

Amplificadores multietapa y de potencia

Hasta este punto en el libro, nuestro enfoque sobre los amplificadores se ha centrado principalmente en circuitos que contienen solamente uno o dos dispositivos activos. Estos circuitos tienen una ganancia, resistencia de entrada, resistencia de salida y capacidades de manejo de potencia limitadas, y no pueden ser utilizados para llenar cualquier necesidad de amplificación. Afortunadamente, las limitaciones de amplificación en una sola etapa se pueden vencer mediante la utilización de amplificación en varias etapas. Como se muestra en este capítulo, el uso de varias etapas en cascada puede producir circuitos con grandes ganancias totales, una resistencia de entrada grande, y una resistencia de salida pequeña. La puesta en práctica de estos circuitos requiere de técnicas de diseño y de análisis que van más allá de los principios de diseño de una sola etapa.

Las técnicas de diseño multietapas analizadas en este capítulo están orientadas principalmente hacia circuitos integrados. En un entorno de circuito integrado, los parámetros de los dispositivos que dependen de variaciones en el proceso de fabricación se pueden controlar únicamente dentro de un rango específico de valores. Sin embargo, todos los dispositivos de un circuito integrado, tienen procesos de fabricación virtualmente idénticos. En consecuencia, dispositivos con parámetros bastante pareados, si no exactamente predecibles, si están fácilmente disponibles. Esta característica de los circuitos integrados es la razón de las técnicas de diseño que se utilizan en este capítulo, y que se amplían en el capítulo 12.

Este capítulo también contiene material sobre etapas y dispositivos de amplificación de potencia y dispositivos de potencia. Estos temas se incluyen aquí porque la última etapa de una cascada de amplificación multietapa a menudo es una etapa de potencia, que le permite al circuito proporcionar grandes cantidades de corriente a la carga. Incluso si la etapa de potencia de un circuito independiente no forma parte de un circuito integrado completo, como en el caso de un sistema de amplificación de potencia de audio, por ejemplo, la etapa de potencia, aun así, deberá quedar antecedida por una o más etapas de amplificación, y por tanto forma parte de una cascada multietapa. En esta última situación, muchas de las consideraciones de diseño de las etapas que se tratan en este capítulo, incluyendo carga de entrada, carga de salida y carga entre etapas, se siguen aplicando. En este contexto, resulta apropiado considerar las etapas de amplificación de potencia, y los dispositivos de potencia que se utilizan para su elaboración, dentro del mismo capítulo que los amplificadores integrados multietapas.

11.1 CARGA DE ENTRADA Y DE SALIDA

En esta sección, las limitaciones de la amplificación en una sola etapa, tipificadas por las representaciones en dos puertos del inversor y del seguidor de voltaje del capítulo 7, serán analizadas. El inversor

típico tiene una ganancia moderadamente grande y tiene resistencias de entrada y de salida en el rango de los kilohms. El seguidor de voltaje tiene una resistencia de entrada mucho más alta y una resistencia de salida mucho menor, pero tiene únicamente una ganancia unitaria. A menudo se requiere un amplificador que combine las características deseables tanto del inversor como del seguidor: una resistencia grande de entrada, una resistencia pequeña de salida y una gran ganancia de voltaje.

Como ejemplo de este requisito, suponga que una señal de micrófono, misma que representaremos como una fuente de voltaje sinusoidal de 10-mV pico a pico v_m , debe ser amplificada de manera lineal en un factor de aproximadamente 100. Suponga que la fuente de señal de 10-mV tenga una resistencia en serie interna de $R_m = 1 \text{ k}\Omega$. La salida del amplificador debe entregarse a la carga de 8Ω de un altavoz estándar. Uno pudiera estar tentado de llevar a cabo esta tarea con las capacidades de alta ganancia de un inversor BJT, que podría fácilmente diseñarse según las especificaciones siguientes:

$$r_{in} = 5 \text{ k}\Omega \quad r_{out} = 1 \text{ k}\Omega \quad a_v = -100 \quad (11.1)$$

