

Prefacio

En este documento se desarrollaron la lista de objetivo según el pensum de estudio de electrónica II, dictado en el instituto universitario de tecnología para la informática IUTEPI, incluyendo al final de este, una lista de conclusiones, recomendaciones y ecuaciones importantes. Estos tres elementos resumen el material para una revisión y aplicaciones futuras.

Una de las cosas notables de este campo, como en muchas otras áreas de la tecnología, es lo poco que cambian los principios fundamentales con el tiempo. Los sistemas son increíblemente más pequeños, las velocidades de operación actuales son en verdad extraordinarias y cada día aparecen nuevos artefactos que hacen que nos preguntemos hacia dónde nos está llevando la tecnología. No obstante, si nos detenemos un momento para considerar que la mayoría de todos los dispositivos en uso fueron inventados hace décadas y que las técnicas de diseño que aparecen en libros que datan de la década de 1930 se siguen utilizando, nos damos cuenta que la mayor parte de lo que vemos es en principio una mejora continua de las técnicas de construcción, las características generales y las técnicas de aplicación, en vez del desarrollo de elementos nuevos y básicamente diseños nuevos. El resultado es que la mayoría de los dispositivos analizados en este texto han estado en uso durante algún tiempo y que los textos sobre el tema escritos hace una década siguen siendo buenas referencias cuyo contenido no ha cambiado mucho. Los cambios más importantes se han presentado en la comprensión de cómo funcionan estos dispositivos y de su amplia gama de capacidades y en los métodos mejorados para enseñar los fundamentos asociados con ellos. El beneficio de todo esto para el estudiante que por primera vez aborda el tema, es que el material incluido en este texto, esperamos, haya alcanzado un nivel en el que sea relativamente fácil de asimilar y que la información se aplique durante muchos años por venir.

Contenido del programa de estudios

- Introducción
- Amplificador Operacional básico
- Aplicaciones Lineales y no lineales del Amplificador Operacional
- Circuitos Generadores en formar de Onda
- Circuitos electrónicos de Potencia.
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía

Introducción

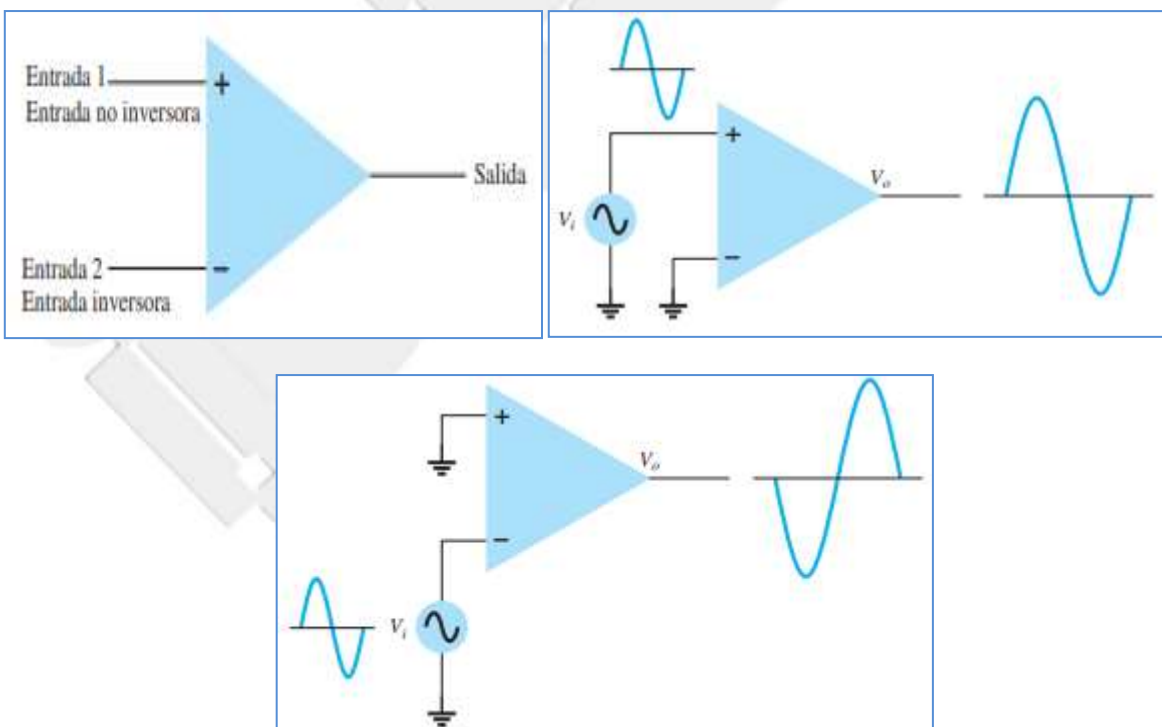
Un amplificador operacional, o amp-op, es un amplificador diferencial de muy alta ganancia con alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida. Los usos típicos del amplificador operacional son proporcionar cambios en la amplitud del voltaje (amplitud y polaridad), en osciladores, en circuitos de filtrado y en muchos tipos de circuitos de instrumentación.

