos en C.A., podemos considerar, de una forma aproximada, que los condensadores son como interruptores cerrados; por lo tanto, se pueden considerar como cortocircuitos.

El resultado es el que se muestra en la Figura 14.6.

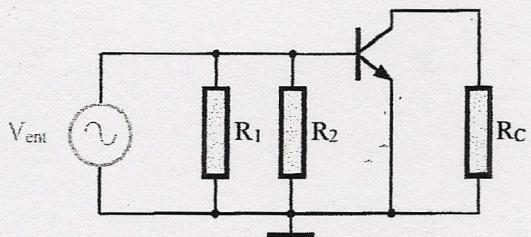


Figura 14.6. Circuito equivalente de C.A.

Resistencia del diodo emisor a la C.A.

En la Figura 14.7 c se muestra el circuito equivalente de C.A. de un transistor. Observa cómo el diodo emisor aparece como una resistencia r_e , mientras que la unión del colector se muestra como una fuente de corriente. Esta aproximación es posible siempre que la señal sea pequeña y se mueva en un entorno muy cercano al punto Q de operación.

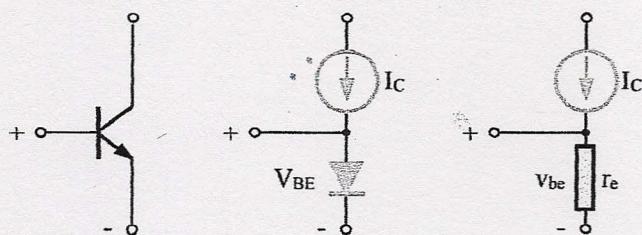


Figura 14.7. a) Transistor. b) Diodo de emisor. c) Circuito equivalente de C.A.

Aplicando la ley de Ohm entre los terminales de la resistencia de emisor, para valores de C.A. se obtiene que:

$$r_e = \frac{v_{be}}{i_e}$$

r_e = resistencia en C.A. del emisor

v_{be} = tensión aplicada entre la base y el emisor

i_e = corriente de C.A. por el emisor

Existe una fórmula matemática aproximada con la que se puede calcular el valor de esta resistencia teniendo en cuenta sólo la componente de corriente continua I_E .

$$r_e = \frac{25\text{mV}}{I_E}$$

Esta fórmula es de gran utilidad, ya que conociendo el punto de trabajo Q del transistor, podemos determinar con facilidad la resistencia del diodo emisor.

Nota: Para indicar las magnitudes en corriente continua se han empleado letras mayúsculas, y letras minúsculas para las magnitudes de corriente alterna.

Ejemplo 14.2

Determinar la resistencia del diodo emisor si el punto de trabajo del transistor se encuentra para $I_E = 2 \text{ mA}$.

Solución:

Aplicando la expresión aproximada tenemos que:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 12,5 \Omega$$

Este valor de r_e es aproximado y puede aumentar con la temperatura de la unión. A pesar de todo, nos va a ser de mucho provecho para la localización de averías.

Ganancia de corriente en C.A. (β_{CA})

Cuando se estudió el transistor se definía la ganancia de corriente para C.C. β_{cc} como la relación:

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

Sin embargo, para C.A., hay que tener en cuenta la componente alterna de la corriente, quedando el valor de la ganancia de corriente igual a:

$$\beta_{CA} = \frac{i_c}{i_b}$$

Este valor aparece también en las hojas de características como h_{fe} , o simplemente como β .

Ganancia de tensión en C.A.

La ganancia de tensión para las señales de C.A. es la relación de tensiones de entrada y salida respectivas.

$$A_v = \frac{V_{sal}}{V_{ent}}$$

Es posible encontrar una relación aproximada entre la ganancia de tensión y las resistencias que componen el circuito amplificador de emisor común, la cual nos va a ser de gran utilidad para la localización de averías.

Para encontrar esta relación nos valdremos del circuito equivalente de C.A., que se muestra en la Figura 14.8.

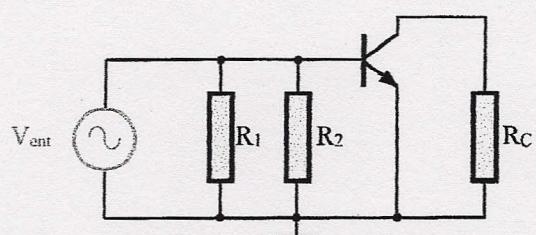


Figura 14.8. Circuito equivalente de C.A.

Todavía se puede encontrar un circuito más sencillo donde sustituimos el transisfor por la resistencia del diodo emisor y la fuente de corriente del colector, tal como se muestra en la Figura 14.9.

Obsérvese que aquí no aparecen las resistencias R_1 y R_2 . Esto es debido a que la tensión de entrada v_{ent} está directamente aplicada a los bornes de r_e , por lo que no hace falta tener en cuenta dichas resistencias para los cálculos aproximados que pretendemos realizar.

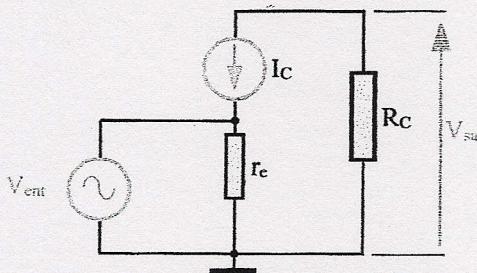


Figura 14.9. Circuito equivalente de C.A. simplificado de un amplificador E.C.

