

CAPÍTULO 1

Introducción a la electrónica

	Introducción	5	1.6	Respuesta de frecuencia de Amplificadores	30
1.1	Señales eléctricas	6	1.7	El inversor lógico digital	33
1.2	Espectro de frecuencia de las señales	8	1.8	Simulación de circuitos mediante SPICE	34
1.3	Señales analógicas y señales digitales	11			
1.4	Amplificadores	12			
1.5	Modelos equivalentes para amplificadores	22			

INTRODUCCIÓN

El tema de este libro es la electrónica analógica o también llamada electrónica lineal de actualidad, un campo que se reconoce también como microelectrónica lineal, que alude a la tecnología de circuitos integrados lineales (*IC, integrated circuits*), que en estos momentos es capaz de producir circuitos que incluyen millones de componentes en una pequeña pieza de silicio (conocida como **chip de silicio**) cuya área es de apenas unos 100 milímetros cuadrados. Por ejemplo, uno de estos circuitos microelectrónicos aunque del área digital, es una computadora completa, que es conocida mas comúnmente como **microcomputadora** o, de manera más general, como **microprocesador**.

En este libro se estudian dispositivos electrónicos, sobre todo amplificadores que pueden usarse de manera individual (en el diseño de **circuitos discretos**) o como bloques integrantes de un chip de **circuito integrado (CI)**. Se estudia el diseño y se analizan las interconexiones de estos dispositivos, que forman circuitos discretos e integrados de diversa complejidad y que realizan una amplia variedad de funciones. También se describen algunos chips de CI disponibles y sus aplicaciones en el diseño de sistemas electrónicos.

El objetivo de este primer capítulo consiste en introducir algunos conceptos y cierta terminología y simbología básica. Sobre todo se describirán a las **señales eléctricas** y a una de las funciones más importantes en el procesamiento de las señales analógicas para la que están diseñados muchos circuitos integrados lineales: **la amplificación** de la señal. Luego se revisará el concepto de **linealidad** en el mecanismo de la amplificación y se introducirán los modelos circuitales equivalentes de los amplificadores lineales. Estos modelos equivalentes se utilizarán en capítulos posteriores, para el diseño y análisis de circuitos amplificadores reales.

Mientras el bloque amplificador es el dispositivo electrónico más frecuentemente empleado en el procesamiento de las señales analógicas en el caso del proceso de señales digitales el bloque elemental infalible es la llamada compuerta lógica por ello y con la finalidad de establecer la deseada articulación con la electrónica del área digital, se realizará un vistazo previo al inversor digital, su función en un circuito y sus características mas importantes.

Además de introducirnos en el estudio de la electrónica, este capítulo sirve como puente entre el estudio de los circuitos lineales y el tema de este libro: el diseño y análisis de circuitos electrónicos.

1.1 SEÑALES ELECTRICAS

Vivimos en un mundo que esta en constante cambio. Nuestra supervivencia al estar inmersos en él depende en parte de nuestra habilidad de percibir el medio que nos rodea y responder en forma adecuada: si sentimos frío porque la temperatura baja, entonces nos abrigamos. En ese acontecimiento se percibe una magnitud cambiante (**Magnitud de Entrada**) y producimos el cambio de otra magnitud en respuesta a ello (**Magnitud de Salida**).

Desde hace algunos miles de años, el hombre ha desarrollado una gran cantidad de máquinas y herramientas para ayudarse en su interacción con el medio. Con frecuencia dichas máquinas y herramientas también perciben magnitudes físicas y utilizan esta información para controlar su funcionamiento.

Son muchas las magnitudes físicas que pueden ser controladas en dichos procesos; como ejemplo podemos citar la temperatura, el desplazamiento, la fuerza, la humedad, la intensidad de la luz, el tiempo, la masa, la población, etc. La mayoría de dichas magnitudes físicas varían en forma **continua**, es decir que cambian en forma ininterrumpida de un valor a otro, sin escalonamientos repentinos o discontinuidades. Tales magnitudes pueden tomar un número infinito de valores y se conocen como **magnitudes continuas o analógicas**.

Algunas de ellas, en cambio, no cambian de manera uniforme, sino en forma abrupta entre algunos valores determinados, por ejemplo la población. Estas magnitudes se conocen como **magnitudes discretas**. Parte de las variables citadas como ejemplo son variables analógicas y otra parte son variables discretas. Asimismo una cualquiera de estas variables bajo determinadas condiciones de análisis puede considerarse analógica y sometida a otras condiciones de contorno también puede ser considerada como variable discreta. Un ejemplo de esto último puede ser la masa, que bajo condiciones macroscópicas puede considerarse como una variable continua y bajo la visión atómica por el contrario la masa tiene características discretas.

Asimismo, muchas de las máquinas y herramientas inventadas por el hombre se encuentran constituidas por **sistemas o dispositivos electrónicos**, es decir aparatos constituidos por **componentes** dispuestos en **circuitos** que se someten a la acción de **fuentes de energía eléctrica** para realizar alguna función útil. En dichos sistemas electrónicos, una magnitud física variable se representa generalmente mediante una **señal eléctrica** que varía de manera tal que describe a esa magnitud. Por ejemplo en un circuito telefónico, mediante la utilización de una cápsula telefónica transmisora (**transductor**), se hace variar la corriente eléctrica del circuito (alimentado con una batería) al ritmo de las diferencias de presión generadas por la voz en el aire cercano a dicha cápsula.

Entonces quiere decir que se podrán tener **señales eléctricas analógicas**, como el caso de la corriente eléctrica en el circuito telefónico, y **señales eléctricas discretas**, tal como la corriente que se establece en el circuito de alimentación de una lámpara eléctrica de iluminación, cada vez que accionamos la llave interruptora. En este último caso la señal discreta del circuito de iluminación, puede tomar solo dos valores posibles o bien cero, o bien una corriente de valor bien determinado, motivo por el cual suele ser definida como **señal binaria**. También se pueden tener otras variables discretas o señales discretas que pueden tomar un número finito de valores y, por lo tanto, cada posible valor podría describirse mediante un número (0 y 1 en el caso de las señales binarias por ejemplo), por esta razón con frecuencia se habla de **señales digitales**.

Existe una gran variedad de transductores, cada uno adecuado a una entre muchas otras magnitudes físicas. Por ejemplo, para la temperatura se cuenta con la termocupla, mientras que las ondas de sonido generadas por la voz humana pueden convertirse en señales eléctricas empleando un micrófono, que es, en efecto, un transductor de presión. No se pretende estudiar aquí a los transductores; en cambio se supondrá que las señales que interesan ya existen bajo la forma eléctrica y se incorporan a los dispositivos electrónicos mediante las dos formas equivalentes que se muestran en la figura 1.1. En la figura 1.1.a) la fuente de señal se representa mediante una fuente independiente de tensión $v_s(t)$ que tiene una resistencia interna R_s . En la representación alternativa de la figura 1.1.b) la señal esta representada por una fuente independiente de corriente $i_s(t)$ y su resistencia interna R_s en paralelo.

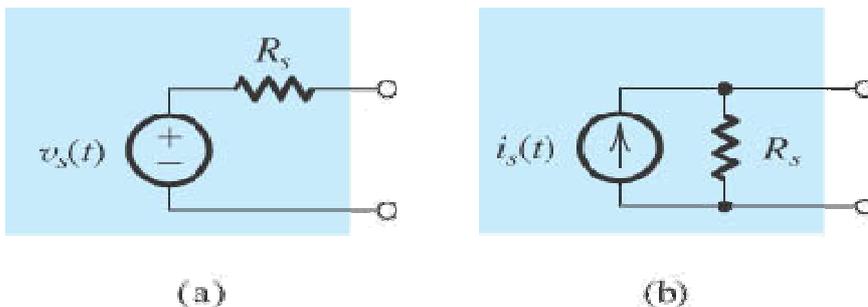


Figura 1.1 Dos formas de representación de la fuente de señal: a) Modelo de Thévenin y b) Modelo de Norton

Aunque las dos representaciones son equivalentes, la primera (conocida como la forma de Thévenin) es preferible cuando R_s es baja. La segunda (conocida como la forma de Norton) se prefiere cuando R_s es alta. Estas formas de representación o circuitos equivalentes se comprenderán mejor un tanto más adelante, en este mismo capítulo cuando se describan los distintos tipos de amplificadores. Por el momento, es importante familiarizarse con los teoremas de Thévenin y Norton (para conocer una breve reseña, consulte el apéndice D) y tome en cuenta que para que ambas representaciones de la figura 1.1 sean equivalentes sus parámetros deben estar relacionados mediante

$$v_s(t) = i_s(t) \cdot R_s$$

En base a lo descrito precedentemente resulta evidente que una señal eléctrica es una magnitud eléctrica (tensión o corriente) que varía con el tiempo (condición de dinámica) y puede representarse con una gráfica como las que se muestran en la figura 1.2 para una señal digital a) y como ejemplo de una señal analógica b). Para la señal analógica en realidad el contenido de la información se representa con los cambios de la amplitud a medida que avanza el tiempo; es decir, la información se incluye en las variaciones de la forma de onda de la señal. En general y por el carácter intrínseco de la información resulta imposible caracterizar matemáticamente a dichas formas de señal. En otras palabras, no es fácil describir de manera simple una onda de aspecto arbitrario como la de la figura 1.2.b). Por otro lado debe comprenderse que cualquier modificación en dicha forma arbitraria de la forma de señal significa un cambio radical de la información. Por supuesto, esta descripción y característica tiene una gran importancia para el diseño apropiado de los circuitos que deban procesar a dichas señales.

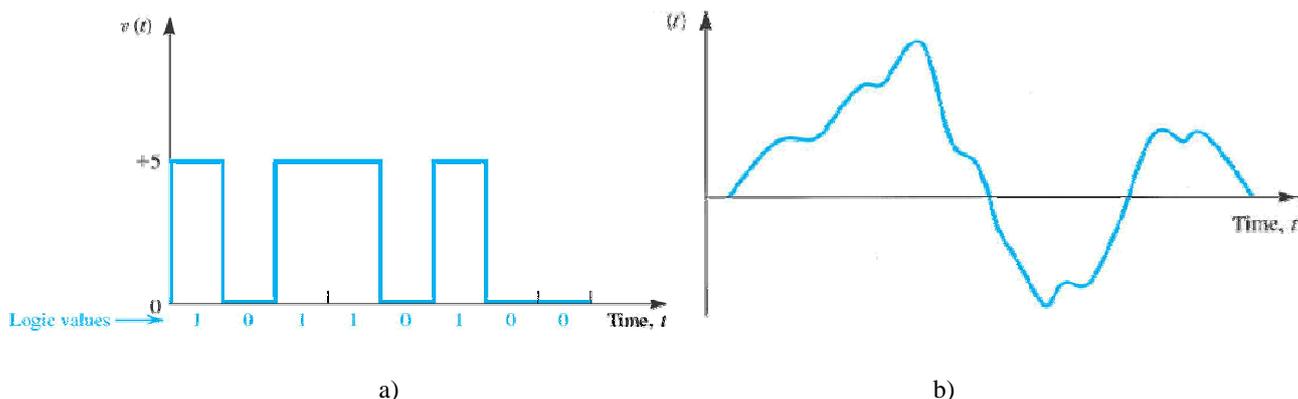


Figura 1.2 a) señal digital binaria , b) una tensión de señal arbitraria

EJERCICIOS

1.1 Para la representación de una fuente de señal que se muestra en las figuras 1.1. a) y b), ¿Qué tensiones se medirían en el par de terminales con los mismos a circuito abierto? Si, para cada uno, los terminales de salida se encontraran en cortocircuito (es decir unidos mediante un conductor) ¿Qué corriente fluiría por dicho cortocircuito? Para que la representación sea equivalente, ¿Cuál debe ser la relación entre v_s , i_s y R_s ?

Resp. Para a), $v_{oc} = v_s(t)$, para b) $v_{oc} = R_s \cdot i_s(t)$; para a) $i_{sc} = (v_s(t) / R_s)$, para b) $i_{sc} = i_s(t)$; para que ambas representaciones sean equivalentes $v_s(t) = R_s \cdot i_s(t)$

1.2 Una fuente de señal representada por las formas de la figura 1.1.a) o b) proporciona una tensión a circuito abierto de 10 mV y una corriente de cortocircuito de 10 μ A. ¿Cuál es la resistencia interna de la fuente?

Resp. 1 K Ω

Son muchas las razones para representar magnitudes físicas mediante señales eléctricas. Resulta muy sencillo procesar las señales eléctricas mediante circuitos electrónicos que son tanto económicos como confiables. Las señales eléctricas pueden transmitirse sin dificultad a largas distancias, pueden ser almacenadas para reproducir más tarde o en general, pueden ser procesadas de múltiples maneras, pero todo ello no tendría ningún sentido si al final no fueran a utilizarse con determinada finalidad en algún transductor final.

En la actualidad los dispositivos electrónicos han llegado a casi todas las áreas de nuestras vidas. Estos dispositivos nos despiertan por la mañana, controlan el funcionamiento de nuestros autos cuando conducimos hacia nuestro trabajo, mantienen el ambiente de trabajo confortable en nuestras oficinas y hogares, están presentes en todo sistema de seguridad, nos permiten comunicarnos a cualquier parte del mundo, proporcionan el acceso a información con solo oprimir un botón, administran la provisión de energía y proporcionan entretenimiento después del día de trabajo, etc.

Muchas veces los dispositivos electrónicos se utilizan porque cumplen su cometido de manera económica o porque lo hacen con limpieza, en comparación con los gastos u otros trastornos que demandarían otro tipo de dispositivos que también podrían usarse. Otras veces los dispositivos electrónicos son la única solución.

1.1.1. Dispositivos electrónicos lineales y digitales:

En algunos procesos la señal eléctrica representativa de alguna magnitud física que se procesa (información) se mantiene con una forma de variación analógica, tal como se encontraba la magnitud física. Otras veces la señal adquiere la forma digital, porque así se presenta la magnitud física representada o bien porque dentro mismo del dispositivo es convertida o transformada desde su forma analógica original hacia una forma del tipo digital.

Es evidente que la forma de procesamiento requerida variará con la naturaleza de las señales eléctricas que se vuelquen en los terminales de entrada del dispositivo, con los requerimientos del transductor final conectado en los terminales de salida y con la función total que se busca. Sin embargo, hay ciertos elementos en este procesamiento que son muy particulares según sea el tipo de señal eléctrica de que se trate y muchas veces comunes para ambos tipos de señales.

Por este motivo los dispositivos electrónicos que tratan con señales analógicas deben reunir características bien diferentes de aquellos que tratan con las señales digitales, por consecuencia podemos identificar en la práctica a los dispositivos electrónicos digitales y a los dispositivos electrónicos analógicos o lineales y de la misma forma las técnicas y conocimientos que se derivan de su estudio conforman el conjunto de saberes de la electrónica digital y de la electrónica de los circuitos lineales, respectivamente.

Uno de los mecanismos más frecuentes que se deben desarrollar en los dispositivos electrónicos lineales es la **amplificación**, en tanto que en los dispositivos electrónicos digitales las operaciones más comunes, son las se llevan a cabo en las **compuertas lógicas** mediante las cuales pueden concretarse las mas variadas gama de funciones lógicas. Pero cualquiera sea el tipo de dispositivos electrónicos de que se trate, ambos comparten a las llamadas **fuentes de alimentación**,

1.2 ESPECTRO DE FRECUENCIA DE LAS SEÑALES

Una caracterización sumamente útil de una señal, así como de cualquier función temporal de forma totalmente arbitraria, es aquella que se hace desde el punto de vista de su **espectro en frecuencia**. Esta descripción de las señales se fundamenta en los conceptos matemáticos de las **series de Fourier** y la **transformada de Fourier**¹. En este momento no interesan los detalles de estas transformaciones; basta con decir que proporcionan los medios para representar una tensión de señal $v_s(t)$ o una corriente de señal $i_s(t)$ como una suma de señales de forma senoidal de diferentes amplitudes y frecuencias. Esto hace que la curva o forma de onda senoidal sea una señal importante en el análisis, diseño y prueba de los circuitos electrónicos. Es por ello que se hace necesario revisar brevemente las propiedades de la señal senoidal. En la figura 1.3 se muestra una tensión de señal con forma senoidal $v_a(t)$,

$$v_a(t) = V_a \text{ sen } \omega t \quad (1.1)$$

en donde V_a representa el valor máximo o amplitud de pico en volts y ω la frecuencia angular o pulsación en radianes por segundo, es decir, $\omega = 2\pi f$ rad/s, donde además f es la frecuencia en Hertz, $f = (1/T)$ Hz, y T es el periodo en segundos.