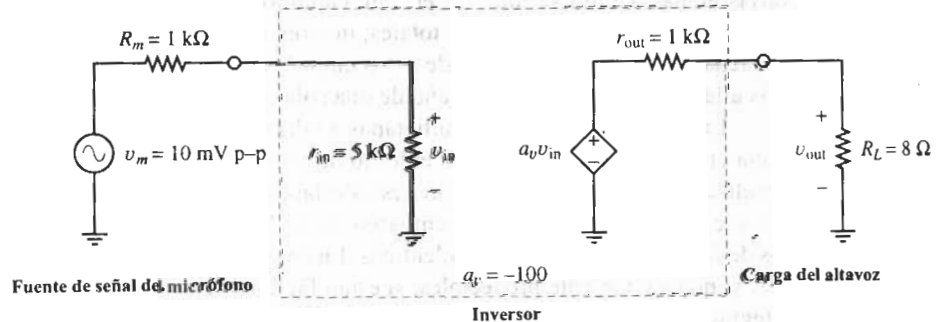
Suponga que un inversor construido de acuerdo con estas especificaciones se conecta a la fuente de señal del micrófono de 10 mV y a la carga de $8\text{-}\Omega$ descrita anteriormente. Las conexiones básicas entre la fuente de la señal, el amplificador y la carga, con el amplificador representado por una celda de dos puertos lineales, aparece en la figura 11.1.¹ El inversor responde al voltaje v_{in} medido a través de sus dos terminales de entrada. En este caso, v_{in} no es igual a v_m de la fuente de señal, pero en vez de ello está dado por

$$v_{in} = v_m \frac{r_{in}}{r_{in} + R_m} = \frac{5 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} v_m = 0.83 v_m \quad (11.2)$$

Como se muestra en esta ecuación (11.2), la carga a la entrada reduce la fuente de señal de 10 mV a 8.3 mV en las terminales de entrada del amplificador. Cuando $R_m \gg r_{in}$, la carga de entrada llega a ser aún más severa.

Figura 11.1

Modelo lineal de un inversor de una sola etapa conectado a una fuente de señal y carga.



Un proceso de carga similar atenúa la señal que aparece a través de la carga. En el circuito de la figura 11.1 el voltaje realmente entregado a R_L está dado por

$$v_{out} = a_v v_{in} \frac{R_L}{R_L + r_{out}} = a_v v_{in} \frac{8 \Omega}{8 \Omega + 1 \text{ k}\Omega} \approx 0.008 a_v v_{in} \quad (11.3)$$

Dada la carga expresada por las ecuaciones (11.2) y (11.3), la amplificación de voltaje total desde v_m hasta v_{out} se convierte en

$$\frac{v_{out}}{v_m} = a_v \frac{r_{in}}{r_{in} + R_m} \frac{R_L}{R_L + r_{out}} = -100(0.83)(0.008) \approx -0.66 \quad (11.4)$$

La ganancia neta de amplificación (medida como la versión amplificada de v_m que realmente aparece a través de R_L) ni siquiera está cerca al valor deseado de -100 , y de hecho es menor a la unidad. En este caso, la carga de salida de r_{out} por R_L es tan catastrófica que el sistema de amplificación total de hecho atenúa la señal de entrada.

¹ Pudiera generarse alguna confusión por el uso de la palabra "carga" que es a veces aplicada al elemento de cambio de nivel de un inversor. En esta sección, la "carga" es un elemento externo conectado por afuera de la topología del amplificador.

11.2 CASCADA DE AMPLIFICACIÓN EN DOS PUERTOS

El impacto de la carga de entrada y de salida se puede minimizar creando una cascada de dos amplificadores, como se muestra en la figura 11.2. La primera etapa está formada de un inversor con una gran ganancia, la segunda de un seguidor de voltaje, o etapa de "acoplamiento", con una gran resistencia de entrada y una baja resistencia de salida. Las ganancias y voltajes de entrada de la primera y segunda etapas se han marcado como a_1 , a_2 , v_1 y v_2 , respectivamente, y las resistencias de entrada y de salida en pequeña señal como r_1 hasta r_4 .