La intensidad de la corriente alterna, que aparece por el diodo emisor, se determina aplicando la ley de Ohm entre los extremos de r_e :

$$i_e = \frac{v_{\text{ent}}}{r_e}, \text{ despejando } v_{\text{ent}} = i_e r_e \quad (\text{I})$$

Por otro lado tenemos que, aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia R_C , la tensión que aparece en la salida es:

$$v_{\text{sal}} = R_C i_c \quad (\text{II})$$

En un transistor se puede afirmar, sin equivocarse mucho, que la corriente de emisor es igual a la de colector:

$$i_e \approx i_c \quad (\text{III})$$

Si sustituimos este valor en la ecuación (II) tendremos que:

$$v_{\text{sal}} = R_C i_e \quad (\text{IV})$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (I) y (IV), la ganancia de tensión será:

$$A_v = \frac{v_{\text{sal}}}{v_{\text{ent}}} \equiv \frac{R_C i_e}{r_e i_e}, \text{ simplificando}$$

$$A_v \equiv \frac{R_C}{r_e}$$

Ejemplo 14.3

Determinar la ganancia de tensión aproximada en tensión de un amplificador de emisor común del que se conocen los siguientes datos: $R_C = 1 \text{ K}\Omega$, $r_e = 12,5 \Omega$.

Solución:

$$A_v \equiv \frac{1.000}{12,5} = 80$$

Ejemplo 14.4

De un amplificador de emisor común se sabe que $R_C = 5,1 \text{ K}\Omega$ y que el punto de operación Q está fijado para $I_E = 1 \text{ mA}$. Determinar la tensión que aparece en la salida si se proporciona una tensión pico de 100 mV en la entrada.

Solución:

Primero se calcula la resistencia del diodo emisor:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

La ganancia será entonces aproximadamente igual a:

$$A_v \equiv \frac{R_C}{r_e} \equiv \frac{5,1 \text{ K}\Omega}{25 \Omega} \approx 204$$

$$\text{Como } A_v = \frac{v_{\text{sal}}}{v_{\text{ent}}} \quad v_{\text{sal}} = \dots = \dots = 20,4 \text{ V}$$

Ejemplo 14.5

En la Figura 14.10 se muestra el circuito de un amplificador de emisor común.

Determinar:

- V_B , V_C y V_E en régimen estático.
- Ganancia de tensión aproximada.
- Tensión en la salida si se aplica en la entrada una tensión pico de 10 mV.

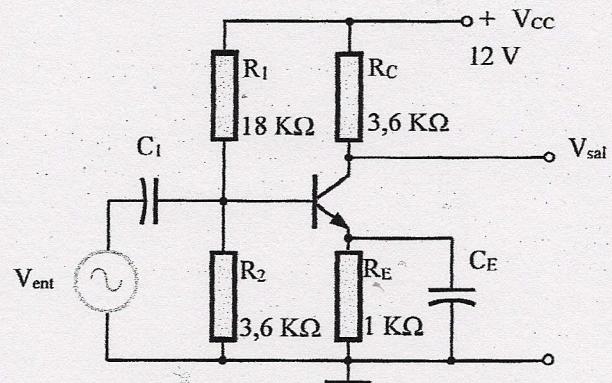


Figura 14.10.

Solución:

La tensión V_B que aparece en la base del transistor es la misma que aparece en la resistencia R_2 . De tal forma que:

$$V_B = R_2 I$$

La corriente que se establece por R_2 es la misma que la del circuito serie formado por el divisor de tensión R_1 y R_2 :

$$I = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} = \frac{12}{18.000 + 3.600} = 0,00056 \text{ A}$$

$$V_B = 3.600 \cdot 0,00056 \text{ mA} = 2 \text{ V}$$

Teniendo en cuenta que la tensión V_{BE} es de 0,7 V para transistores de silicio, la tensión V_E del emisor será:

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0,7 = 1,3 \text{ V}$$

Conociendo el valor de esta tensión, se puede calcular la corriente de emisor I_E por la resistencia R_E .

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1,3}{1.000} = 0,0013 \text{ A}$$

La tensión V_C que aparece en el colector se puede calcular resolviendo la malla según la 2ª ley de Kirchhoff:

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

Teniendo en cuenta que: $I_C \approx I_E \approx 0,0013 \text{ A}$

$$V_C = 12 - 0,0013 \cdot 3.600 = 7,32 \text{ V}$$

Ahora resuelve tú mismo las cuestiones b) y c).

$$(\text{Rdo.: } A_v = 187,2; V_{sal} = 1,87 \text{ V})$$

Nota: Observa cómo el punto de trabajo determinado por la tensión V_{CE} se encuentra en un punto intermedio de la recta de carga:

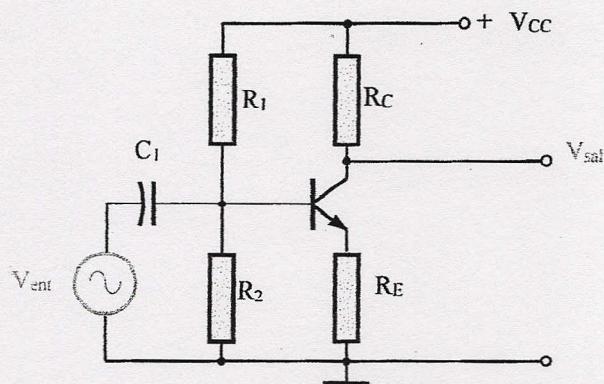
$$V_{CE} = V_C - V_E = 7,32 - 1,3 = 6,02 \text{ V}$$

En el caso de que R_2 disminuyese hasta un valor de $2,2 \text{ K}\Omega$ ¿cómo quedarían los valores calculados anteriormente?