La forma de señal senoidal queda totalmente definida si se le conocen su valor de pico V_a , su pulsación ω o su frecuencia f y su fase ϑ definida desde un cierto tiempo arbitrario tomado como referencia. En el caso descrito en la figura 1.3 el origen de la escala de tiempos se ha seleccionado de modo que el ángulo de fase ϑ sea nulo. Debe mencionarse que es frecuente expresar al valor máximo de esta señal senoidal como una función del valor eficaz de la misma (también llamado RMS por sus siglas en inglés) atendiendo que el mismo es $\sqrt{2} = 1,41$ veces dicho valor eficaz. Por ejemplo si nos referimos a la red de energía eléctrica domiciliaria, que en nuestro país es de corriente alternada (en la jerga de forma de señal senoidal) cuando se dice que la misma suministra 220 volt con una frecuencia de 50 c/s. ello significa que tiene una forma de señal senoidal con un valor de tensión de pico de $(1,41 \cdot 220)$ volt es decir 310,2 volt y una pulsación de 314 rad/s.

¹ El lector que aún no haya estudiado estos temas no debe alarmarse. No se hará una aplicación detallada de este material hasta el Capítulo 6. No obstante, una comprensión general de los conceptos que se quieren describir en esta Sección 1.2 resulta muy útil cuando se estudian las partes iniciales de este libro.

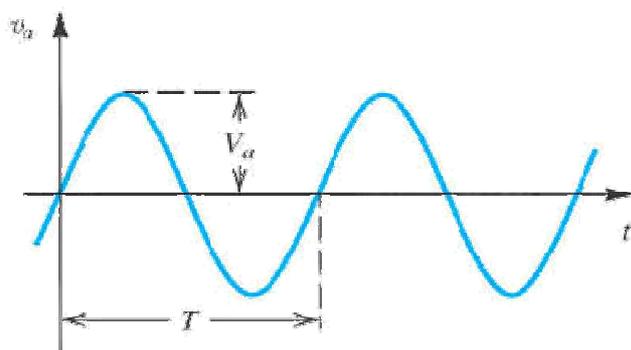


Figura 1.3 Tensión de señal de forma senoidal de amplitud V_a y frecuencia $f = 1/T$ Hz. La pulsación $\omega = 2\pi f$ rad/s.

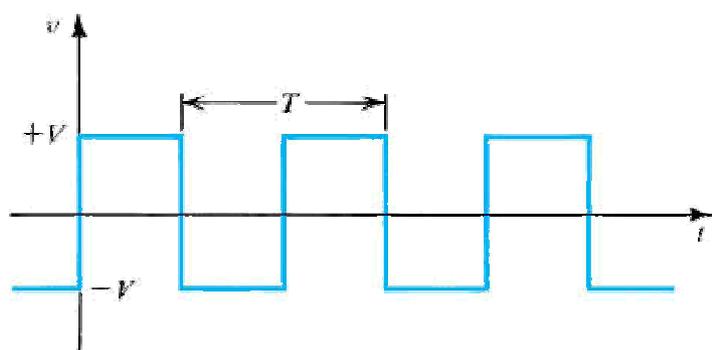


Figura 1.4 Señal de onda cuadrada simétrica, de amplitud V .

En el ejemplo de señal que hemos presentado en la figura 1.2.b) como ya se dijo, la información está representada por la amplitud de la tensión o de la corriente para cada instante de tiempo considerado. Vale la pena observar que si eligiéramos a una señal senoidal para que la misma contenga a la información, aparte de la **amplitud**, se puede lograr que la **frecuencia** o la **fase** de dicha señal representen a la magnitud física.

Regresando ahora a la representación de señales como la sumatoria de componentes sinusoidales, se observa que la serie de Fourier se utiliza para concretar esta tarea en el caso especial en que la señal original sea una función periódica del tiempo. Por otra parte, la transformada de Fourier es más general y puede emplearse para obtener el espectro de frecuencias de una señal cuya forma de onda es una función arbitraria del tiempo.

La serie de Fourier permite expresar una función periódica del tiempo determinada como la suma de un número infinito de señales senoidales cuyas frecuencias están relacionadas armónicamente. Por ejemplo, la señal de onda cuadrada simétrica de la figura 1.4 podría expresarse como

$$v(t) = \frac{4V}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right) \quad (1.2)$$

donde V es la amplitud de la onda cuadrada y $\omega_0 = 2\pi/T$ (T es el período de la onda cuadrada) es la llamada pulsación fundamental. Obsérvese que debido a que las amplitudes de los armónicos decrecen progresivamente, puede truncarse la serie infinita, y esta así acotada proporciona una aproximación de la onda cuadrada, tal como puede verse seguidamente

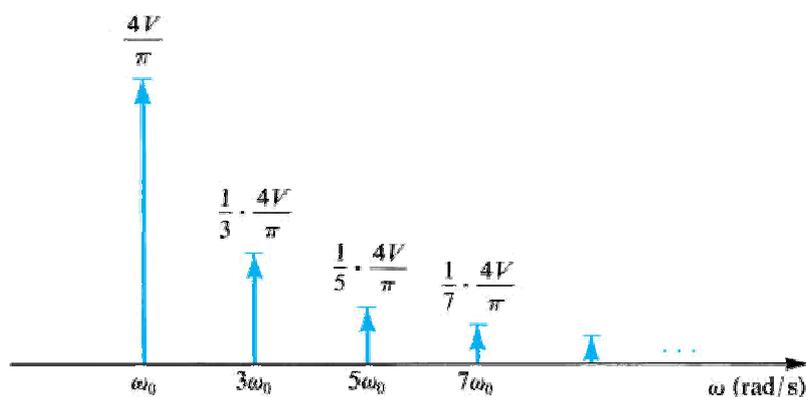


Figura 1.5 El espectro de frecuencia (también conocido como espectro lineal) de la onda cuadrada periódica de la figura 1.4.

Los componentes sinusoidales de la serie señalada como ecuación (1.2) conforman el espectro de frecuencia de la señal de onda cuadrada. Este espectro se representa de manera gráfica como en la figura 1.5, donde el eje horizontal representa la pulsación angular ω en radianes por segundo.

La transformada de Fourier puede aplicarse a una función del tiempo que no sea periódica, tal como la descrita en la figura 1.2. b) y su resultado representa su espectro de frecuencias como una función continua de la frecuencia, tal como se indica en la figura 1.6. A diferencia del caso de las señales periódicas, en el que el espectro está formado por frecuencias discretas (en ω_0 y sus armónicos), el espectro de una señal no periódica contiene generalmente todas las frecuencias posibles. No obstante, las partes esenciales del espectro de señales prácticas suelen confinarse a segmentos relativamente cortos del eje de pulsaciones (ω), observación que es muy útil en el procesamiento de estas señales. Por ejemplo, el espectro de sonidos audibles como la voz y la música se encuentra comprendido entre unos 20 Hz y 20 KHz (intervalo de frecuencia conocido como banda de audio). Aquí debemos observar que, a pesar de que algunos tonos musicales tienen frecuencias superiores a 20 KHz, el oído humano no puede escucharlas. Como otro ejemplo, el espectro de las señales de video analógico se ubica entre 0 y 4,5 MHz.

Se concluye esta sección con la idea de que una señal puede representarse con la variación de una onda como función del tiempo, como en la tensión de señal $v_a(t)$ mostrada en la figura 1.2 b), o con su espectro de frecuencias, como en la figura 1.6. A estas dos representaciones se las conoce como representación en el dominio del tiempo y representación en el dominio de la frecuencia, respectivamente. La representación en el dominio de la frecuencia de $v_a(t)$ se denotará con el símbolo $V_a(\omega)$.

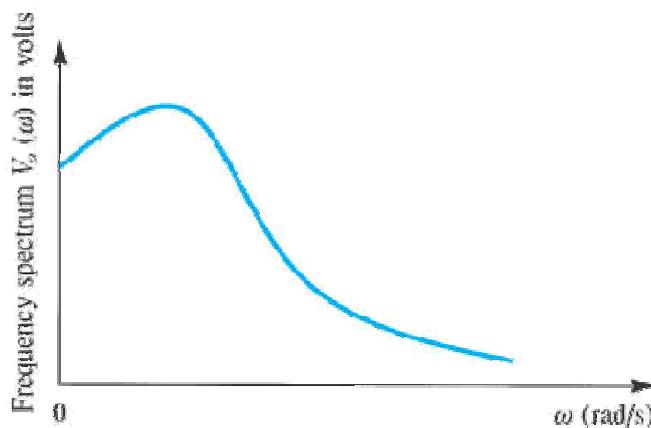


Figura 1.6 El espectro de frecuencia de una forma de señal arbitraria, tal como la de la figura 1.2 b)

EJERCICIOS

- 1.3 Encuentre la frecuencia f y la pulsación ω de una señal senoidal que posee un período de 1 ms.
Resp. $f = 1000$ Hz; $\omega = 2\pi \cdot 10^3 = 6280$ rad/s.
- 1.4 ¿Cuál es el período T de las señales senoidales caracterizadas por las frecuencias a) 50 Hz? b) $f = 10^{-3}$ Hz? y c) $f = 1$ MHz?
Resp. a) 20 ms; b) 1000 s; c) 1 μ s
- 1.5 La banda de transmisión de televisión UHF (ultra alta frecuencia) comienza con el canal 14 y se extiende desde 470 a 806 MHz. Si se asigna a cada canal 6 MHz ¿Cuántos canales pueden incluirse en esta banda?
Resp. 56, del 14 al 69
- 1.6 Cuando la señal de onda cuadrada de la figura 1.4, cuya serie de Fourier está dada por la ecuación (1.2), se aplica a un resistor, la potencia total disipada puede calcularse directamente utilizando la relación $P = (1/T) \int_0^T (v^2/R) dt$ ó indirectamente al sumar la contribución de cada una de las componentes armónicas (es decir $P = P_1 + P_3 + P_5 + \dots$), que puede encontrarse directamente de los valores eficaces. Verifique que los dos métodos son equivalentes. ¿Qué fracción de la energía de una onda cuadrada está en su fundamental?, ¿en sus primeros cinco armónicos?, ¿en sus primeros siete?, ¿en sus primeros nueve?, ¿En que número de armónicos se encuentra el 90 % de la energía? (Tome en cuenta que al contar los armónicos, la fundamental en ω_0 es la primera, la que está en $2\omega_0$ es la segunda, etc.)
Resp. 0,81 ; 0,93 ; 0,95 ; 0,96 ; 3

1.3 SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES

Tal como ya lo mencionamos, a la tensión de señal descrita en la figura 1.2 b) se la denomina **señal analógica**. El nombre deriva del hecho de que esta señal es análoga, o parecida, a la magnitud física que representa. La amplitud de una señal analógica puede tomar cualquier valor (es decir, la amplitud de una señal analógica muestra una variación continua en su intervalo de actividad). Casi todas las señales en el mundo son analógicas. Los circuitos electrónicos que procesan estas señales son **circuitos analógicos o lineales** y en este libro se analizarán diversos circuitos analógicos, sobre todo el amplificador.

Una forma alternativa de representación de señal es una secuencia de números, en la que cada número representa la magnitud de una señal en un instante determinado de tiempo. La señal resultante es una **señal digital**. Para ver la manera en que puede representarse una señal de esta forma (es decir, la manera en que las señales pueden convertirse de su forma analógica a digital) cabe observar la figura 1.7 a). Aquí la curva representa una tensión de señal, idéntica a la de la figura 1.2 b). A intervalos iguales en el eje del tiempo se han marcado los instantes t_0, t_1, t_2 , etc. En cada uno de estos instantes se mide la magnitud de la señal, proceso al que se lo denomina **muestreo**. En la figura 1.7 b) se muestra una representación de la señal de la figura 1.7 a) a partir de sus muestras. La señal de la figura 1.7 b) está definida sólo en los instantes de muestreo; ya no es una función continua del tiempo sino una **señal de tiempo discreta**. Sin embargo, dado que la magnitud de cada muestra puede tomar cualquier valor en un intervalo continuo, la señal de la figura 1.7 aún es una señal analógica.

Ahora bien, si se representa la magnitud de cada una de las muestras de la señal de la figura 1.7 b) con un número representado por una cantidad finita de dígitos, entonces la amplitud de la señal ya no será continua; en cambio, se dirá que se ha **cuantificado, discretizado o digitalizado**. La señal digital resultante será entonces simplemente una secuencia de números que representa las magnitudes de las muestras sucesivas de las señales.

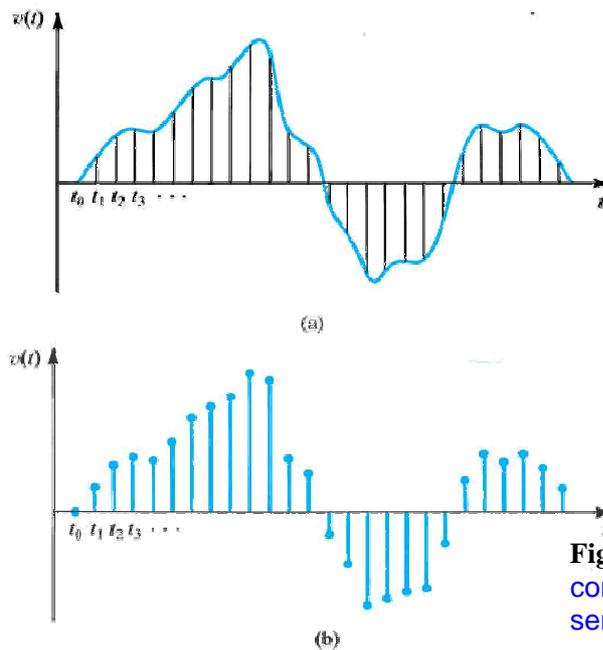


Figura 1.7 El muestreo de una señal analógica continua en el tiempo (a) da como resultado una señal discreta en el tiempo (b).

La elección de un sistema numérico para representar las muestras de la señal afecta el tipo de señal digital producida y tiene un efecto profundo en la complejidad de los circuitos digitales que se requieren para procesar las señales. El sistema numérico **binario** produce las señales y los circuitos digitales más simples. En un sistema binario cada dígito toma sólo uno de dos valores posibles, denotados 0 y 1. De manera correspondiente y tal como se representara en la figura 1.2 a), las señales digitales en los sistemas binarios sólo necesitan dos niveles de voltaje, que pueden etiquetarse como alto y bajo. En cambio si utilizamos N dígitos binarios (binary digits o bits) para representar cada muestra de la señal analógica, el valor de la muestra digitalizada puede expresarse como

$$D = b_0 \cdot 2^0 + b_1 \cdot 2^1 + b_2 \cdot 2^2 + \dots + b_{N-1} \cdot 2^{N-1} \quad (1.3)$$

Aunque el procesamiento digital de señales se ha extendido en la actualidad a la mayoría de los sistemas electrónicos, siguen existiendo muchas funciones de procesamiento de señales que los circuitos analógicos realizan mejor. Por supuesto, muchos sistemas electrónicos incluyen partes analógicas y digitales. De ello se desprende que un buen diseñador electrónico deba dominar el diseño de los circuitos analógicos y digitales simultáneamente.