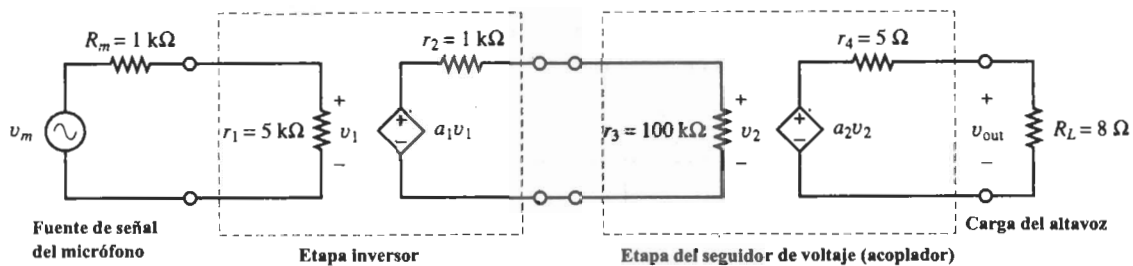


Figura 11.2 Amplificador en cascada formado de una etapa inversor y una etapa de seguidor de voltaje.

Para obtener la ganancia general de v_m a v_{out} se puede aplicar la división de voltaje a cada uno de los puertos acoplados. Empezando del lado derecho de la cascada de la figura 11.2, v_{out} se puede expresar de la siguiente forma

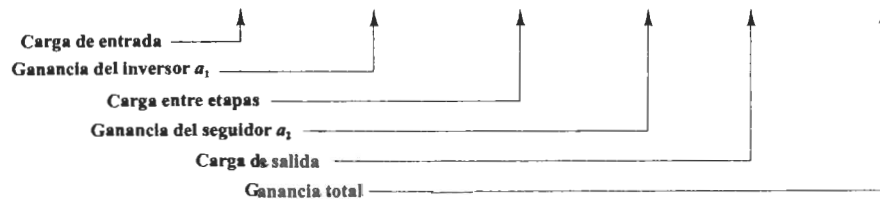
$$\begin{aligned}
 v_{out} &= (a_2 v_2) \frac{R_L}{R_L + r_4} \\
 &= (a_1 v_1) \frac{r_3}{r_3 + r_2} a_2 \frac{R_L}{R_L + r_4} \\
 &= v_m \frac{r_1}{r_1 + R_m} \frac{a_1 r_3}{r_3 + r_2} \frac{a_2 R_L}{R_L + r_4} \quad (11.5)
 \end{aligned}$$

Un análisis en pequeña señal de la configuración del seguidor revela que r_{in} y r_{out} en la etapa del seguidor de voltaje a menudo depende de r_{in} y r_{out} de las etapas posterior y precedente, respectivamente. (Este problema se tratará específicamente en una sección posterior). Por ahora, mostraremos cómo resuelve el seguidor el problema de la carga suponiendo que tiene los siguientes parámetros típicos:

$$r_{in} = r_3 = 100 \text{ k}\Omega \quad r_{out} = r_4 = 5 \text{ }\Omega \quad a_v = a_2 = 1 \quad (11.6)$$

Para estos valores, la ganancia general de cascada dada por la ecuación (11.5) se convierte en

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{out}}{v_m} &= \left(\frac{5 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \right) (-100) \left(\frac{100 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} \right) (1) \left(\frac{8 \text{ }\Omega}{8 \text{ }\Omega + 5 \text{ }\Omega} \right) \\
 &= (0.83) (-100) (0.99) (1) (0.62) \approx -51 \quad (11.7)
 \end{aligned}$$



El resultado (11.7), a pesar de ser aproximadamente la mitad de la ganancia deseada -100 , se acerca mucho más al valor objetivo que el valor (11.4) obtenido en el caso de un inversor sin acoplamiento.