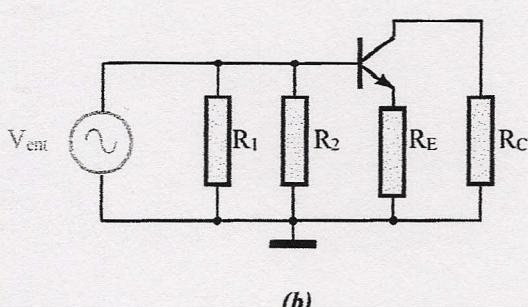
$$(\text{Rdo.: } V_E = 0,6 \text{ V}; V_B = 1,3 \text{ V}; V_C = 9,81 \text{ V}; A_v = 41,2; V_{sal} = 412 \text{ mV})$$

Ganancia de tensión sin condensador de paso

La función primordial que posee el condensador de paso C_E es la de aumentar la ganancia. Veamos cuál sería la ganancia de paso sin este condensador (Figura 14.11 a).



(a)



(b)

Figura 14.11. a) Amplificador de emisor común sin condensador de paso.
b) Circuito equivalente de C.A.

El circuito equivalente para C.A. en este caso será ahora el que se muestra en la Figura 14.11 b. La resistencia de emisor R_E queda en serie con la del diodo emisor r_e , quedando ahora el conjunto de la resistencia de emisor igual a la suma de $R_E + r_e$. La ganancia será en este caso:

$$A_v' \approx \frac{R_C}{R_E + r_e}$$

Ejemplo 14.6

Determinar la ganancia de un amplificador de emisor común con y sin condensador de paso del emisor, siendo $R_C = 1 \text{ K}\Omega$, $R_E = 100 \Omega$ y $r_e = 25 \Omega$.

Solución:

La ganancia con condensador es:

$$A_v \approx \frac{R_C}{r_e} \approx \frac{1.000}{25} \approx 40$$

Sin embargo, la ganancia sin condensador resulta:

$$A_v' \approx \frac{R_C}{r_e + R_E} \approx \frac{1.000}{25 + 100} \approx 8$$

Observa cómo se ha reducido cinco veces la ganancia al retirar el condensador.

El uso de condensadores de paso resulta ventajoso para aquellos casos en que la frecuencia no es muy baja. Hay que tener en cuenta que cuanto más baja es la frecuencia mayor es la reactancia del condensador, aspecto que no interesa, ya que se recomienda que para éste sea efectivo que $X_C \leq 0,1 R_E$.

Si en el Ejemplo 14.6 la frecuencia hubiese sido de sólo 10 Hz, X_C debería haber sido como mínimo:

$$X_C = 0,1 R_E = 0,1 \cdot 100 = 10 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10} = 1.591 \mu\text{F}$$

Esta capacidad corresponde a un condensador excesivamente voluminoso, a pesar de que su tensión de trabajo sea baja.

¿Cuál sería la capacidad de este condensador si se trabaja con frecuencias de más de 100 Hz?

14.1.4. Impedancia de entrada y salida

Resulta muy interesante conocer la impedancia de entrada y salida de un amplificador, sobre todo en los casos en que se desea acoplar diferentes etapas en serie.

En un amplificador de emisor común este valor viene a ser del orden de $50 \text{ K}\Omega$.

Por otro lado, la impedancia de salida de C.A. es del orden de $1 \text{ K}\Omega$, dependiendo fundamentalmente de la resistencia de colector R_C .

Por último, haremos un resumen de los aspectos de más interés del amplificador de emisor común:

- a) En este amplificador el emisor del transistor es común a la señal de entrada y a la de salida.
- b) La señal alterna de entrada hace que varíen la corriente de base y colector, y la tensión de salida.
- c) La tensión de salida aparece amplificada según la ganancia ($V_{\text{sal}} = -A_v V_{\text{ent}}$) y con una inversión de fase de 180° .
- d) El punto estático de funcionamiento del amplificador debe estar en el centro de la recta de carga y la variación pico a pico de la corriente de colector deberá ser menor del 10% del valor estático. Así, se elimina la posibilidad de distorsión.
- e) La ganancia de tensión depende de los valores de la resistencia de colector y de emisor.
- f) El condensador de paso del emisor aumenta la ganancia de tensión.

14.2. Amplificador de colector común (C.C.)

Este circuito amplificador, del cual se muestra el esquema en la Figura 14.12, también se conoce por el nombre de *seguidor de emisor*.