1.4 AMPLIFICADORES

En esta sección se presenta una función fundamental del procesamiento de las señales analógicas que se emplea, de una forma u otra, en casi todo sistema electrónico: la amplificación de la señal. Se estudia el amplificador como un bloque de construcción de circuitos, es decir se consideran sus características externas y se dejará el diseño de su circuito interno para capítulos posteriores.

1.4.1 Amplificación de señal

Es muy frecuente que cuando se recoge, se transforma una magnitud física en señal eléctrica analógica y se la somete a diferentes procesos, el nivel energético de la misma se va empobreciendo progresivamente, pudiendo llegar a niveles tan bajos que puede confundirse con el conjunto de perturbaciones (ruido generado por los mismos circuitos o ruido de agitación térmica, ruido industrial, ruido atmosférico, etc.) que se encuentra presente siempre en todo dispositivo. Para que ello no ocurra en alguna parte oportuna del proceso se debe restituir dicho nivel energético de la señal eléctrica que transporta a la información y en este caso hace falta producir su **amplificación**.

Por otra parte la amplificación es necesaria porque los transductores en general, al poseer bajos rendimientos de conversión (entre magnitudes físicas y señales eléctricas y viceversa), proporcionan señales que se consideran débiles, es decir, en el intervalo de los microvolts (μV) o los milivolts (mV) y poseen muy poca energía. En tales condiciones estas señales son demasiado débiles como para llevar a cabo un procesamiento confiable, el cual sería mucho más sencillo si la magnitud de la señal fuese mayor. El bloque funcional que cumple esa tarea es el **amplificador de señal** que debería cumplimentar un mecanismo de funcionamiento tal de forma de incrementar el nivel energético de la señal a amplificar sin modificar en absoluto la forma de señal de la misma.

Efectivamente, cuando se amplifique una señal debe tenerse cuidado que la información que la misma soporta no cambie y de que no se introduzca nueva información. Como veremos más adelante este último requisito demanda que dicho mecanismo tenga lugar sobre la base de una transferencia de característica lineal o en otras palabras que se demanda **linealidad** en los amplificadores. Esto es porque, cuando se excite, por ejemplo, con la señal mostrada en la figura 1.2 b) a la entrada de un amplificador, se desea que la señal de salida sea una reproducción a escala o réplica exacta de la de entrada, pero con una magnitud mayor, por supuesto. Cualquier cambio en la forma de señal a la salida comparada con la de entrada, se considera una **distorsión** y resulta indeseable.

1.4.2 Símbolo y mecanismo de la Amplificación

Lo común es que cuando se estudie a un amplificador se lo considere como un volumen cerrado con un par de terminales de entrada y otro par de terminales de salida. En la especialidad a dicho volumen cerrado se lo denomina cuadripolo y se simboliza tal como se indica en la figura 1.8 a). Mediante dicha simbología entonces se estudia a un amplificador como cuadripolo. A la señal eléctrica de entrada se la simboliza como la corriente y/o como la tensión en los terminales de entrada y a la señal de salida del mismo modo, pero ahora en el par de terminales de salida, y a dichas variables eléctricas se les asignan los sentidos de referencia que se han indicado. Es decir que en los cuadripolos se consideran positivas a las corrientes entrantes al mismo y se tratan como positivas a las tensiones que hacen superior o positivo al potencial del terminal superior respecto del inferior.

La señal eléctrica a amplificar, provista por la **Fuente de Excitación** debe ser volcada en los terminales de entrada del cuadripolo amplificador, y al mismo tiempo, una vez amplificada a dicha señal eléctrica ahora amplificada debe proporcionársela a otra parte del circuito que para el amplificador bajo estudio se interpretará como **circuito de carga**. En la figura 1.8 se muestra, de manera general que el amplificador tiene dos terminales de entrada que son distintos de los dos terminales de salida. Una situación más común se verá mas adelante, en la cual existe un terminal común entre el par de entrada y el par de salida del amplificador. Este terminal común se usa como punto de referencia y es denominado como tierra del circuito.

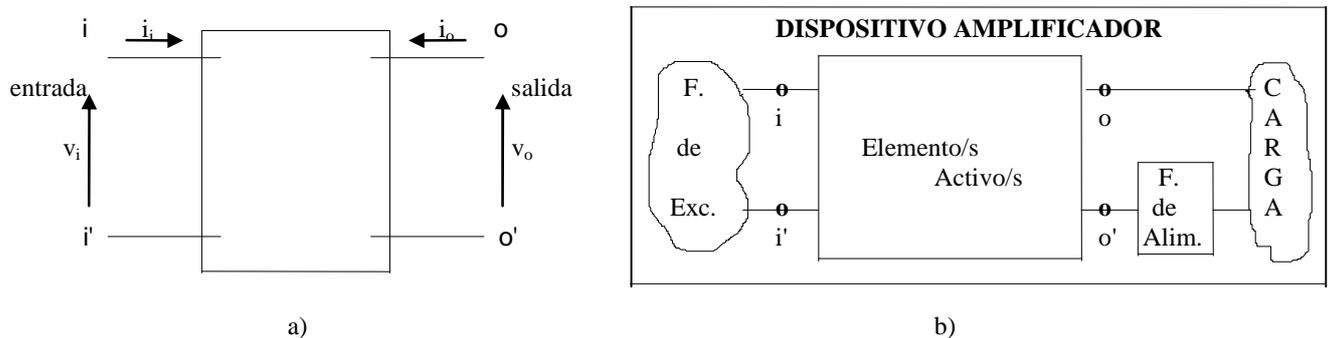


Figura. 1.8 El amplificador como cuadripolo

Además, como el objetivo es elevar el nivel de energía de la información, entonces debe haber también una **Fuente de Alimentación** desde donde extraer dicha energía eléctrica. Reunidas las partes descritas, a dicho conjunto dispuesto como la indica la Fig. 1.8 b) se lo reconoce como Dispositivo Amplificador.

En dicho dispositivo el mecanismo de la amplificación es un control, una regulación por parte del elemento amplificador incluido en el cuadripolo y según lo disponga la señal a amplificar provista por la Fuente de Excitación, del pasaje de energía eléctrica aportada por la Fuente de Alimentación desde ésta hacia la carga.

De acuerdo con ello, para que la amplificación sea posible, dentro del cuadripolo debe haber un elemento capaz de ejercer dicho control o regulación, y a los elementos de circuito electrónicos que se encuentran capacitados para tal fin se los reconoce como elementos activos, para diferenciarlos de un resistor, un condensador o un inductor (elementos pasivos) que no son capaces de amplificar. Además, en el caso de las señales analógicas este mecanismo debe producirse de modo que la señal amplificada que se entrega a la carga sea una reproducción a escala (idéntica forma) de la señal a amplificar que proporciona la fuente de excitación de manera de asegurar la integridad de la información.

Un amplificador que preserve las formas de señal que se introducen por la entrada, se caracteriza, entre otros parámetros, por la relación

$$v_o(t) = A_v \cdot v_i(t) \quad (1.4)$$

en donde v_i y v_o son las señales de entrada y salida, respectivamente, A_v es una constante que representa la magnitud de la amplificación de tensión, conocida como **ganancia de tensión del amplificador**. La ecuación (1.4) es una relación lineal; de allí que al amplificador se le conozca como **amplificador lineal**. De esto se desprende fácilmente que si la relación entre v_o y v_i contiene términos con potencias más elevadas de v_i , entonces la señal de salida v_o ya no será idéntica a la de entrada v_i . Se dice entonces que el amplificador muestra una **distorsión por alinealidad**.

Estos amplificadores que estamos considerando tienen como objetivo principal aceptar en su entrada señales extremadamente pequeñas y su comportamiento básico se centra en la amplificación de la magnitud de la señal; por ello es que se los considera como **amplificadores de tensión**. El **preamplificador** del sistema de audio estéreo doméstico es un ejemplo típico de un amplificador de tensión recién caracterizado. Sin embargo este dispositivo debe realizar otras funciones adicionales, sobre todo, suele aplicar cierta amplificación de refuerzo para bajos o agudos a gusto del usuario del mismo. No obstante lo precedente y por el momento ese tema quedará pendiente de analizar en otra ocasión.

Por ahora solo mencionaremos que existe otro tipo de amplificador llamado **amplificador de potencia** que a diferencia del anterior solo provee una muy pequeña amplificación de tensión pero una importante ganancia de corriente. Por lo tanto, mientras demanda muy poca potencia de la fuente de excitación de entrada este amplificador le entrega grandes cantidades de potencia de señal a la carga que tiene conectada. Volviendo al sistema de audio estéreo el amplificador de potencia es el encargado de suministrarle considerables valores de potencia a los parlantes que representan la carga del amplificador de potencia, tratándose como en la mayoría de los casos de un transductor receptor final de la información (en el ejemplo audio musical). En este caso un buen entendedor de música apreciaría aún más la necesidad de la linealidad ya que sin ella no se conservaría la pureza de las diferentes interpretaciones musicales exentas de distorsión (en vivo).

1.4.3 Ganancia o Amplificación de Tensión

Un amplificador lineal acepta una señal de entrada, $v_i(t)$, y proporciona una señal de salida, $v_o(t)$, que es una réplica amplificada de $v_i(t)$, mediante una resistencia de carga R_L tal como se muestra en la figura 1.9 a), la ganancia o amplificación de tensión se define como:

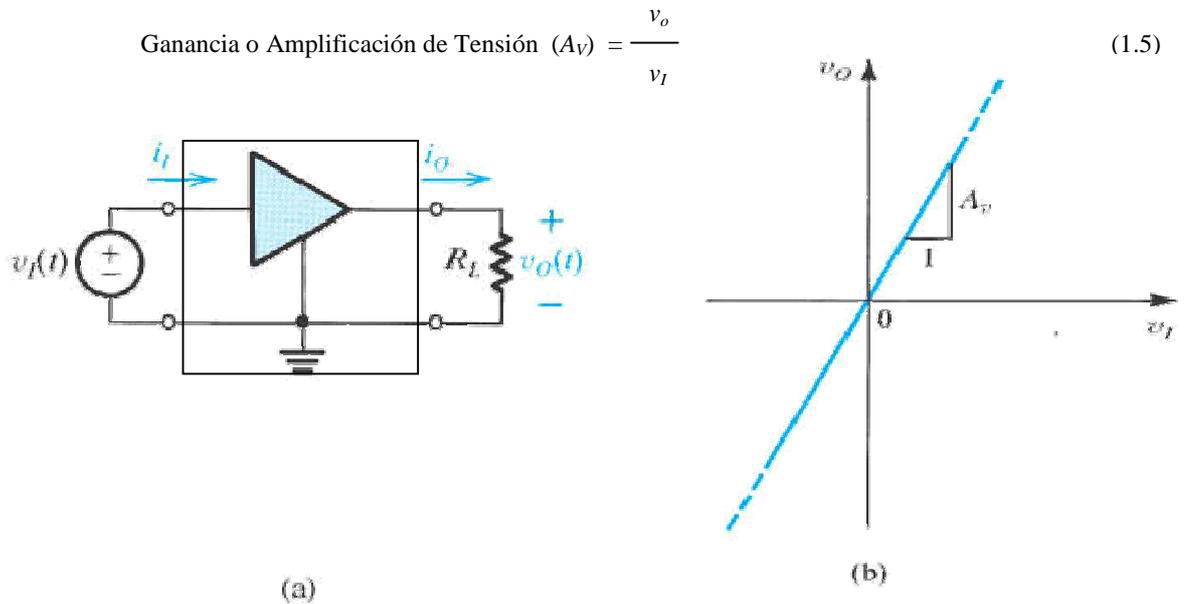


Figura 1.9 (a) Amplificador de tensión excitado con una señal $v_I(t)$ y conectado a una resistencia de carga R_L . (b) Característica de transferencia de un amplificador lineal de tensión con ganancia de tensión A_V .

En la figura 1.9 b) se muestra la característica de transferencia de un amplificador lineal. Si se aplica a la entrada de este amplificador una señal de excitación con forma senoidal de amplitud V_{max} , se obtiene en la salida otra forma de señal senoidal de amplitud $A_V \cdot V_{max}$ y de igual frecuencia. En cambio si la gráfica representativa de la transferencia fuese una correspondiente a una función matemática de orden superior, tal como una cuadrática por ejemplo, la señal de salida ya no conservaría la forma de señal senoidal por cuanto se introduciría distorsión por alinealidad. En este sentido se sugiere que el lector ejecute la grafica correspondiente a la composición ortogonal de una señal senoidal con una parábola.

1.4.4 Amplificación o Ganancia de Potencia, Amplificación de Corriente

Un amplificador aumenta la potencia de la señal, característica importante que distingue a un amplificador de cualquier componente pasivo, tal como el transformador. En el caso de un transformador, aunque la tensión que el mismo entregue a la carga pueda ser mayor que la tensión alimentada en el lado de la entrada (lado primario), la potencia entrega a la carga (del lado secundario del transformador) es menor, o al menos igual, que la potencia proporcionada por la fuente de señal. Por otra parte, un amplificador proporciona a la carga mayor potencia que la suministrada por la fuente de señal de excitación. Es decir, los amplificadores tienen ganancia de potencia. La amplificación o ganancia de potencia del amplificador de la figura 1.9 a) se define como

$$\text{Ganancia de potencia } (A_P) = \frac{\text{Potencia de carga } (P_S)}{\text{Potencia de entrada } (P_I)} \quad (1.6)$$

$$= \frac{v_O \cdot i_O}{v_I \cdot i_I} \quad (1.7)$$

donde i_o es la corriente que el amplificador entrega a la carga (R_L) $i_o = v_o / R_L$ e i_I es la corriente que el amplificador toma de la fuente de señal de excitación. La ganancia o amplificación de corriente del amplificador se define como

$$\text{Ganancia o Amplificación de Corriente } (A_I) = \frac{i_o}{i_I} \quad (1.8)$$

$$\text{De las ecuaciones (1.5) a (1.8) observamos que } A_P = A_V \cdot A_I \quad (1.9)$$

1.4.5 Expresión de la ganancia en decibele

En la especialidad es muy común que se deba operar con magnitudes o muy grandes (que deben ser expresadas con muchas cifras significativas) o extremadamente pequeñas y con muchas cifras decimales. Para facilitar tales operaciones fue definida una unidad logarítmica cuyo nombre se debe a un ingeniero de muy amplia trayectoria en la electrónica

$$Bell = \log \frac{P_2}{P_1}$$

como para algunas aplicaciones se trata de una unidad no tan apropiada, un submúltiplo que se usa mas frecuentemente es la décima parte del Bell, denominada deciBell que entonces se determina como

$$deciBell \text{ (dB)} = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

y en tanto que la potencia eléctrica puede expresarse en función del cuadrado de la tensión o en función del cuadrado de la corriente, también se interpreta al *deciBell* como

$$deciBell \text{ (dB)} = 20 \cdot \log \frac{V_2}{V_1} \qquad deciBell \text{ (dB)} = 20 \cdot \log \frac{I_2}{I_1}$$

En consecuencia, la ganancia o amplificación de tensión expresada en deciBell resulta:

$$\text{Ganancia de tensión en decibele} = 20 \cdot \log |A_V| \text{ dB}$$

en tanto que la ganancia o amplificación de corriente resulta

$$\text{Ganancia de corriente en decibele} = 20 \cdot \log |A_I| \text{ dB}$$

y la ganancia de potencia como

$$\text{Ganancia de potencia en decibele} = 10 \cdot \log A_P \text{ dB}$$

Se utilizan valores absolutos para las ganancias de tensión y de corriente ya que en algunos casos A_V o A_I podrían ser números negativos. Una ganancia negativa de A_V simplemente significa que hay una diferencia de fase de 180° entre las tensiones de entrada y salida; no indica que el amplificador esté atenuando a la señal. Por otra parte, un amplificador cuya ganancia de tensión sea por ejemplo, -20 dB, realmente esta atenuando a la señal de entrada en un factor de 10 (es decir que $A_V = 0,1$ V/V).