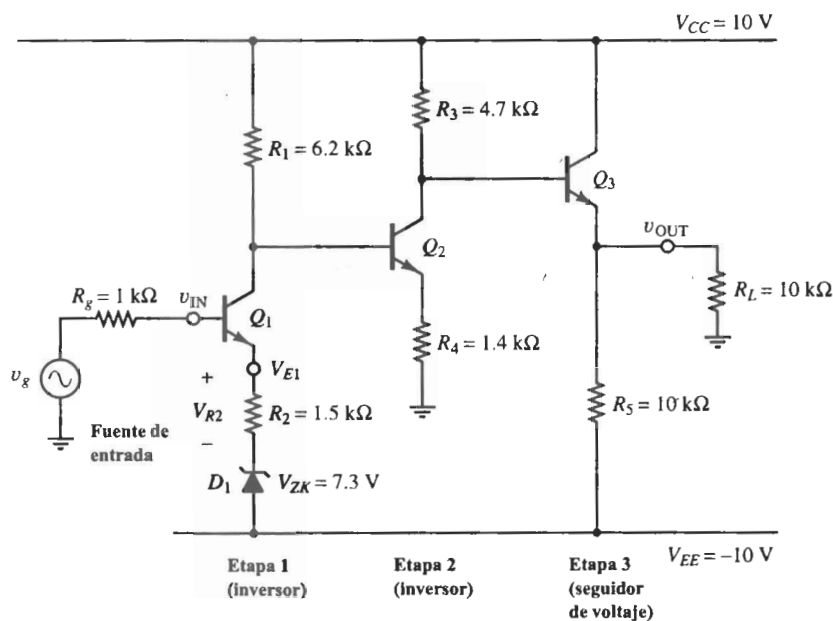
La técnica de la cascada de etapas se utiliza a menudo para crear amplificadores con una alta resistencia de entrada y una baja resistencia de salida, así como con ganancias que son mucho más altas que las que se pueden obtener en sólo una etapa. En el siguiente ejemplo, se ilustran varias técnicas de análisis y diseño, que se aplican en forma única en amplificadores multietapas.

EJEMPLO 11.1

El circuito de la figura 11.3 es una cascada de amplificadores BJT de tres etapas, acoplados en cd, fabricados a partir de dispositivos discretos. Estime la ganancia aproximada en pequeña señal, utilizando la técnica de dos puertos en cascada, y aproximaciones de ingeniería adecuadas.

Figura 11.3

Amplificador en cascada acoplado en cd, en tres etapas.



Solución

• Revisión del diseño de amplificador

Las dos primeras etapas son inversoras en la configuración de polarización por retroalimentación, y la tercera etapa es un seguidor de voltaje. Se incluye el diodo zener D_1 para ayudar en la polarización de Q_1 y permitir que la primera etapa tenga una ganancia relativamente alta. En la tabla 11.1 se enumeran expresiones para la ganancia, resistencia de entrada y resistencia de salida de cada una de las etapas, según se deducieron en el capítulo 7. También en la tabla aparecen expresiones aproximadas para cada uno de estos parámetros en el límite para un β_o grande. En comparación con R_2 la r_z incremental del zener se desprecia.

Observe que, en general, la resistencia de entrada de un seguidor depende de su resistencia de carga R_L , en tanto que la resistencia de salida del seguidor depende de la resistencia de fuente de la etapa precedente. Al formar la cascada de dos puertos de la figura 11.3 sin embargo, solamente se necesita incluir una de estas dos dependencias. Cuando se calculan los factores de carga en la tercera etapa de la cascada, cualquiera de estas dependencias se tomarán en consideración de manera independiente para el acoplamiento de retroalimentación introducido por R_5 . La inclusión de ambas dependencias en las expresiones del factor de carga sería lo mismo que tomar dos veces en consideración los efectos del aco-