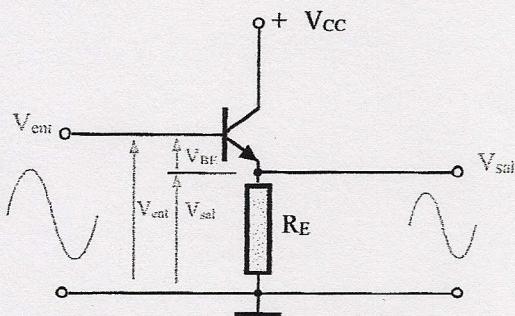


Figura 14.12. Amplificador de colector común.

Estos amplificadores poseen una impedancia de entrada muy elevada, del orden de cientos de miles de ohmios. Esta característica hace que el amplificador de colector común sea ideal en los casos en que el generador de señales posea una impedancia característica muy elevada. De esta forma, se consigue que la señal de C.A. no se pierda en la alta impedancia de dicho generador. Despues de este amplificador, puede seguir una etapa amplificadora con emisor común, que posee una mayor ganancia de tensión.

Veamos cómo opera este amplificador.

Según se puede apreciar en la Figura 14.12, la tensión de entrada se aplica directamente a la base del transistor y la tensión de salida aparece en el emisor. Esta tensión es siempre algo inferior a la de entrada, tal como se deduce de la siguiente relación:

$$V_{\text{sal}} = V_{\text{ent}} - V_{\text{BE}}$$

Así, por ejemplo, si $V_{\text{ent}} = 10 \text{ V}$, como V_{BE} en un transistor de silicio es $0,7 \text{ V}$:

$$V_{\text{sal}} = 10 - 0,7 = 9,3 \text{ V}$$

De aquí se deduce que la ganancia de tensión en este amplificador siempre será menor que la unidad.

La tensión de salida sigue las mismas variaciones que la de entrada, por lo que se puede afirmar que no existe desfase entre las mismas.

14.2.1. Ganancia de tensión

Para determinar la relación que existe entre la ganancia de tensión de este amplificador con los valores de resistencia, se recurre al circuito equivalente de C.A. mostrado en la Figura 14.13 b.

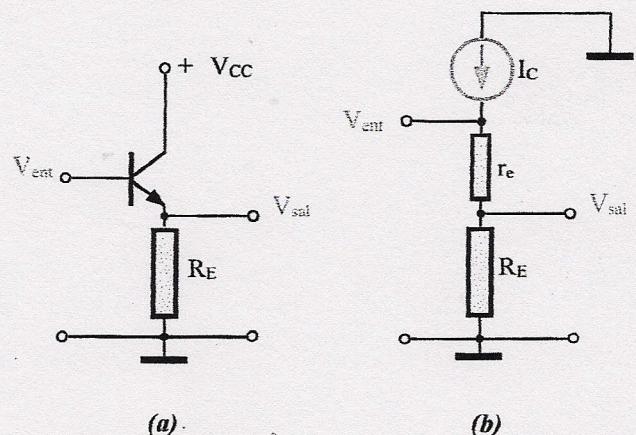


Figura 14.13. a) Amplificador de colector común.
b) Circuito equivalente de C.A.

Según el circuito equivalente de la Figura 14.13 b, tenemos que:

$$v_{\text{sal}} = i_e R_E$$

$$v_{\text{ent}} = i_e (R_E + r_e)$$

La ganancia será entonces:

$$A_v = \frac{v_{\text{sal}}}{v_{\text{ent}}} = \frac{i_e R_E}{i_e (R_E + r_e)}, \text{ simplificando:}$$

$$A_v = \frac{R_E}{R_E + r_e}$$

Ejemplo 14.7

Determinar la ganancia de un amplificador de colector común si $R_E = 3,6 \text{ k}\Omega$ y $r_e = 25 \Omega$.

Solución:

$$A_v = \frac{3.600}{3.600 + 25} = 0,993$$

Lo que indica que la ganancia es muy próxima a la unidad.

Este amplificador apenas provoca distorsión en la salida. Por lo que, si se aplica una tensión senoidal a la entrada, se puede comprobar cómo aparece en la salida una tensión de tipo senoidal sin distorsión.

Ejemplo 14.8

En la Figura 14.14 aparece el circuito de un amplificador de colector común con polarización mediante un divisor de tensión. Determinar V_B , V_C , V_E , así como la tensión que aparece en la salida de este amplificador, cuando se le aplique a su entrada una señal de 5 V.

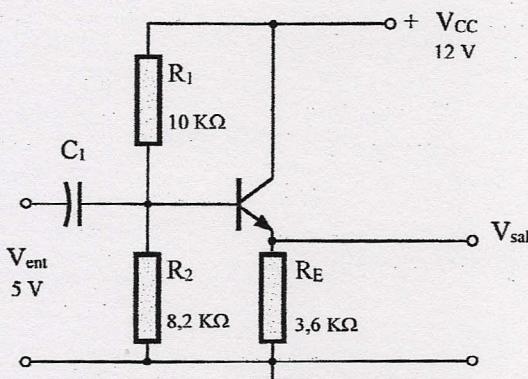


Figura 14.14.