1.4.6 Fuentes de alimentación del amplificador

Debido a que la potencia entregada a la carga de un amplificador debe ser mayor de la suministrada u obtenida a partir de la fuente de señal de excitación, resulta interesante preguntarse cuál es la fuente de esta potencia adicional. La respuesta la obtenemos si volvemos a reflexionar sobre el mecanismo de la amplificación ya descrito, al observar que todos los amplificadores necesitan suministro de potencia de C.C. para su operación, por ello siempre deben incluir a la que hemos llamado **Fuente de alimentación** del amplificador. Estas fuentes proporcionan la potencia adicional entregada a la carga, además de cualquier potencia que se disipe en el circuito interno del amplificador (esa potencia se convierte en calor). En la figura 1.9 a) no se han mostrado explícitamente estas fuentes de C.C.

En la figura 1.10 a) se muestra un amplificador que requiere dos fuentes de C.C.: una positiva de valor V_1 y una negativa de valor V_2 . El amplificador tiene dos terminales, etiquetados V^+ y V^- para la conexión de las fuentes de C.C.. Para que el amplificador funcione, el terminal etiquetado V^+ tiene que conectarse al lado de polaridad positiva de la fuente de C.C. cuyo voltaje es V_1 y cuyo lado negativo está conectado a la tierra del circuito. Además, el terminal etiquetado V^- tiene que estar conectado al lado de polaridad negativa de la fuente cuyo voltaje es V_2 y cuyo lado positivo está conectado a la tierra del circuito.

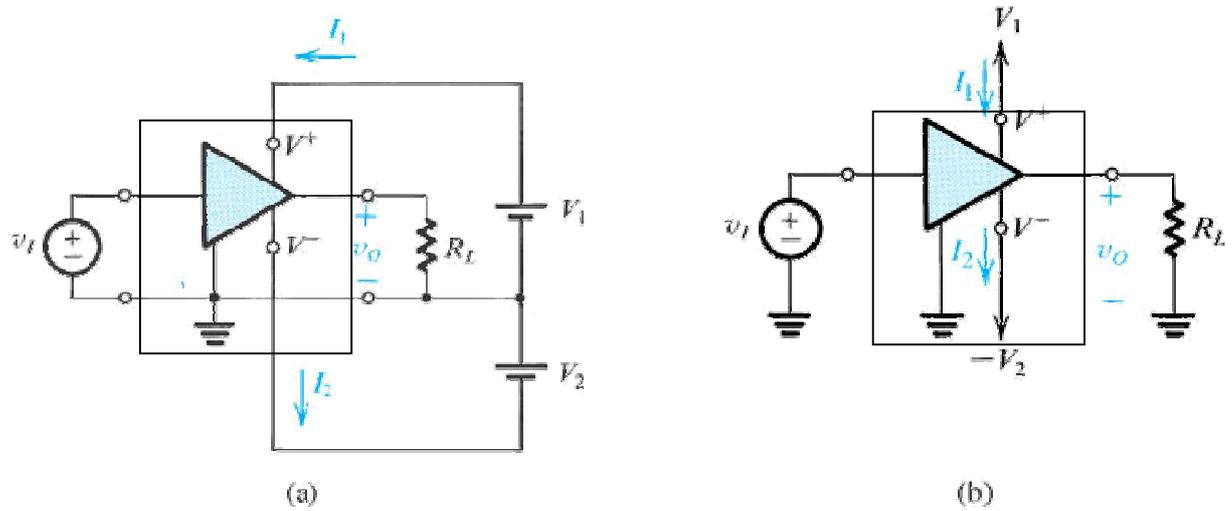


Figura 1.10 Amplificador que requiere dos Fuentes de alimentación de C.C. (mostradas como baterías)

Ahora bien, si la corriente obtenida de la fuente positiva es I_1 y la de la fuente negativa es I_2 (véase la figura 1.10 a), entonces la potencia entregada por la fuente de alimentación al amplificador es

$$P_{cc} = V_1 \cdot I_1 + V_2 \cdot I_2$$

Si la potencia disipada en el circuito del amplificador se denota P_{dis} la ecuación de balance de potencia del amplificador se escribiría como

$$P_{cc} + P_I = P_S + P_{dis}$$

donde P_I es la potencia obtenida de la fuente de excitación de señal y P_S es la potencia de salida entregada por el amplificador a la carga. Debido a que la potencia obtenida de la fuente de excitación de señal suele ser pequeña, el rendimiento de conversión de potencia (de potencia de C.C. a potencia de señal) o eficiencia del amplificador se define como

$$\eta = \frac{P_S}{P_{cc}} \cdot 100 (\%) \quad (1.10)$$

La eficiencia η es un parámetro de desempeño importante para aquellos amplificadores que manejan grandes cantidades de potencia. Éstos, llamados amplificadores de potencia son los amplificadores que hemos mencionado en el párrafo final de la sección 1.4.2 precedente.

Con el fin de simplificar los diagramas de circuito se debe adoptar la convención ilustrada en la figura 1.10 b). Aquí el terminal V^+ se muestra conectado a una punta de flecha que señala hacia arriba y el terminal V^- a una punta de flecha que señala hacia abajo. La tensión de alimentación correspondiente se indica junto a cada punta de flecha. Tome en cuenta que en muchos casos no se muestra explícitamente la conexión del amplificador a las fuentes de alimentación. Por último, tome nota también de que algunos amplificadores sólo requieren una única fuente de alimentación.

EJEMPLO 1.1

Imagine un amplificador que funciona con fuente de alimentación simétrica (o también llamada fuente partida) de 10 V con ambas polaridades. El mismo es excitado por una fuente de señal senoidal de 1 V de valor de pico o máximo y entrega a la salida una señal también senoidal (se trata de un amplificador lineal) con un valor de pico de 9 V sobre una resistencia de carga de 1 K Ω . El amplificador consume una corriente de 9,5 mA de cada una de las dos fuentes de 10 V de alimentación. La corriente de entrada del amplificador es senoidal con un pico de 0,1 mA. Encuentre la ganancia de tensión, la ganancia

de corriente, la ganancia de potencia, la potencia consumida de las fuentes de alimentación de C.C., la potencia disipada en el amplificador y el rendimiento de conversión de potencia del mismo.

Solución

$$A_V = \frac{9}{1} = 9 \text{ V/V}$$

o

$$A_V = 20 \cdot \log 9 = 19,1 \text{ dB}$$

el pico de la corriente en la carga es:

$$I_{omax} = \frac{9 \text{ V}}{10^3 \Omega} = 9 \text{ mA}$$

y la ganancia de corriente

$$A_I = \frac{I_{omax}}{I_{Imax}} = \frac{9}{0,1} = 90 \text{ A/A}$$

o

$$A_I = 20 \cdot \log 90 = 39,1 \text{ dB}$$

$$P_S = V_o \cdot I_o = \frac{V_{omax}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{omax}}{\sqrt{2}} = \frac{9 \cdot 9}{2} = 40,5 \text{ mW}$$

$$P_I = V_I \cdot I_I = \frac{V_{Imax}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{Imax}}{\sqrt{2}} = \frac{1 \cdot 0,1}{2} = 0,05 \text{ mW}$$

$$A_P = \frac{P_S}{P_I} = \frac{40,5}{0,05} = 810 \text{ W/W}$$

o

$$A_P = 10 \cdot \log 810 = 29,1 \text{ dB}$$

$$P_{cc} = 10 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 9,5 \cdot 10^{-3} = 190 \text{ mW}$$

$$P_{dis} = P_{cc} + P_I - P_S$$

$$= 190 + 0,05 - 40,5 = 149,6 \text{ mW}$$

$$\eta = \frac{P_S}{P_{cc}} \cdot 100 = \frac{40,5}{190} \cdot 100 = 21,3 \text{ (\%)}$$

En el ejemplo anterior se observa que el amplificador convierte parte de la potencia que le suministran las Fuentes de alimentación en potencia de señal que el mismo le entrega a la carga.

1.4.7 Saturación del amplificador

Si se habla en términos prácticos, la característica de transferencia del amplificador sólo sigue siendo lineal en un intervalo limitado de tensiones de excitación de entrada y de salida del amplificador. En el caso de un amplificador alimentado a partir de dos fuentes de alimentación de C.C., la tensión de salida no puede exceder un límite positivo ni estar por debajo de un límite negativo especificados y lógicamente inferiores a los voltajes de las fuentes de alimentación. Así, la característica de transferencia resultante se muestra en la figura 1.11, con los niveles de saturación positivos y negativos indicados como

L_+ y L_- , respectivamente. Cada uno de los dos niveles de saturación suele encontrarse 1 o 2 volt, aproximadamente, por debajo de las tensiones de las fuentes de alimentación.

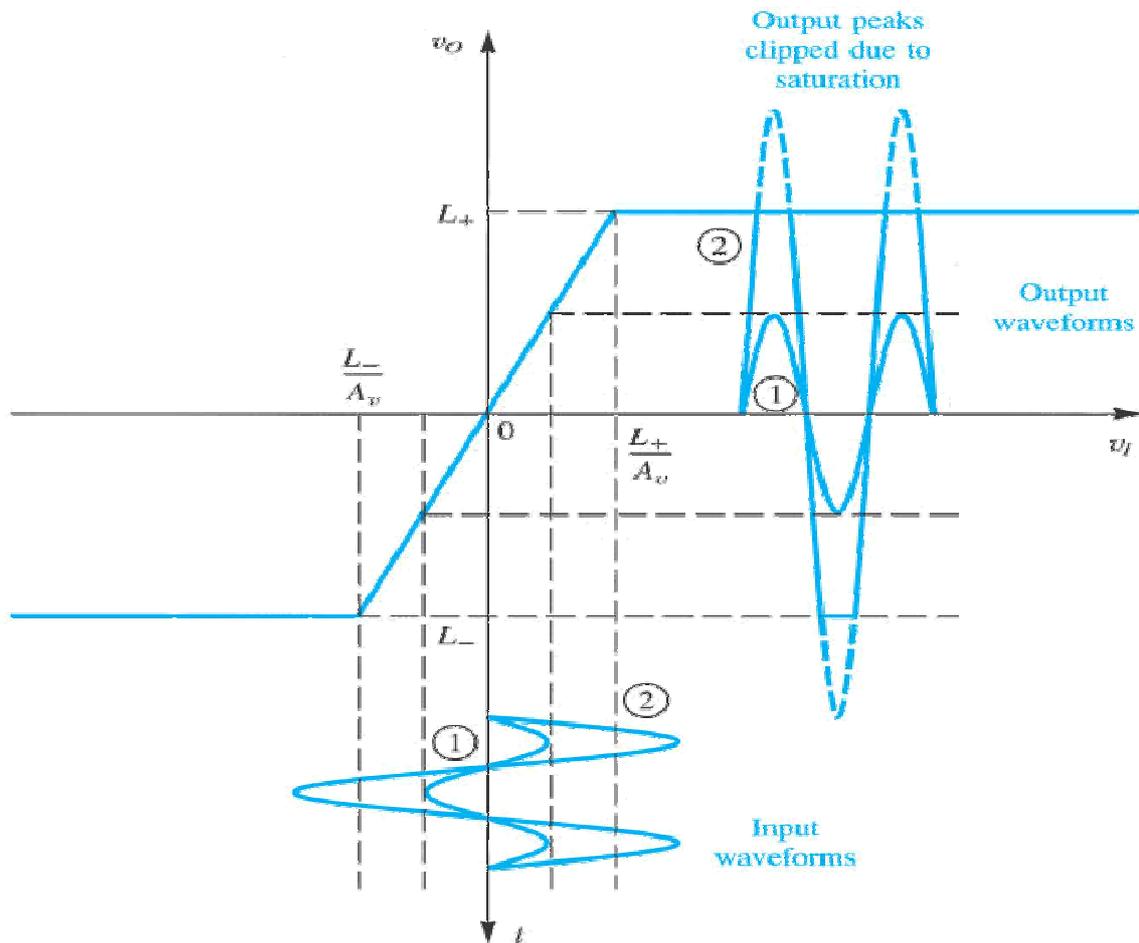


Figura 1.11 .Característica de transferencia de un amplificador que es lineal solo hasta el nivel de saturación en la salida

Obviamente, para evitar la distorsión de la forma de señal en la salida, la señal senoidal de excitación presente en la entrada del amplificador se debe mantenerse dentro del intervalo lineal de operación

$$\frac{L_+}{A_v} < v_I < \frac{L_-}{A_v}$$

En la figura 1.11 se muestran dos señales senoidales de entrada, etiquetadas como (1) y (2) y las correspondientes señales de salida. Se observa que mientras la señal (1) en la salida también respeta la forma de señal senoidal, la señal (2) en la salida presenta los picos recortados debido a la saturación del amplificador, dejando de ser ya una señal senoidal. Imaginemos este efecto no buscado, presente en el amplificador de audio estéreo con una señal musical sobre los parlantes.

1.4.8 Características de transferencia no lineal y punto de operación

Con excepción del efecto de saturación de salida analizado antes, se ha dado por hecho que las características de transferencia del amplificador son perfectamente lineales. En los amplificadores prácticos la característica de transferencia puede mostrar falta de linealidad de varias magnitudes, dependiendo de la complejidad del circuito del amplificador y de la

cantidad de esfuerzo que se ha dedicado al diseño para asegurar la operación lineal. Como ejemplo, imagine la característica de transferencia descrita en la figura 1.12, que es típica de los amplificadores simples alimentados mediante una única fuente de alimentación (de polaridad positiva). La característica de transferencia es obviamente no lineal y, debido a que se alimenta con una única fuente, no está centrada alrededor del origen (existe componente de C.C. en la salida). Afortunadamente existe una técnica simple para obtener amplificación lineal a partir de un amplificador de transferencia no lineal.

La técnica consiste en **polarizar** primero al circuito para que opere en un punto cercano a la mitad de la característica de transferencia. Esto se logra aplicando un potencial de C.C. (estático, ya que no varía en el tiempo), V_I superpuesto con la misma señal de excitación en la entrada del amplificador, tal como se muestra en la figura 1.12, en donde el punto de operación originado por dicha componente estática, etiquetado como punto Q , se denomina **punto de trabajo estático** o **punto Q** y a la correspondiente tensión de C.C. o estática de salida la individualizamos como V_Q . Entonces se superpone la componente dinámica de la tensión de excitación $v_i(t)$, a la componente estática V_I , como se indica en la figura 1.12. Ahora bien, como la tensión de entrada instantánea o valor total de la tensión de excitación $v_I(t)$,

$$v_I(t) = V_I + v_i(t)$$

varía alrededor de V_I , el punto de operación instantáneo, ahora llamado dinámico, se mueve por la curva de transferencia hacia arriba y hacia abajo alrededor del punto de operación estático Q .

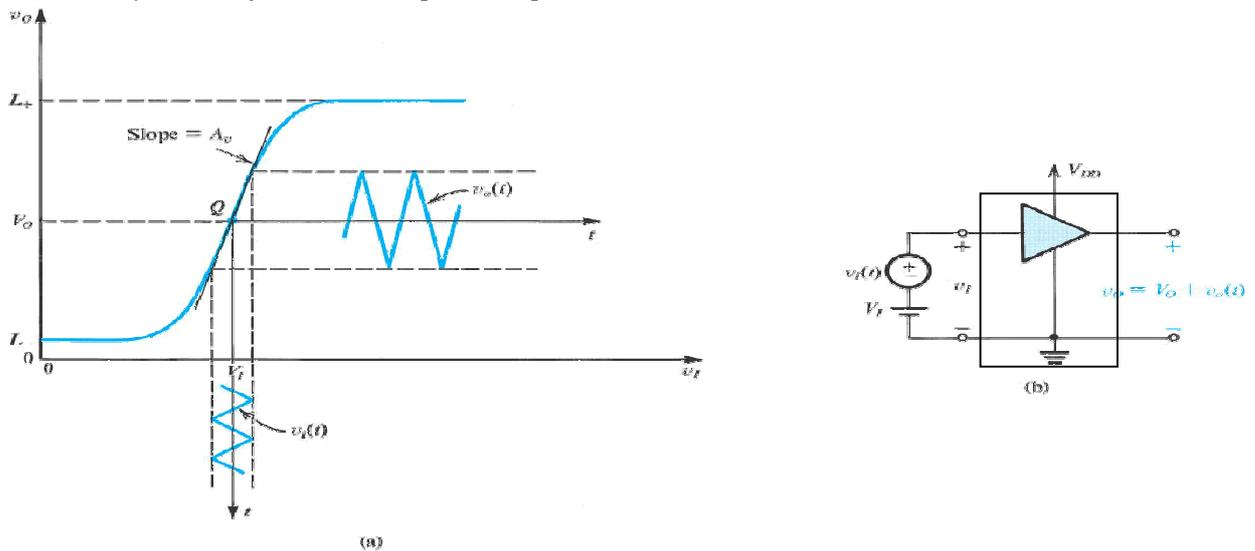


Figura 1.12 (a) Característica de un amplificador que muestra una considerable alinealidad. (b) Para obtener una operación lineal se polariza al amplificador, como se muestra, y se lo excita con una pequeña señal. Observe que este amplificador se alimenta con una fuente de C.C. simple, V_{DD} .