Un amplificador operacional contiene varias etapas de amplificadores diferenciales para alcanzar una muy alta ganancia de voltaje. Un amplificador operacional básico con dos entradas y una salida, que sería el resultado de utilizar una etapa de entrada de un amplificador diferencial. Cada entrada produce ya sea la misma salida o una de polaridad (o fase) opuesta, dependiendo de si la señal se aplica a la entrada positiva o la entrada negativa respectivamente.

Amplificadores Operacionales Básicos

Entrada sencilla

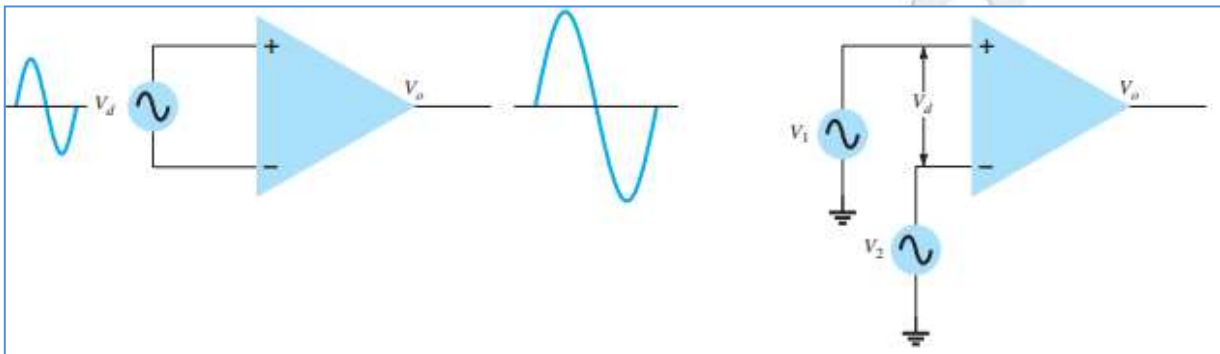
La operación de entrada sencilla se obtiene cuando la señal de entrada se conecta a una entrada con la otra entrada conectada a tierra. Las señales conectadas para esta operación. La entrada se aplica a la entrada positiva (con la entrada negativa a tierra), lo que produce una salida de la misma polaridad de la señal de entrada aplicada. Una señal de entrada aplicada a la entrada negativa, y por tanto la fase de salida es la opuesta a la de la señal aplicada



Operación del amplificador operacional básico

Entrada doble (diferencial)