Solución:

La tensión V_B es la que aparece entre los terminales de la resistencia R_2 del divisor de tensión. Aplicando la ley de Ohm tendremos que:

$$V_B = R_2 \cdot I$$

Por otro lado tenemos que:

$$I = \frac{V_{cc}}{R_1 + R_2} = \frac{12}{10.000 + 8.200} = 0,00066 \text{ A}$$

$$V_B = 8.200 \cdot 0,00066 = 5,4 \text{ V}$$

Esta tensión fija la tensión de emisor:

$$V_E = V_B - V_{BE} = 5,4 - 0,7 = 4,7 \text{ V}$$

La tensión de colector V_C coincide con la de la fuente V_{cc} , ya que no existe ninguna resistencia entre el colector y dicha fuente.

$$V_C = 12 \text{ V}$$

La corriente de C.C. de emisor se calcula aplicando la ley de Ohm entre los extremos de R_E :

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{4,7}{3.600} = 0,0013 \text{ A} = 1,3 \text{ mA}$$

En este caso la resistencia del diodo emisor queda fijada en:

$$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{1,3 \text{ mA}} = 19,23 \Omega$$

La ganancia será entonces:

$$A_v = \frac{R_E}{R_E + r_e} = \frac{3.600}{3.600 + 19,23} = 0,995$$

Ya podemos calcular la tensión de salida:

$$V_{sal} = A_v \cdot V_{ent} = 0,995 \cdot 5 = 4,975 \text{ V}$$

Como se puede apreciar, las tensiones de entrada y salida son prácticamente iguales.

14.2.2. Utilidad del amplificador de colector común

La impedancia de entrada de este amplificador es extremadamente elevada, mientras que la impedancia de salida del mismo es muy baja, del orden de unas decenas de ohmios. Por esta razón, este amplificador posee un gran campo de aplicación como adaptador de impedancias; a veces también se le conoce por el nombre de *amplificador de aislamiento*.

Este amplificador es ideal en aquellas aplicaciones en las que el generador de señales posee una impedancia característica muy alta, ya que su gran impedancia de entrada representa una carga muy leve para éste. En estas circunstancias, la corriente que debe ceder el generador es muy pequeña, con lo que éste se ve aislado de la carga que supondría el resto del circuito.

Por último indicar que, al poseer este amplificador una ganancia cercana a la unidad, habrá que utilizarlo en combinación con amplificadores de emisor común para conseguir los efectos de amplificación deseados, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 14.15.

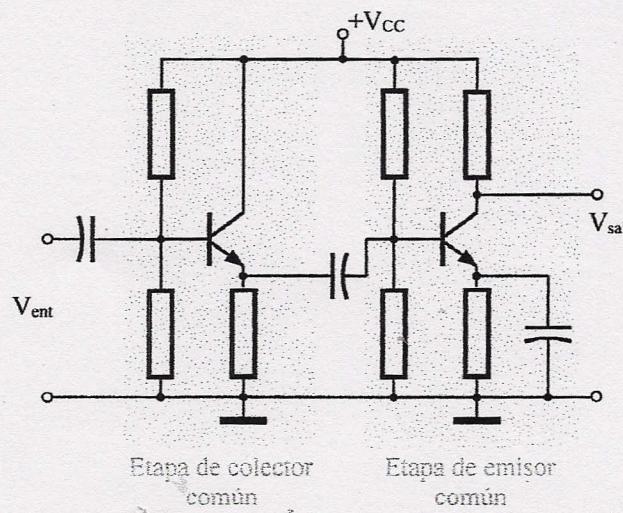


Figura 14.15. Combinación de un amplificador de colector común de gran impedancia de entrada con uno de emisor común de gran ganancia.

14.3. Amplificador de base común (BC)

En este amplificador la base es común a las señales de entrada y salida, tal como se muestra en el circuito de la Figura 14.16. La señal de entrada se aplica al emisor y la señal de salida se obtiene en el colector. Las resistencias R_1 y R_2 forman un divisor de tensión que polariza a la base. El condensador C_3 conecta la señal de C.A. de la base a masa.

La impedancia de entrada de un amplificador de base común es muy baja, del orden de decenas de ohmios (aproximadamente se cumple que $Z_{ent} = r_e$). Esto le hace muy útil para etapas de amplificación en las que existen generadores de baja impedancia.

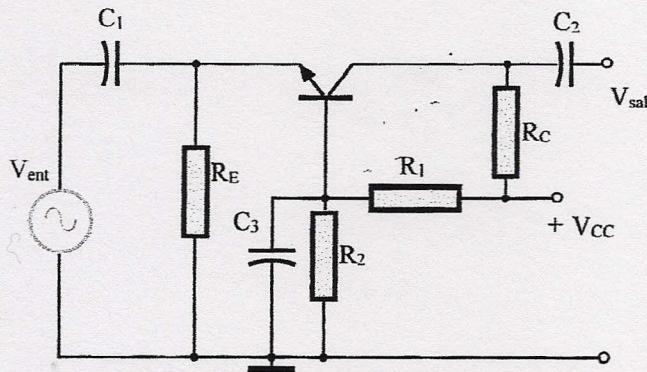


Figura 14.16. Amplificador de emisor común.

Sin embargo, la impedancia de salida es muy elevada.

La ganancia de tensión de este amplificador es bastante buena, muy parecida a la del amplificador de emisor común; en este amplificador también se cumple que:

$$A_v \approx \frac{R_C}{r_e}$$

También responde excelentemente a las muy altas frecuencias, por lo que constituye un buen amplificador de radiofrecuencia (RF). En los sistemas de recepción de RF el generador de señales es la propia antena del receptor. Ésta proporciona una señal muy débil y su impedancia característica es baja, de unos $50\ \Omega$, lo que hace que la impedancia de entrada de un amplificador de BC se adapte perfectamente a la misma. En la Figura 14.17 se muestra el circuito de un amplificador de radiofrecuencia con base común.