De esta manera, puede determinarse la forma de señal de la tensión instantánea o total de salida $v_o(t)$. Se puede observar que al mantener la amplitud de $v_i(t)$ lo suficientemente pequeña, el punto de operación dinámico puede confinarse solo a un trozo de curva o segmento casi lineal de la curva de transferencia centrada alrededor de Q . Esto, a su vez, arroja como resultado que la parte que varía con el tiempo, es decir la componente dinámica de salida sea proporcional a $v_i(t)$; es decir,

$$v_o(t) = V_Q + v_o(t)$$

con

$$v_o(t) = A_V v_i(t)$$

donde A_V es la pendiente del segmento casi lineal de la curva de transferencia. Entonces solo si dicho segmento es del todo lineal, dicha ganancia de tensión es una constante que se debe interpretar como la pendiente de la recta tangente a la curva en el punto de operación estático Q ; es decir

$$A_V = \left. \frac{dv_o}{dv_I} \right|_{en\ Q}$$

De esta manera se logra la amplificación lineal. Por supuesto, hay una limitación; la señal de entrada debe mantenerse suficientemente pequeña: el aumento de la amplitud de la señal de excitación o de entrada puede causar que la operación ya no esté restringida a un segmento casi lineal de la curva de transferencia. Esto, a su vez, arroja como resultado una forma de señal de salida distorsionada. Esta distorsión por alinealidad es indeseable: la señal de salida contiene información espuria adicional que no es parte de la entrada y se podría describir con el conjunto armónico de la serie de Fourier. En el contenido de este libro se usará con frecuencia esta técnica de polarización y la aproximación segmento lineal de la transferencia (posibilitada por la **pequeña señal de entrada**) asociada en el diseño de amplificadores de transistores.

EJEMPLO 1.2

Un amplificador de transistores posee una característica de transferencia definida por la función

$$v_o = 10 - 10^{11} e^{-40 v_i} \quad (1.11)$$

que se aplica para $v_i > 0$ V y $v_o > 0,3$ V. Encuentre los límites L_+ y L_- y los valores correspondientes de v_i . Además encuentre el valor de la tensión de polarización o de C.C., V_I , que produce $V_Q = 5$ V y la correspondiente ganancia de tensión para dicho punto de polarización.

Solución

El límite L_- es obviamente 0,3 V. El valor correspondiente de v_i se obtiene de sustituir $v_o = 0,3$ V en la ecuación (1.11); es decir

$$v_i = 0,690 \text{ V}$$

El límite L_+ está determinado por $v_i = 0$ V y está dado por

$$L_+ = 10 + 10^{11} = 10 \text{ V}$$

Para polarizar al dispositivo de modo que $V_Q = 5$ V, se necesita una entrada de C.C., V_I , cuyo valor se obtiene al sustituir $v_o = 5$ V en la ecuación (1.11) para encontrar:

$$v_i = 0,673 \text{ V}$$

La ganancia de tensión en el punto de operación estático se obtiene al derivar la ecuación (1.11) respecto de v_i (dv_o/dv_i) y determinar su valor para $v_i = 0,673$ V, cuyo resultado es

$$A_V = -200 \text{ V/V}$$

que indica que el amplificador es un inversor, es decir, que la tensión de salida está desfasada 180° con respecto a la tensión de entrada. Un bosquejo de la característica de transferencia del amplificador (que no está dibujada en escala) se muestra en la figura 1.13, a partir de la cual se observa la naturaleza inversora del amplificador

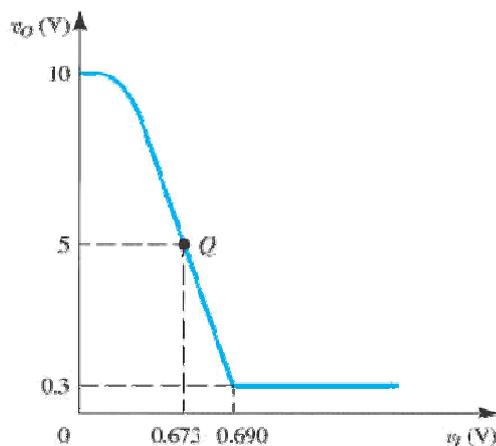


Figura 1.13 Bosquejo de la característica de transferencia del amplificador del ejemplo 1.2. Observe que este amplificador está invirtiendo a la señal (es decir presenta una ganancia de tensión negativa)

Una vez que un amplificador está apropiadamente polarizado y que la señal de entrada se mantiene lo suficientemente pequeña, se supone que su operación es lineal. Por lo tanto es posible emplear los métodos y las técnicas de análisis de circuitos lineales para estudiar la operación dinámica o de señal del circuito amplificador. Este tema es el que se describe en las secciones 1.5 y 1.6 del presente Capítulo.

1.4.9 Convenciones en el uso de símbolos

En este punto es necesario reclamar la atención del lector con la finalidad de que repare en la terminología y simbología que se viene utilizando en esta introducción y que posteriormente se empleará en todo el libro. Las cantidades instantáneas totales o valores totales se denotarán con un símbolo (o letra) escrito en minúsculas y con un subíndice en mayúsculas, como en los casos de $i_A(t)$ ó $v_C(t)$. Las cantidades de C.C., o que hemos llamado componentes estáticas (porque no se modifican con el tiempo), se indicarán con un símbolo (o letra) en mayúsculas y un subíndice también en mayúsculas, como I_A ó V_C . Las tensiones provistas por las fuentes de alimentación de C.C. se indicarán con una letra V mayúscula con un subíndice de dos letras también en mayúsculas, tal como en V_{DD} . Una notación similar se utilizará para la corriente de C.C. suministrada por la fuente de alimentación, por ejemplo I_{DD} . Por último las cantidades incrementales o de señales o de componentes dinámicas, en lo que respecta a su valor instantáneo serán expresadas mediante un símbolo (o letra) en minúsculas con un subíndice también en minúsculas, tal como $i_a(t)$, $v_c(t)$. Para el caso de las señales sus valores característicos serán referenciados con un símbolo (o letra) en mayúsculas y algún subíndice en minúsculas, de tal manera que el valor eficaz de la señal se indicará como I_a ó V_c (sin otra aclaración), en tanto que para el valor máximo se usará $I_{a,max}$ ó $V_{c,max}$ y si se requiriera denotar a algún valor medio: I_{aav} ó V_{cav} . En parte, esta notación, para el caso de una señal senoidal, se aprecia en la figura 1.14

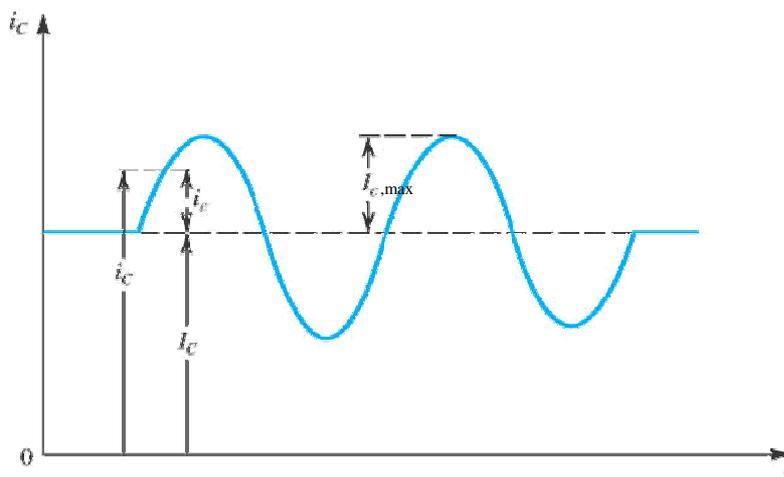


Figure 1.14 Convención para el uso de la Simbología utilizada en todo el libro

EJERCICIOS

- 1.8 Un amplificador tiene una ganancia de tensión de 100 V/V y una ganancia de corriente de 1000 A/A. Expresé ambas ganancias en decibeles y encuentre la ganancia de potencia.
Resp. 40 dB; 60 dB; 50 dB
- 1.9 Un amplificador que opera con una sola fuente de alimentación de +15 V proporciona una señal de onda senoidal de pico a pico de 12 V a una carga de 1 K Ω y le demanda una corriente de entrada mínima o despreciable a la fuente de excitación. La corriente de C.C. consumida de la fuente de alimentación de +15 V es de 8 mA. ¿Cuál es la potencia disipada en el amplificador y cuál es la eficiencia del mismo?
Resp. 102 mW; 15 %
- 1.10 El objetivo de este ejercicio es investigar la limitación de la aproximación de pequeña señal. Considere que el amplificador del ejemplo 1.2 tiene una señal de entrada positiva de 1 mV superpuesta a la tensión de polarización V_I . Encuentre la señal correspondiente a la salida para dos situaciones: a) Suponga que el amplificador es lineal alrededor del punto de operación estático Q ; es decir, use el valor de ganancia evaluado en el ejemplo 1.2. b) Use la característica de transferencia del amplificador. Repita las determinaciones para señales de entrada de 5 y 10 mV.
Resp. -0,2 V ; -0,204 V ; -1 V ; -1,107 V ; -2 V ; -2,459 V

1.5 MODELOS DE CIRCUITOS PARA AMPLIFICADORES

Una buena parte de este libro se relaciona con el diseño de circuitos amplificadores empleando distintos y variados tipos de transistores. La complejidad de estos circuitos va desde los que utilizan tan solo un componente activo, tal como un transistor, hasta los que se encuentran constituidos por 20 o más componentes activos similares. Para interpretar el circuito amplificador resultante como un bloque de construcción en un sistema, debe tenerse la capacidad de caracterizar, o **modelar**, el comportamiento del mismo, desde sus pares de terminales de entrada y salida. En esta sección se estudian modelos o circuitos equivalentes de amplificadores simples pero efectivos. Los valores de los parámetros constitutivos de dichos modelos se encontrarán si se analiza el circuito real o físico del amplificador o si se realizan las mediciones en dichos pares de terminales del amplificador.

1.5.1 Amplificadores de tensión

En la figura 1.15 a) se muestra el modelo de un circuito equivalente para el amplificador de tensión. El modelo está integrado por una fuente de tensión controlada o también llamada transmisora, que posee como parámetro de control a un factor de ganancia A_v (notar el subíndice en letra minúsculas), una resistencia de entrada R_i , que es responsable del hecho de que el amplificador determina la relación tensión/corriente en ese par de terminales del amplificador, y una resistencia de salida R_o , que es responsable del cambio de la tensión de salida cuando se le pide al amplificador que proporcione corriente de salida hacia la carga.

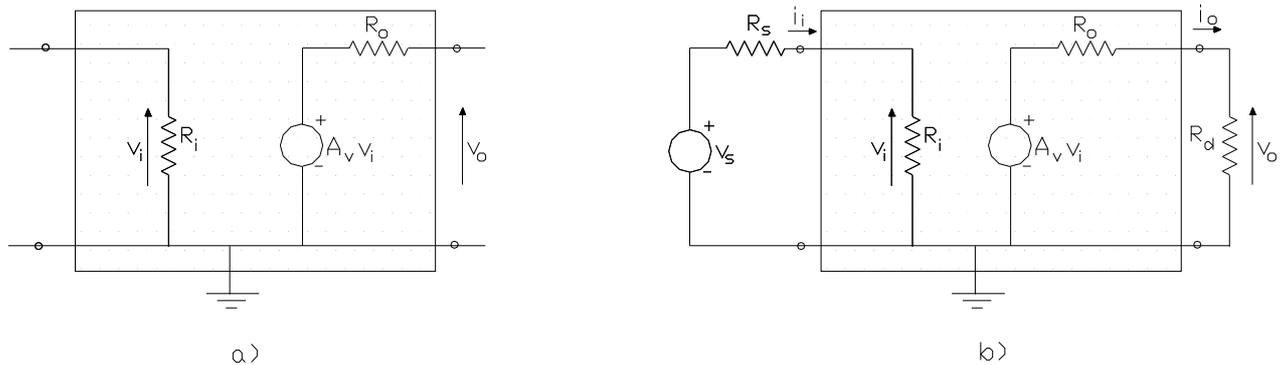


Figura 1.15 (a) Circuito equivalente para el amplificador de tensión. (b) El amplificador de tensión con una fuente de excitación de señal en la entrada y con una resistencia de carga en la salida.

Para ser específicos, en la figura 1.15 b) se muestra el modelo equivalente del amplificador de tensión excitado con una fuente de señal tipo Thévenin v_s que tiene una resistencia interna R_s y conectada a la salida una resistencia dinámica de carga R_d . La resistencia de salida R_o diferente de cero, hace que sólo una fracción de la tensión controlada por el generador transmisor $A_v v_i$ aparezca en la salida sobre la resistencia de carga R_d . Entonces, empleando la regla del divisor de tensión se obtiene

$$v_o = A_v v_i \frac{R_d}{R_d + R_o}$$

Por lo que, la ganancia de tensión está dada por

$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = A_v \frac{R_d}{R_d + R_o} \quad (1.12)$$

de lo que se desprende que la ganancia de tensión descrita como A_v resulta ser la **ganancia de tensión del amplificador con la salida a circuito abierto** para la señal (lo mismo que la A_v pero medida bajo la condición de R_d de valor infinito).

De acuerdo con la expresión (1.12) se comprueba que para no perder ganancia al acoplar la salida del amplificador a la carga, la resistencia de salida R_o del amplificador debe ser mucho menor que la resistencia de carga R_d . En otras palabras, para una dada R_d debe diseñarse el amplificador de modo tal que su R_o sea mucho menor que su R_d . Más aún, hay aplicaciones en que se sabe que R_d varía en un cierto intervalo determinado y entonces para mantener a la tensión de salida v_o lo más constante posible, debe diseñarse al amplificador con un R_o de valor mucho más pequeño que el valor más bajo de R_d . Un amplificador ideal de tensión es aquel en que $R_o = 0$.

Tal como ya se destacó, la ecuación (1.12) expresa también que para $R_d = \text{infinito}$: $A_v = A_v$. También debe quedar claro que al especificar una ganancia de tensión de algún amplificador, también debe especificarse el valor de la resistencia de carga para la cual se mide o se calcula dicha ganancia. Asimismo, si se especifica una dada ganancia y no se aclara bajo que condiciones de carga fue medida o calculada, debe suponerse que se trata de una ganancia de tensión con la salida a circuito abierto A_v .

La resistencia de entrada R_i finita introduce otra acción de división de tensión derivada del divisor resistivo conformado por las resistencias R_S y R_i , determinando que solo una fracción de la señal provista por la fuente de excitación independiente de tensión v_s alcance realmente el par de terminales de entrada del amplificador, es decir,

$$v_i = v_s \frac{R_i}{R_i + R_S} \quad (1.13)$$

De esto se desprende que, para no perder una parte importante de la tensión de señal de entrada al acoplar la fuente de excitación de señal con la entrada del amplificador, éste debe diseñarse de modo que tenga una resistencia de entrada R_i mucho mayor que la resistencia interna de la fuente de excitación de señal R_S ($R_i \gg R_S$). Más aún, hay aplicaciones en que se sabe que la resistencia de la fuente de excitación varía en cierto intervalo. Para minimizar el efecto de esta variación en el valor de la señal que aparece en la entrada del amplificador, el diseñador se debe asegurar que la resistencia de entrada que diseñe sea mucho mayor que el valor más elevado de R_S . Un amplificador ideal de tensión es aquel que presenta una resistencia de entrada de valor infinito ($R_i = \text{infinito}$). En este caso tanto la ganancia de corriente como la ganancia de potencia resultan también infinito.

La ganancia de tensión referida a la fuente ideal de excitación de tensión, que llamaremos A_{V_S} , definida como (v_o/v_s) se encuentra al combinar las ecuaciones (1.12) y (1.13),

$$A_{V_S} = \frac{v_o}{v_s} = A_v \frac{R_d}{R_d + R_o} \frac{R_i}{R_i + R_S}$$

Hay situaciones en que no se está interesado en la ganancia de tensión sino sólo en una ganancia de potencia importante. Por ejemplo, la señal de origen puede tener un voltaje respetable pero una resistencia de fuente mucho mayor que la de la carga. De conectar la fuente directamente a la carga se obtendría una atenuación de señal importante. En este caso se requiere un amplificador con una resistencia de entrada elevada (mucho mayor que la resistencia de la fuente de excitación) y una resistencia de salida baja (mucho menor que la resistencia de la carga) pero con una ganancia de tensión modesta (o incluso igual a la unidad). A este tipo de amplificador se lo denomina amplificador separador o *buffer*. Encontraremos con frecuencia este tipo de amplificador en todo el libro.

EJERCICIOS

- 1.11 Se tiene un transductor, caracterizado por proveer una tensión de señal de 1 V eficaz y poseer una resistencia interna de 1 M Ω , para activar una carga de 10 Ω . Si se conectaran directamente, ¿Qué niveles de tensión y de potencia se obtendrían en la carga? Si un amplificador separador o buffer de ganancia unitaria (es decir $A_{V_S} = 1$), con una resistencia de entrada de 1 M Ω y una resistencia de salida de 10 Ω se interpone entre la fuente de excitación y la carga ¿Qué niveles de tensión y de potencia se obtiene en la salida? Para el nuevo diseño, encuentre la ganancia de tensión referida a la fuente ideal de excitación de tensión y la ganancia de potencia (ambas expresadas en deciBeles).
Resp. 10 μ V eficaces; 10⁻¹¹ W ; 0,25 V ; 6,25 μ W ; -12 dB ; 44dB.
- 1.12 Se ha encontrado que la tensión de salida de un amplificador de tensión disminuye 20 % cuando está conectado a una resistencia de carga de 1 KW. ¿Cuál es el valor de la resistencia de salida del amplificador?
Resp. 250 Ω .

1.13 Se utiliza un amplificador con una ganancia de tensión de 40 dB, una resistencia de entrada de $10\text{ K}\Omega$ y una de salida de $1\text{ K}\Omega$ para activar una carga de $1\text{ K}\Omega$. ¿Cuál es el valor de A_v ? Encuentre el valor de la ganancia de potencia en decibeles.

Resp. 100 V/V; 44 dB

1.5.2 Amplificadores en cascada

Para cumplir con ciertas especificaciones de amplificación a menudo surge la necesidad de diseñar un amplificador en cascada de dos o más etapas. Éstas no siempre son idénticas; a menudo cada una está diseñada para un propósito específico. Por ejemplo, tal vez se necesite que la primera etapa tenga una resistencia de entrada elevada, y la etapa final en la cascada suele diseñarse para tener una resistencia de salida baja. Con el fin de ilustrar el análisis y diseño de los amplificadores en cascada, considere un ejemplo especial.

EJEMPLO 1.3

En la figura 1.16 se muestra un amplificador compuesto de una cascada de tres etapas. El amplificador es excitado por una fuente de tensión señal $100\text{ K}\Omega$ de resistencia interna y entrega la información amplificada a una resistencia de carga de $100\ \Omega$. La primera etapa presenta una resistencia de entrada relativamente elevada y un modesto factor de ganancia de 10. La segunda etapa tiene un factor de ganancia más elevado pero una resistencia de entrada menor. Por último, la etapa final, o salida, tiene una ganancia igual a la unidad pero una resistencia de salida baja. Se desea evaluar la ganancia de tensión total del sistema amplificador de tres etapas (es decir v_{o3}/v_s), la ganancia de corriente y la ganancia de potencia.

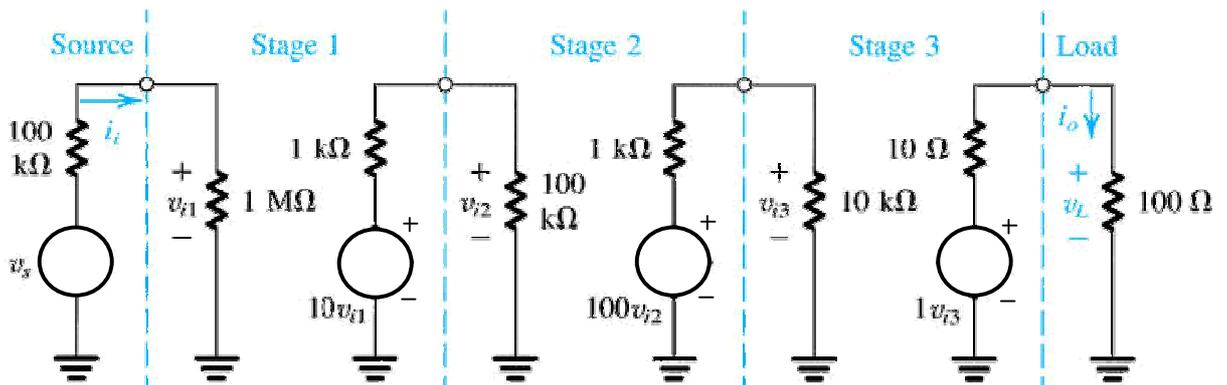


Figure 1.16 Amplificador de tres etapas para el ejemplo 1.3

Solución

La fracción de la señal de la fuente de excitación que aparece en los terminales de entrada del amplificador se obtiene al usar la regla del divisor de tensión en la entrada, como sigue:

$$\frac{v_{i1}}{v_s} = \frac{1\text{ M}\Omega}{1\text{ M}\Omega + 100\text{ K}\Omega} = 0,909\text{ V/V}$$

La ganancia de tensión de la primera etapa se obtiene al considerar que la resistencia de entrada de la segunda etapa habrá de ser la carga de la primera etapa; es decir,

$$A_{v1} = \frac{v_{i2}}{v_{i1}} = 10 \frac{100\text{ K}\Omega}{100\text{ K}\Omega + 1\text{ K}\Omega} = 9,9\text{ V/V}$$

De igual manera, la ganancia de tensión de la segunda etapa se obtiene al considerar que la resistencia de entrada de la tercera etapa habrá de ser la carga de la segunda etapa,

$$A_{V2} = \frac{v_{i3}}{v_{i2}} = 100 \frac{10 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega + 1 \text{ K}\Omega} = 90,9 \text{ V/V}$$

Por último, la ganancia de tensión de la etapa de salida es la que sigue:

$$A_{V3} = \frac{v_{o3}}{v_{i3}} = 1 \frac{100 \Omega}{100 \Omega + 10 \Omega} = 0,909 \text{ V/V}$$

Ahora puede encontrarse la ganancia de tensión total de las tres etapas en cascada a partir de

$$A_{Vtot} = A_{V3} A_{V2} A_{V1} = 818 \text{ V/V}$$

o sea 58,3 dB

Para encontrar la ganancia de tensión total referida a la fuente de excitación de tensión ideal, se multiplica la A_{Vtot} por el factor de atenuación debido al divisor de tensión de la entrada; o sea,

$$A_{Vstot} = 818 \cdot 0,909 = 743,6 \text{ V/V}$$

o 57,4 dB.

La ganancia de corriente se encuentra de la siguiente manera:

$$A_I = \frac{i_o}{i_i} = \frac{(v_{o3} / 100 \Omega)}{(v_{i1} / 1 \text{ M}\Omega)} = 8,18 \cdot 10^6 \text{ A/A}$$

o 138,3 dB

La ganancia de potencia se encuentra de

$$A_P = \frac{P_S}{P_I} = \frac{v_{o3} i_o}{v_{i1} i_i} = A_{Vtot} A_I = 818 \cdot 8,18 \cdot 10^6 = 66,9 \cdot 10^8 \text{ W/W}$$

o 98,3 dB. Tome nota de que

$$A_P \text{ (dB)} = 0,5 [A_{Vtot} \text{ (dB)} + A_I \text{ (dB)}]$$

Ahora resultan pertinentes unos cuantos comentarios sobre el amplificador en cascada del ejemplo anterior. Para evitar la pérdida del nivel de señal en la entrada del amplificador donde la señal suele ser muy pequeña, se ha diseñado la primera etapa para que tenga una resistencia relativamente grande (1 M Ω), que es mucho mayor que la resistencia de la fuente. El punto de equilibrio parece ser una ganancia de tensión moderada (10 V/V). La segunda etapa no necesita resistencia de entrada alta; en cambio, aquí es necesario obtener el total de la ganancia de tensión requerida. No se requiere que la tercera y última etapa, o salida, proporcione ganancia de tensión; en cambio, funciona como amplificador separador, proporcionando una resistencia de entrada relativamente grande y una resistencia de salida baja, mucho menor que la carga. Es esta etapa la que permite conectar el amplificador a la carga de 10 Ω . Estos temas se harán más evidentes al resolver los siguientes ejercicios.

EJERCICIOS

1.14 ¿Cuál sería la ganancia de tensión total del amplificador en cascada del ejemplo 1.3 sin la etapa 3?

Resp. 81,8 V/V

1.15 En el caso del amplificador de tres etapas del ejemplo 1.3, se $v_s = 1 \text{ mV}$. Encuentre v_{i1} , v_{i2} , v_{i3} y v_{o3} .

Resp. 0,91 mV ; 9 mV ; 818 mV ; 744 mV

1.16 a) Modele el amplificador de tres etapas del ejemplo 1.3 (sin la fuente de excitación ni la carga) como un amplificador de tensión. ¿Cuáles son los valores de R_i , A_v y R_o ?

b) Si R_d varía desde 10Ω hasta 1000Ω , encuentre el intervalo de variación correspondiente a la ganancia de tensión total A_{v_s} .

Resp. 1 M Ω , 900 V/V, 10 Ω ; 409 V/V á 810 V/V

1.5.3 Otros tipos de amplificadores

En el diseño de un sistema electrónico la señal que interesa (sin importar si se encuentra en la entrada del sistema, en la etapa intermedia o a la salida) puede ser una tensión o una corriente. Por ejemplo, algunos transductores tienen resistencias de salida muy elevadas y es posible que resulte más apropiado considerarlas como fuentes de corriente. De igual manera, hay aplicaciones en que nos interesa más la corriente de salida que el voltaje. Por lo tanto, aunque resulta más común, el amplificador de tensión, con cuyo modelo hemos venido trabajando, es sólo uno de los cuatro posibles de definir e interpretar. Los otros tres son los amplificadores de corriente, de transconductancia y de transresistencia. En la tabla 1.1 se muestran los cuatro tipos de amplificadores recién mencionados, incluyendo sus circuitos equivalentes, la definición de sus parámetros de ganancia o transferencia y los valores ideales de sus resistencias de entrada y salida.

TABLA 1.1 Clasificación de los circuitos amplificadores

Tipo de amplificador	Modelo de circuito equivalente	Transferencia	Características ideales
DE TENSION		Ganancia de Tensión con la salida a circuito abierto A_v $\frac{v_o}{v_i} \Big _{i_o=0}$	$R_i = \text{infinito}$ $R_o = 0$
DE CORRIENTE		Ganancia de Corriente con la salida en cortocircuito A_i $\frac{i_o}{i_i} \Big _{v_o=0}$	$R_i = 0$ $R_o = \text{infinito}$
DE TRANSCON- TANCIA		Transconductancia con la salida en cortocircuito G_m $\frac{i_o}{v_i} \Big _{v_o=0}$	$R_i = \text{infinito}$ $R_o = \text{infinito}$
DE TRANSRESIS- TENCIA		Transresistencia con la salida a circuito abierto R_m $\frac{v_o}{i_i} \Big _{i_o=0}$	$R_i = 0$ $R_o = 0$

1.5.4 Relaciones entre los cuatro modelos de amplificador

Aunque sea preferible uno de los cuatro modelos de la tabla 1.1 para un amplificador determinado, *puede usarse cualquiera de los cuatro para modelar al amplificador*. En realidad, es posible obtener relaciones simples para relacionar los parámetros de los diversos modelos. Por ejemplo, la ganancia de tensión a circuito abierto A_v podría relacionarse con la de corriente con la salida en cortocircuito A_i de la siguiente manera: la tensión de salida a circuito abierto dado por el modelo del amplificador de tensión de la tabla 1.1 es $A_v v_i$. El modelo del amplificador de corriente de la misma tabla proporciona una tensión de salida con la misma a circuito abierto de $A_i i_i R_o$. Al igualar ambos valores y observar que $i_i = v_i / R_i$ se obtiene

$$A_v = A_i \left(\frac{R_o}{R_i} \right) \quad (1.14)$$

De igual manera se puede demostrar que

$$A_v = G_m R_o \quad (1.15)$$

y

$$A_v = \frac{R_m}{R_i} \quad (1.16)$$

Las expresiones de las ecuaciones (1.14) a (1.16) se pueden emplear para relacionar dos parámetros de ganancia cualesquiera, A_v , A_i , G_m y R_m .

En los circuitos equivalentes de los amplificadores de la tabla 1.1 se observa que la resistencia de entrada R_i del amplificador se determinará si se aplica una tensión de entrada v_i y se mide (o se calcula) la corriente de entrada i_i ; es decir $R_i = v_i / i_i$. La resistencia de salida se encuentra como el cociente entre la tensión de salida a circuito abierto y la corriente de salida con la misma en cortocircuito. Como opción, es posible encontrar la resistencia de salida si se elimina la fuente de señal de excitación a la entrada (de modo que tanto v_i como i_i se hagan cero: esta condición muchas veces se describe como “desactivar o pasivar” la fuente de señal de excitación) y se aplica una señal de prueba de tensión v_x a la salida del amplificador. Si se describe a la corriente tomada por el amplificador a la fuente de tensión de prueba v_x en los terminales de salida como i_x (tome en cuenta que dicha i_x tiene sentido opuesto a i_o), entonces $R_o = v_x / i_x$. Aunque conceptualmente estas técnicas son correctas, en la práctica real se aplican métodos más precisos para medir R_i y R_o .

Los circuitos equivalentes de los amplificadores analizados son **unilaterales**; es decir el flujo de señales es unidireccional, desde la entrada hacia la salida. Casi todos los amplificadores reales muestran alguna transmisión inversa, que suele ser indeseable pero que, no obstante, debe modelarse. Por el momento no se abordará el tema en esta Sección, basta con mencionar que en el Apéndice B se presentarán modelos más completos para los cuadripolos lineales. De la misma manera en los Capítulos 4 y 5, perfeccionaremos el uso de los circuitos equivalentes de los amplificadores de la tabla 1.1. para considerar la naturaleza no unilateral de algunos amplificadores a transistores.