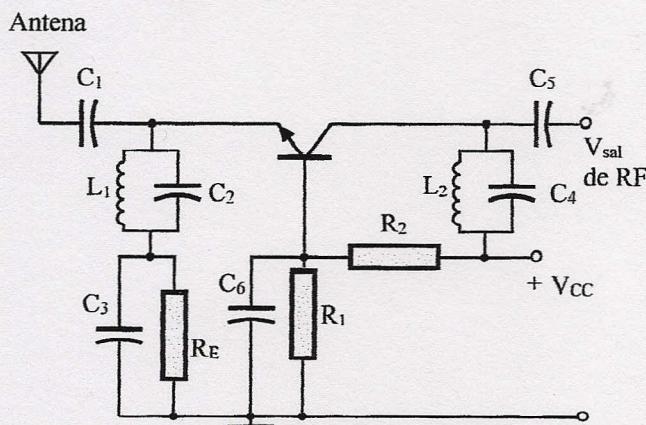


Figura 14.17. Amplificador de radiofrecuencia en configuración base común.

14.4. Cuadro resumen de las características de los amplificadores

En la Tabla 14.1 se expone un cuadro comparativo de las diferentes características de los amplificadores en sus distintas configuraciones básicas.

	Emisor común	Colector común	Base común
A_v	Sí	No	Sí
A_i	Sí	Sí	No
Z_{ent}	Intermedia ($\approx 1\ k\Omega$)	Muy grande ($\approx 300\ K\Omega$)	Pequeña ($\approx 50\ \Omega$)
Z_{sal}	Intermedia ($\approx 50\ K\Omega$)	Pequeña ($\approx 300\ \Omega$)	Muy grande ($\approx 1\ M\Omega$)
Inversión de fase	Sí	No	No
Aplicaciones	Universal	Amplificador de aislamiento	Amplificador de RF

Tabla 14.1. Características de los amplificadores.

14.5. Acoplamiento de amplificadores

Normalmente la ganancia producida por una sola etapa amplificadora es insuficiente para producir la amplificación deseada. En estos casos se acoplan dos, tres o más etapas en cascada, tal como se indica en el diagrama de bloque de la Figura 14.18.

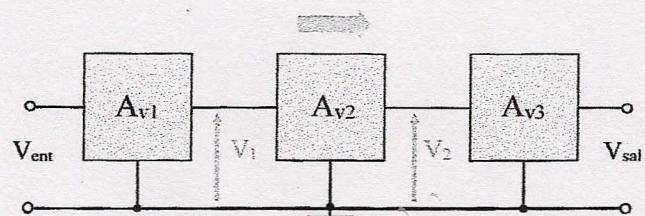


Figura 14.18. Diagrama de bloques del acoplamiento de amplificadores.

La ganancia total que se consigue con este acoplamiento es:

$$A_{vT} = \frac{V_{sal}}{V_{ent}}$$

Teniendo en cuenta que las ganancias que se consiguen en cada una de las etapas se calculan así:

$$A_{v1} = \frac{V_1}{V_{ent}}, \quad A_{v2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad A_{v3} = \frac{V_{sal}}{V_2}$$

Operando llegamos a la conclusión que:

$$A_{vT} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}$$

El resultado obtenido nos indica que la ganancia de un amplificador con varias etapas en cascada es igual al producto de las ganancias de cada una de ellas.

Así, por ejemplo, si se acoplasen dos etapas en cascada que poseyeran una ganancia de 100 cada una, se conseguiría una ganancia en conjunto igual a:

$$A_{vT} = 100 \cdot 100 = 10.000$$

Para realizar este acoplamiento pueden utilizarse condensadores, transformadores, acoplamiento directo y otros sistemas que estudiaremos a continuación.

14.5.1. Acoplamiento con condensador o RC

En la Figura 14.19 se muestra el acoplamiento de dos amplificadores de emisor común mediante el condensador C_2 .

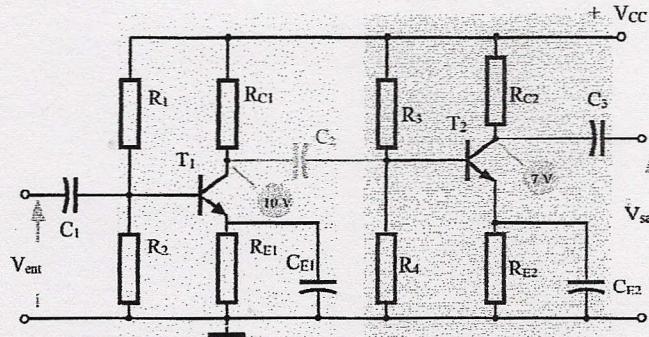


Figura 14.19. Acoplamiento de amplificadores con condensador.

Esta forma de acoplamiento es válida cuando las señales de entrada son de corriente alterna. El condensador bloquea las señales de C.C. de un amplificador a otro y permite el paso de la señal de C.A. De esta forma, se consigue que las diferentes etapas queden aisladas en lo que se refiere a la C.C. y, así, se evita el desplazamiento de los puntos Q de funcionamiento del transistor de cada etapa.