EJEMPLO 1.4

El **transistor bipolar de juntura (BJT)**, que es uno de los componentes activos mencionados con anterioridad y que se estudiará en el Capítulo 5, es un componente que posee tres terminales que puede representarse (cuando se polariza y opera con pequeñas señales) por medio del circuito equivalente que se muestra en la figura 1.17 a). Los tres terminales de este componente son los correspondiente a **base (B)**, el **emisor (E)** y el **colector (C)**. Puede apreciarse comparando con los modelos de los amplificadores recién vistos, que la topología (o formato del dibujo del circuito equivalente) o la esencia del modelo es como el del amplificador de transconductancia representado por una resistencia de entrada entre B y E (denominada como r_π o también llamada r_{be}) una transconductancia con la salida en cortocircuito g_m y una resistencia de salida r_o .

a) Con el emisor usado como terminal común entre la entrada y la salida, en la figura 1.17 a) se muestra un amplificador monoetapa bipolar conocido como circuito de **emisor común** o de **emisor a tierra**. Obtenga una expresión para la ganancia de tensión A_{V_s} , y evalúe su magnitud para el caso en que $R_s = 5 \text{ K}\Omega$, $r_{be} = 2,5 \text{ K}\Omega$, $g_m = 40 \text{ mS}$, $r_o = 100 \text{ K}\Omega$ y $R_L = 5 \text{ K}\Omega$. ¿Cuál sería el valor de ganancia si el efecto de r_o fuera insignificante?

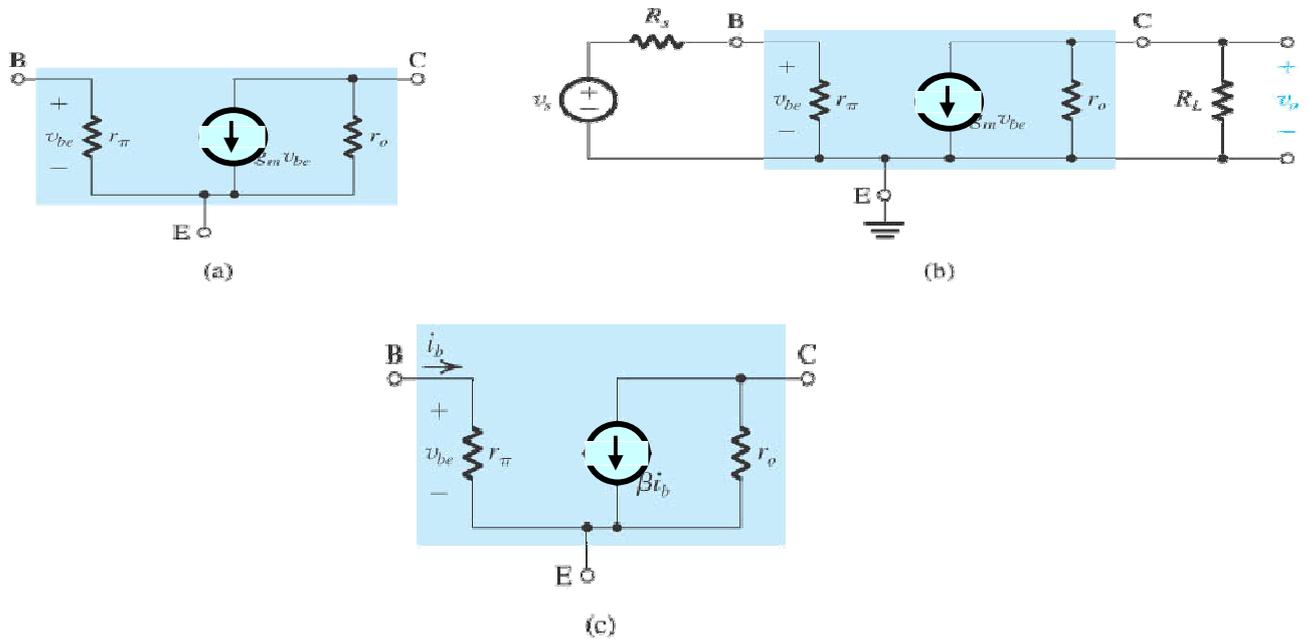


Figura 1.17 (a) Circuito equivalente para un transistor bipolar de juntura (BJT). (b) El BJT utilizado como amplificador con el terminal de emisor común a la entrada y a la salida (por ello llamado amplificador emisor común). (c) Circuito equivalente opcional para el transistor bipolar de juntura BJT.

b) Un modelo alternativo para el transistor en el cual se utiliza un amplificador de corriente más que un amplificador de transconductancia se muestra en la figura 1.17 c). ¿Cuál debe ser la ganancia de corriente en cortocircuito, β ? Asígnele una ecuación y un valor.

Solución

a) Mediante la regla del divisor de tensión, se determina la fracción de señal de entrada que aparece en la entrada del amplificador como sigue:

$$v_{be} = v_s \frac{r_{be}}{r_{be} + R_s} \quad (1.17)$$

A continuación determinamos la tensión de salida v_o multiplicando la corriente de la fuente de corriente $g_m v_{be}$ por la resistencia $(R_L // r_o)$

$$v_o = -g_m v_{be} (R_L // r_o) \quad (1.18)$$

sustituyendo v_{be} de acuerdo a la ecuación (1.17) se obtiene la expresión de la ganancia de tensión

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{-r_{be}}{r_{be} + R_s} g_m (R_L // r_o) \quad (1.19)$$

Observe que la ganancia es negativa, lo que indica que este amplificador es inversor. Para los valores de los componentes, dados como dato

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{-2,5}{2,5 + 5} 40 (5 // 100) = -63,5 \text{ V/V}$$

Omitiendo el efecto de r_o se obtiene

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{-2,5}{2,5 + 5} \cdot 40 \cdot 5 = -66,7 \text{ V/V}$$

que esta muy cerca del valor que se obtiene al incluir r_o . Esto no resulta sorprendente ya que $r_o \gg R_L$.

b) Para que el modelo de la figura 1.17 c) sea equivalente al de la figura 1.17 a),

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

Pero como $i_b = v_{be} / r_{be}$, se obtiene

$$\beta = g_m r_{be}$$

Para los valores dados

$$\beta = 40 \cdot 2,5 = 100 \text{ A/A}$$

EJERCICIOS

1.17 Un amplificador de corriente que tiene un circuito equivalente tal como el mostrado en la segunda línea de la Tabla 1.1 se alimenta con una fuente de corriente de señal i_s , que tiene una resistencia interna R_s , y la salida se conecta a una resistencia de carga R_L . Demuestre que la ganancia total de corriente esta dada por

$$\frac{i_o}{i_s} = A_i \frac{R_s}{R_s + R_i} \frac{R_o}{R_o + R_L}$$

1.18 Imagine el amplificador de transconductancia cuyo modelo se ilustra en la tercera línea de la Tabla 1.1. Una fuente de tensión de señal v_s , con una resistencia interna R_s , se conecta a la entrada mientras que a la salida del amplificador se conecta una resistencia de carga R_L . Demuestre que la ganancia de tensión está dada por

$$\frac{v_o}{v_s} = G_m \frac{R_i}{R_i + R_s} (R_o // R_L)$$

1.19 Un amplificador de transresistencia tiene el modelo mostrado en la cuarta línea de la Tabla 1.1. El amplificador es excitado con una fuente de corriente de señal i_s , que tiene una resistencia interna R_s , y la salida está conectada a una resistencia de carga R_L . Demuestre que la ganancia general está dada por

$$\frac{v_o}{i_s} = R_m \frac{R_s}{R_s + R_i} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

1.20 Encuentre la resistencia de entrada entre los terminales de B y G del circuito que se ilustra en la figura E1.18. La tensión v_x es de prueba y por consecuencia dicha resistencia de entrada se define como $R_{en} = v_x / i_x$

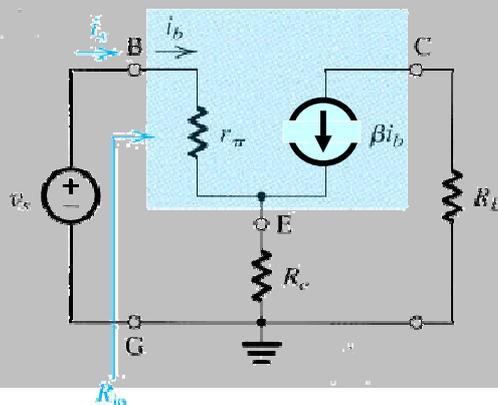


Figura E1.18

Resp. $R_{en} = r_{be} + (\beta + 1) R_e$

1.6 RESPUESTA DE FRECUENCIA DE AMPLIFICADORES

En la sección 1.2 se vio que la señal de entrada a un amplificador puede expresarse siempre como la suma de señales senoidales. Es por ello que resulta sumamente interesante conocer el comportamiento de un amplificador a partir de su respuesta a señales senoidales de diferentes frecuencias. A esta característica de desempeño de un amplificador se le conoce como respuesta de frecuencia.

1.6.1 Medición de la respuesta de frecuencia del amplificador

La mejor forma de describir el aspecto conceptual de la respuesta de frecuencia es mostrar cómo se mide dicha característica. A tal efecto consideremos la figura 1.18 en donde se describe un amplificador lineal de tensión excitado en su entrada con una señal de forma senoidal de amplitud V_i y frecuencia f . Como se indica en la figura, la señal medida en la salida del amplificador también es senoidal con la misma frecuencia f . Es importante tomar debida nota de que: *siempre que se aplique una señal de forma senoidal a un circuito lineal, la salida resultante es también senoidal y posee la misma frecuencia que la señal de entrada*. En realidad la señal de forma senoidal es la única señal que no cambia de forma cuando pasa a través de un circuito lineal. Sin embargo, tome en cuenta que, en general, la señal senoidal de salida tendrá una amplitud diferente y tendrá un desplazamiento de fase con respecto a la entrada. El cociente entre la amplitud de la señal senoidal de salida (V_o) y la de entrada (V_i) es el módulo de la ganancia de tensión del amplificador (o transferencia de tensiones) a la frecuencia de prueba f . Además, el ángulo ϕ es la fase de dicha transferencia del amplificador válida también para dicha frecuencia de prueba f . Si se denota la transferencia o más bien dicho la **Función Transferencia** del amplificador como $A_V(f)$ entonces

$$\left| A_V(f) \right| = \frac{V_o}{V_i}$$

$$\angle A_V(f) = \phi$$

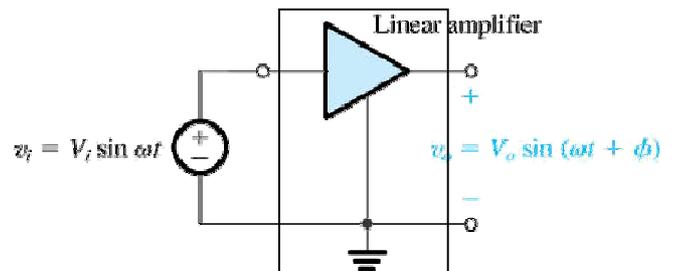


Figura 1.18 Medición de la respuesta de frecuencia de un amplificador lineal. La Transferencia del amplificador a la frecuencia f se caracteriza por su módulo $|V_o/V_i|$ y su fase ϕ .

La respuesta del amplificador a una señal senoidal de frecuencia f se encuentra totalmente descrita por la función transferencia tanto en módulo como en fase: $|A_V(f)|$; $\angle A_V(f)$. Ahora bien, para obtener la respuesta de frecuencia completa del amplificador, simplemente se cambia el valor de la frecuencia de la señal senoidal de entrada y se mide el nuevo valor de: $|A_V(f)|$; $\angle A_V(f)$. El resultado final será una tabla o una gráfica o ambas cosas, correspondiente al módulo de la transferencia como función de la frecuencia así como otra tabla u otra gráfica o las dos cosas perteneciente a la fase de dicha función transferencia. En conjunto, ambas gráficas constituyen la respuesta en frecuencia del circuito amplificador; a la primera se le conoce como **respuesta de magnitud** o **respuesta de amplitud** y a la segunda se la identifica como **respuesta de fase**. Por último, se debe mencionar que es una práctica común expresar la magnitud de la transferencia en decibeles y, por lo tanto representar $20 \log |A_V(f)|$ como función de la frecuencia.

1.6.2 Ancho de Banda del amplificador

En la figura 1.19 se muestra la respuesta de amplitud de un amplificador. La gráfica describe que la ganancia de tensión del amplificador es casi constante en un amplio intervalo de frecuencias, entre f_1 y f_2 , aproximadamente. Las señales de frecuencia por debajo de f_1 o por encima de f_2 experimentan una ganancia menor, que además va disminuyendo conforme la frecuencia se aleja tanto de f_1 como de f_2 . A la porción del espectro de frecuencias dentro del cual la ganancia es casi constante, dentro de un cierto número de decibeles (normalmente 3 dB), se lo denomina **ancho de banda** o **banda pasante** del circuito amplificador. Por lo general se diseña el amplificador de modo que su ancho de banda coincida con el espectro de las señales que se deben amplificar. Si ese no fuera el caso, el amplificador distorsionaría el espectro de frecuencias de la señal de entrada, y diferentes componentes de la señal de entrada serán amplificadas con diferente magnitud.

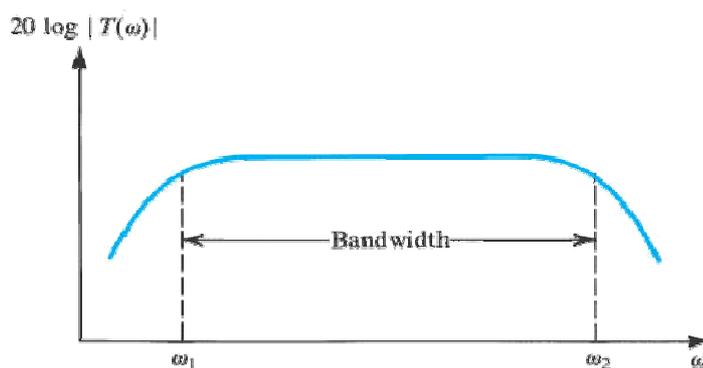


Figura 1.19 Respuesta de magnitud típica de un amplificador: cociente entre la tensión de salida $V_o(\omega)$ y la de entrada $V_i(\omega)$.

1.6.3 Evaluación de la respuesta de frecuencia de los amplificadores

Ya se ha descrito el método empleado para medir la respuesta de frecuencia de un amplificador. Ahora se revisará brevemente el método para obtener analíticamente una expresión para la respuesta de frecuencia. Lo que se describirá es sólo un anticipo de este importante tema.

Para evaluar la respuesta de frecuencia de un amplificador se tiene que analizar el modelo de circuito equivalente del amplificador, tomando en cuenta todos los componentes reactivos.² El análisis se lleva a cabo de la forma acostumbrada pero con las inductancias y capacitancias representadas por sus reactancias. Una inductancia L tiene una reactancia o impedancia $j\omega L$; una capacitancia C , una de valor $1/(j\omega C)$, o de manera equivalente, una susceptancia o admitancia $j\omega C$. Por lo tanto, en un análisis en el *dominio de la frecuencia* se trata con impedancias y admitancias. El análisis concluye con la obtención de la función transferencial $A_V(\omega)$:

$$A_V(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)}$$

donde $V_i(\omega)$ y $V_o(\omega)$ representan a las señales de entrada y salida, respectivamente. $A_V(\omega)$ suele ser una función compleja cuyo módulo coincide con la respuesta de amplitud del amplificador. La fase de $A_V(\omega)$ se corresponde con la respuesta de fase del amplificador.

En el análisis de un circuito para la determinación de su respuesta de frecuencia, las manipulaciones algebraicas se simplifican considerablemente si se usa la **variable frecuencia compleja** s . Desde el punto de vista de s , la impedancia de una inductancia L es sL y la de una capacitancia C es $1/sC$. Al sustituir los elementos reactivos con sus impedancias y realizar el análisis de circuito estándar, se obtiene la función de transferencia

$$A_V(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

Posteriormente, se sustituye s por $j\omega$ para determinar la función transferencial para **frecuencias físicas** $A_V(j\omega)$. Tome en cuenta que ésta es la misma función que antes se denominó $A_V(\omega)$; ³ se añade la j para destacar que $A_V(j\omega)$ se obtiene de $A_V(s)$ al sustituir s con $j\omega$.