Para entender mejor esto, tomemos como ejemplo el amplificador en cascada de la figura 14.19. Al medir la tensión estática del colector de T_1 , nos da una tensión de 10 V. Sin embargo, la tensión estática de la base de T_2 es algo inferior, unos 7 V. En este caso, cada uno de estos transistores posee un punto de funcionamiento independiente. Esto se consigue gracias al aislamiento que produce el condensador a la C.C.

En el caso de que se cortocircuite el condensador de acoplamiento C_2 , la tensión de 10 V quedaría aplicada a la base de T_2 , llevando a este transistor a la saturación y la respuesta de este último ya no sería lineal.

El tipo de condensadores que se suelen utilizar para este tipo de acoplamiento son los electrolíticos. Con ellos se consigue un valor elevado de la capacidad; aspecto de gran interés para reducir la reactancia de los mismos a las bajas frecuencias de las señales de C.A. No obstante, este tipo de acoplamiento dcja de ser ventajoso para frecuencias demasiado bajas, pudiéndose afirmar que su aplicación es aceptable para frecuencias de señal de C.A. superiores a los 10 Hz.

14.5.2. Acoplamiento directo

En la Figura 14.20 se muestra un acoplamiento directo de dos etapas amplificadoras. Este tipo de acoplamiento se utiliza cuando la frecuencia de la señal es inferior a 10 Hz. Para estas frecuencias tan bajas los condensadores tendrían que poseer una capacidad elevada; cosa inviable en la mayoría de los casos.

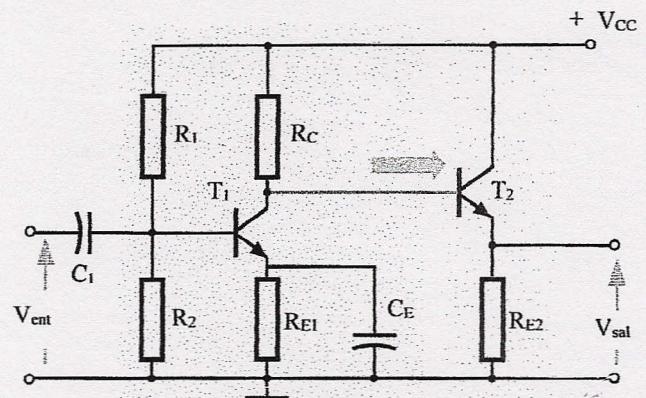


Figura 14.20. Acoplamiento directo de amplificadores.

El acoplamiento directo también se aplica para trabajar con señales de C.C., como es el caso de instrumentos de medida y osciloscopios, que en algunos casos operan con este tipo de corriente.

Estos amplificadores han de diseñarse de forma que las conexiones directas no desvíen los puntos de trabajo de cada transistor. Así, por ejemplo, en el amplificador de la Figura 14.20 hay que tener en cuenta que la tensión de emisor de T_1 es la misma que la base de T_2 . Todas las etapas necesitan puntos de funcionamiento con tensiones comunes, lo que complica el diseño en los casos en que hay que acoplar muchas etapas.

Con este acoplamiento se aumenta la sensibilidad a los cambios de temperatura. Por ejemplo, si aumenta la temperatura en la primera etapa, la corriente de fuga se eleva, aumentando también β ; esto hace desplazar el punto de funcionamiento del transistor de la siguiente etapa, haciendo al sistema muy inestable.

Otro inconveniente es que se amplifican las variaciones de tensión que se producen en la alimentación.

Tanto en el acoplamiento RC como en el directo, la relación de fase entre la entrada y la salida dependerá del número de etapas y del desfase que produzca cada una de ellas sobre la señal de entrada. Así, por ejemplo, en el caso de que todas las etapas estén en configuración EC, la salida estará en fase con la entrada para un número par de etapas, produciéndose un desfase de 180° si es impar.

14.5.3. Amplificador Darlington

En la Figura 14.21 se muestra un procedimiento ampliamente utilizado para acoplar directamente dos transistores en configuración emisor común. A este circuito se le conoce como conexión Darlington. La ganancia de tensión que se obtiene del conjunto es aproximadamente la unidad. Sin embargo, se consigue una gran ganancia de corriente, ya que ésta es aproximadamente igual al producto de las ganancias de cada uno de los transistores.

$$A_i \text{ (Darlington)} = \beta_1 \beta_2$$

Así, por ejemplo, si los transistores de un par Darlington tienen una ganancia de 150 cada uno, se conseguirá una ganancia de conjunto igual a:

$$A_i = 150 \cdot 150 = 22.500$$

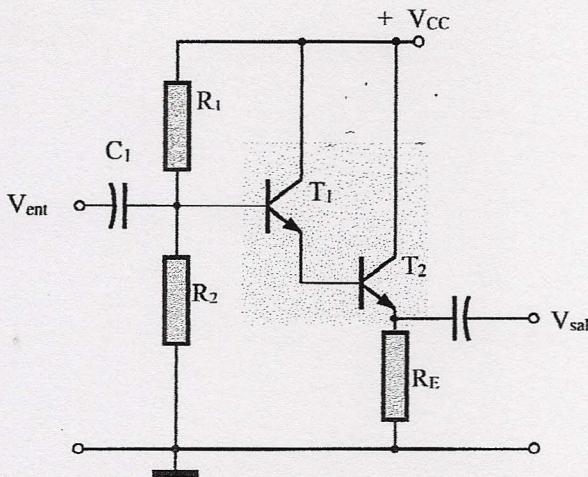


Figura 14.21. Amplificador Darlington.