² Tome en cuenta que en los modelos expuestos en secciones anteriores no se incluyeron componentes reactivos. Se trató de modelos simplificados y no pueden usarse por sí solos para predecir la respuesta de frecuencia del amplificador.

³ En esta etapa se usa s tan sólo como abreviatura de $j\omega$. Un conocimiento detallado de los conceptos del plano s sólo será necesario hasta el capítulo 7. Una revisión breve del análisis del plano s se presenta en el apéndice E.

1.6.4 Clasificación de los amplificadores de acuerdo a su respuesta de frecuencia

Es posible clasificar a los amplificadores desde el punto de vista del formato de su curva de respuesta en frecuencia del módulo de su transferencia. En la figura 1.20 se muestran curvas típicas de respuesta en frecuencia para varios tipos de amplificadores. En la figura 1.20 a) la ganancia es constante en un amplio intervalo de frecuencias pero cae a frecuencias altas y bajas. Se trata de un tipo muy común de respuesta de frecuencia que se encuentra en amplificadores de audio.

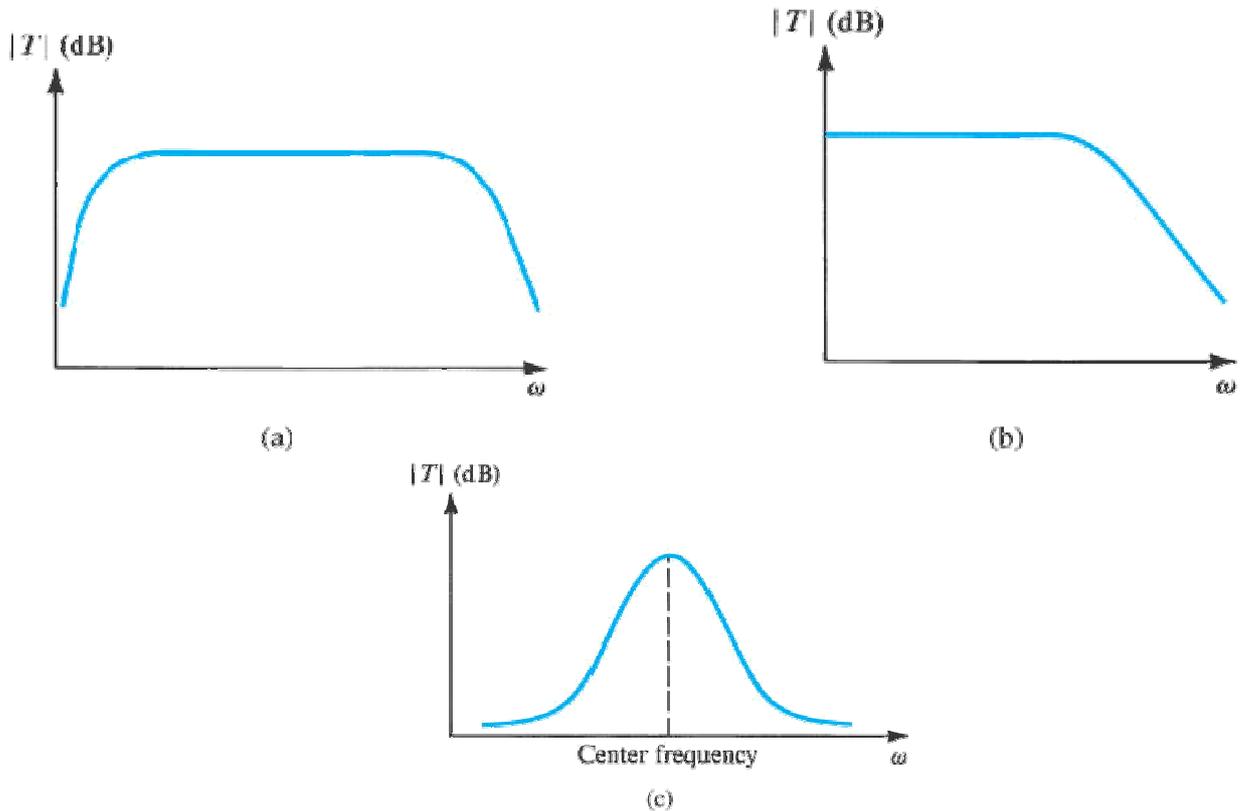


Figura 1.20 Respuesta de amplitud de (a) un amplificador con acoplamiento a R-C, (b) un amplificador con acoplamiento directo, y (c) de un amplificador sintonizado o de paso de banda .

Como se verá en capítulos posteriores, las **capacitancias internas** de los componentes activos (transistores) producen una caída en la ganancia a frecuencias altas. Por otra parte, la pérdida de ganancia a bajas frecuencias suele ocurrir cuando se usan **condensadores de acoplamiento** para conectar una etapa con otra, como se indica en la figura 1.21. Esta práctica se adopta para simplificar el procedimiento de diseño de las diferentes etapas. Por lo general se eligen condensadores de acoplamiento muy grandes (desde una fracción de microfaradio a varias decenas de microfaradios) para que su reactancia (impedancia) sea pequeña a la frecuencia de interés.

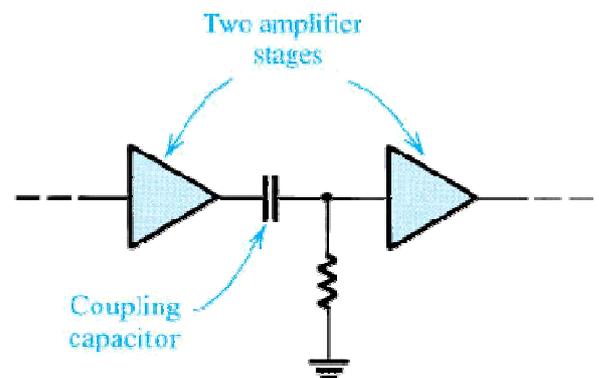


Figura 1.21 Uso del capacitor para acoplar etapas del amplificador.

No obstante, a frecuencias lo suficientemente bajas, la reactancia de un condensador de acoplamiento se hará tan grande que parte de la señal que habrá de acoplarse aparezca como una caída de tensión en el condensador de acoplamiento y, por lo tanto no pasará a la siguiente etapa. De este modo, los condensadores de acoplamiento causan una pérdida de ganancia a bajas frecuencias y hacen que la ganancia sea 0 a C.C. Esto no resulta sorprendente porque en la figura 1.21 se observa que el condensador de acoplamiento, en conjunto con la resistencia de entrada de la siguiente etapa, forma un circuito RC del tipo pasa altos. La respuesta de frecuencias de este circuito pasa altos es la responsable de la forma de respuesta de frecuencia del amplificador en la figura 1.20 a) en el extremo de bajas frecuencias.

Hay muchas aplicaciones en las que es importante que el amplificador mantenga su ganancia a bajas frecuencias a la frecuencia de 0 Hz. Más aún, la tecnología de circuitos integrados (CI) no permite fabricar condensadores de acoplamiento monolíticos de gran tamaño. Por lo tanto, los amplificadores de CI suelen diseñarse como **amplificadores acoplados directamente** o **de continua** (en oposición a los **amplificadores con acoplamiento a R-C**). En la figura 1.20 b) se muestra la respuesta de frecuencia de un amplificador de continua. Esta respuesta es característica de lo que se suele denominar como **amplificador pasabajos**.

En varias aplicaciones, como en el diseño de receptores de radio y TV, surge la necesidad de un amplificador cuyos picos de respuesta de frecuencia alcancen un nivel (llamado **frecuencia central**) y caigan a ambos lados de dicha frecuencia, como se observa en la figura 1.20 c). Los amplificadores que presentan este tipo de respuesta en frecuencia son los **amplificadores sintonizados** o **amplificadores pasabanda**. Un amplificador sintonizado es el dispositivo que en un receptor de comunicaciones permite seleccionar un emisor entre muchos otros, al ajustar su frecuencia central para que coincida con la frecuencia de un canal de comunicaciones deseado (tal como una estación de radiodifusión), se recibirá la señal de este canal en particular, mientras se atenúan o filtran los restantes canales.

1.7 EL INVERSOR LÓGICO DITIAL

Como en este libro se ha considerado que una gran mayoría de los sistemas electrónicos de actualidad incluyen partes analógicas y partes digitales y un buen diseñador electrónico debe dominar el diseño tanto de los circuitos analógicos como de aquellos utilizados en el área digital, en este capítulo de introducción sólo se persigue que el lector pueda interpretar adecuadamente las grandes similitudes y las grandes diferencias que se registran en las características de funcionamiento entre los dos bloques funcionales más básicos de las dos áreas de la electrónica, como lo son el bloque amplificador que hemos venido describiendo, y el bloque **inversor lógico** que se considera la compuerta elemental más sencilla del área de la electrónica digital.

Como su nombre lo indica, el inversor lógico invierte el valor lógico de su señal de entrada. Por lo tanto para una entrada lógica cero ("0"), la salida deberá presentar un valor lógico uno ("1"), y viceversa. Entonces aceptando ya, que la magnitud digital se ha convertido en una señal eléctrica bajo la forma de una tensión, es muy común que la compuerta inversora se represente en forma de bloque tal como se indica en la figura 1.22.

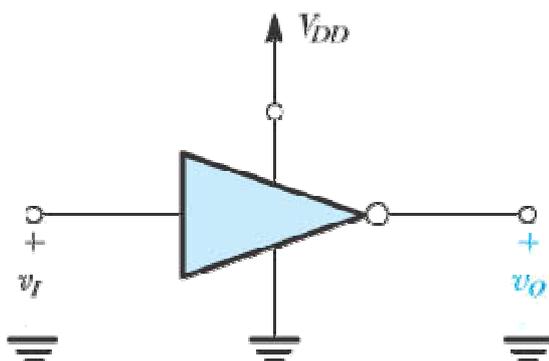


Figura 1.22 Un inversor lógico alimentado con una fuente de alimentación de C.C. V_{DD} .

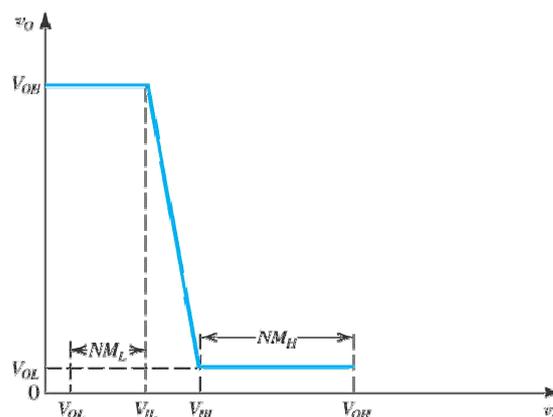


Figura 1.23 Característica de transferencia de tensión de un inversor lógico .

Para cumplimentar dicha función lógica en el bloque de la figura 1.22 cuando la tensión de excitación de entrada v_I es un nivel bajo (cercano a 0 V), la salida v_O será alta (cercana a la tensión de alimentación V_{DD} y viceversa.

Entonces, para representar en forma cuantificada esta operación del inversor se utiliza la característica de transferencia de tensión incluida en la figura 1.23 en donde se han puesto en evidencia los valores de tensión de entrada y

salida de la compuerta que se consideran como alto y bajo, respectivamente. Así entonces V_{IL} es la tensión de entrada correspondiente a un nivel bajo, en tanto que V_{IH} describe el valor de la tensión de entrada que corresponde a un nivel alto. De igual forma si nos desplazamos al terminal de salida de la compuerta V_{OL} y V_{OH} son los valores de tensión de salida correspondientes a los niveles lógicos bajo y alto, respectivamente. Pero si en la misma gráfica, sobre el eje de abscisas correspondiente a la tensión de entrada, interpretamos a los mismos como los de una compuerta atacada y simultáneamente incorporamos los niveles de tensión de salida de una eventual compuerta atacante, entonces la diferencia entre los valores de la compuerta atacada y los de la atacante nos proporcionan los denominados **márgenes de ruido** de una compuerta.

De esta manera el margen de ruido en el nivel alto resulta

$$NM_H = V_{OH} - V_{IH}$$

y el correspondiente margen de ruido en el nivel bajo

$$NM_L = V_{IL} - V_{OL}$$

Si se compara el formato de esta característica de transferencia con la correspondiente obtenida en el ejemplo 1.2 que se mostraba en la figura 1.13 se puede concluir que ese amplificador inversor se puede utilizar como un inversor lógico. De manera específica, si la entrada es alta ($v_I > 0,69$ V), v_O será bajo, o sea inferior a 0,3 V. Por otra parte, si la entrada es baja (cercana a 0 V), la salida será alta (cercana a 10 V). Por lo tanto, para emplear este amplificador como inversor lógico se utilizan sus regiones extremas de operación. Es exactamente lo opuesto a su uso como amplificador de señales analógicas, donde se polarizaría en la parte media de la característica de la transferencia y la señal se mantendría lo suficientemente pequeña como para restringir la operación a un segmento corto, casi lineal, de la curva de transferencia. Por otra parte, las aplicaciones digitales aprovechan la no linealidad mostrada por la característica de transferencia de tensión.

Complementando lo ya adelantado en el sentido que los amplificadores se construyen mediante el empleo de los componentes activos o transistores, también los inversores se encuentran constituidos por transistores que en este caso operan como interruptores controlados por tensión.

1.8 SIMULACION DE CIRCUITOS MEDIANTE COMPUTADOR

El uso de programas de computadora para simular la operación de circuitos electrónicos se ha convertido en un paso esencial en el proceso de diseño de circuitos. Esto resulta especialmente cierto en el caso de los circuitos que se han ensamblado en forma de circuitos integrados. Sin embargo, aún los circuitos que continúan construyéndose en forma de circuito impreso empleando componentes discretos pueden y deben beneficiarse de la simulación de circuitos. Esta operación le permite al diseñador comprobar aquellos diseños que seguramente no cumplirán con las especificaciones y cuales se encuentren en condiciones de cumplirlas cuando se ejecuten con componentes reales (con sus diversas imperfecciones) y también proporciona conocimiento adicional de la operación del circuito, lo que permite al diseñador afinar el diseño final, antes de la construcción del prototipo y mucho antes de su fabricación. Sin embargo, a pesar de las ventajas de la simulación computarizada, la misma no sustituye a una comprensión cabal de la operación del circuito. Sólo debe hacerse en una etapa posterior del proceso de diseño y, con toda seguridad, después de que se ha hecho un diseño con lápiz y papel.

Entre los diversos programas de simulación de circuitos para el análisis numérico asistido por computadora de los circuitos microelectrónicos, **SPICE** (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*: programa de simulación con énfasis en circuitos integrados) es el de uso más extendido, sobre todo por la industria electrónica así como por los propios fabricantes de componentes activos (transistores y circuitos integrados). **SPICE** es un programa de código abierto que se encuentra en desarrollo en la Universidad de California en Berkeley desde principios de la década de los setenta. **PSpice** es una versión para computadora personal del **SPICE**.

También existen versiones alternativas de este mismo programa simulador de circuitos electrónicos, cada uno con sus mejoras y/o modificaciones o adaptaciones del mismo de acuerdo a lo que cada interesado persiga en su aplicación. Una de estas versiones es la correspondiente a la empresa Texas Instruments que ha denominado **TINA** y que se menciona en este libro por considerarlo apropiado y con mayores recursos didácticos para su aplicación en el aula.

En este libro, nuestro objetivo no es enseñar al lector cómo funciona **SPICE** ni los pormenores para utilizarlo de manera efectiva. Esto puede encontrarse en los libros de **SPICE** o **TINA** que se encuentran a disposición del lector. Nuestro objetivo en las secciones de este libro dedicadas a **SPICE**, por lo general la última sección de cada capítulo, es doble: describir los modelos que emplea **SPICE** para representar los diversos dispositivos electrónicos, e ilustrar la utilidad del simulador para investigar la operación de los circuitos.