La gran ventaja de este circuito es que posee una impedancia de entrada muy grande y una impedancia de salida pequeña. Este hecho, unido a la gran ganancia de corriente, hace que este circuito sea de gran interés en aquellas aplicaciones en donde sea necesario aislar las fuentes de señal con impedancia elevada de las cargas con pequeña impedancia.

Las parejas de transistores que forman el circuito Darlington se suelen fabricar en una sola cápsula con sólo tres terminales, tal como se muestra en la Figura 14.22.

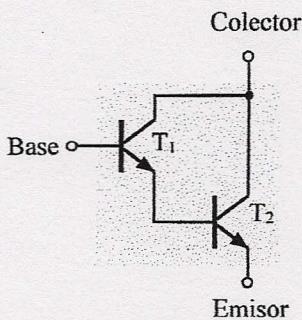


Figura 14.22. Transistor Darlington.

14.5.4. Acoplamiento con transformador

En la Figura 14.23 se representa un amplificador acoplado con transformador. El bobinado primario del mismo hace las veces de carga del colector del transistor. En el secundario se conecta la carga, que puede ser un altavoz u otra etapa amplificadora. La señal se acopla de una etapa a otra mediante el transformador. Las ventajas del transformador están en la adaptación de impedancias que con él se consiguen.

La relación de transformación de un transformador viene dada por la relación que existe entre el número de espiras del bobinado primario y el secundario. Esta relación se cumple también y con bastante aproximación para las tensiones y corrientes de ambos bobinados, es decir:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

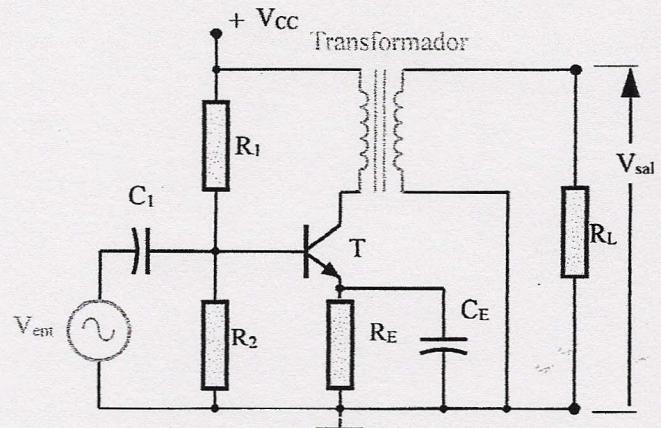


Figura 14.23. Acoplamiento de amplificadores con transformador.

Si llamamos Z_1 a la impedancia del bobinado primario y Z_2 a la impedancia de la carga que se conecta en el secundario se cumplirá que:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{V_2}{Z_2}$$

Sustituyendo estos valores en la expresión indicada con anterioridad, tendremos que:

$$m = \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2/Z_2}{V_1/Z_1} = \frac{V_2}{V_1} \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{m} \frac{Z_1}{Z_2}, \text{ de donde:}$$

$$m^2 = \frac{Z_1}{Z_2}$$

De aquí se deduce que la impedancia que aparece en el secundario es igual a:

$$Z_2 = \frac{Z_1}{m^2}$$

Esta expresión nos indica que con un transformador se consigue reducir la impedancia y mejorar la eficacia del acoplamiento para cargas de baja impedancia.

Ejemplo 14.9

Supongamos que el transformador de la Figura 14.23 posee 200 espiras en el bobinado primario y 20 en el secundario, y que la carga que aparece acoplada en el secundario es de 16 ohmios. Determinar la carga a la que queda sometido el colector del transistor.

Solución:

Primero calculamos la relación de transformación:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{200}{20} = 10$$

La carga que aparece en el primario y que es la aplicada al colector del transistor, es:

$$Z_1 = m^2 Z_2 = 10^2 \cdot 16 = 1.600 \Omega$$

Teniendo en cuenta que se trata de un amplificador de emisor común, esta impedancia será suficiente para provocar una aceptable ganancia de tensión. Recuerda que

para este tipo de amplificadores $A_v = R_C/r_e$. De esta forma, si, por ejemplo, el valor de la resistencia del diodo emisor fuese 8Ω , la ganancia obtenida tendría un valor de:

$$A_v = \frac{1.600}{8} = 200$$

Por otra parte, debido a que el transformador actúa como reductor, la ganancia quedaría reducida con el acoplamiento según la relación de transformación, es decir:

$$A_{vt} = \frac{A_v}{m} = \frac{200}{10} = 20$$

A pesar de esta reducción, con el transformador se consigue más ganancia que si hubiese hecho un acoplamiento directo. Comprobémoslo:

Si $R_C = 16 \Omega$, la ganancia de tensión hubiera quedado así:

$$A_v = \frac{R_C}{r_e} = \frac{16}{8} = 2$$