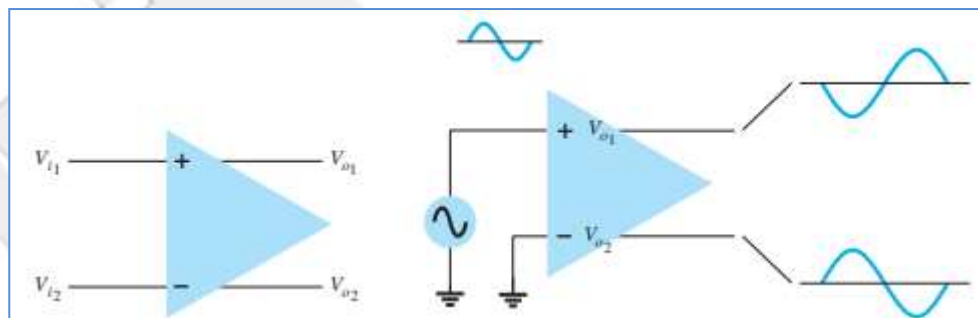
Además de utilizar sólo una entrada, es posible aplicar señales en cada entrada, lo que constituye una operación de doble entrada. Una entrada, V_d , aplicada entre las dos terminales de entrada (recuerde que ninguna entrada está conectada a tierra), con la salida amplificada resultante en fase con la de la señal aplicada entre las entradas positiva y negativa. Que se obtiene la misma acción cuando se aplican dos señales distintas a las entradas; la diferencia de señal es $V_{i1} - V_{i2}$.



Entrada doble y diferencial

Salida doble

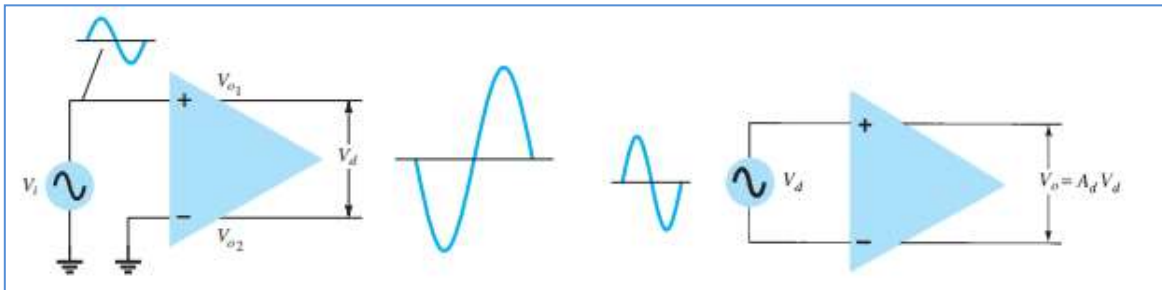
Si bien la operación analizada hasta ahora tiene una sola salida, el amplificador operacional también puede ser operado con salidas opuestas. Una entrada aplicada a cualquier entrada producirá dos salidas por ambas terminales de salida; estas salidas



Salida doble

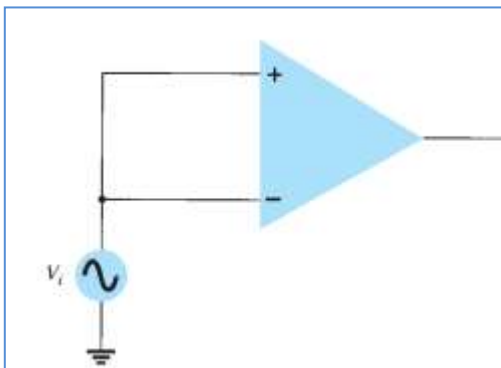
Siempre son de polaridad opuesta. Una entrada sencilla con una salida doble. Como se muestra, la señal aplicada a la entrada positiva produce dos salidas amplificadas de polaridad opuesta. La misma operación con una salida sencilla medida entre las terminales de salida (no con respecto a tierra). Esta diferencia de señal de salida es La diferencia de salida también se conoce como señal flotante puesto que ninguna terminal de salida es la terminal de tierra (referencia). Observe que la diferencia de salida es dos veces

más grande que o porque son de polaridad opuesta, y al restarse su amplitud se duplica. Una operación de entrada y salida diferenciales. La entrada se aplica entre las dos terminales de entrada y la salida se toma de entre las dos terminales de salida. Ésta es una operación totalmente diferencial.



Operación en modo común

Cuando se aplican las mismas señales a ambas entradas, se obtiene la operación en modo común. Idealmente, las dos entradas se amplifican de la misma manera, y puesto que producen señales de polaridad opuesta a la salida, estas señales se anulan y el resultado es una salida de 0 V. De hecho, se obtendrá una señal de salida pequeña.



Operación en modo común

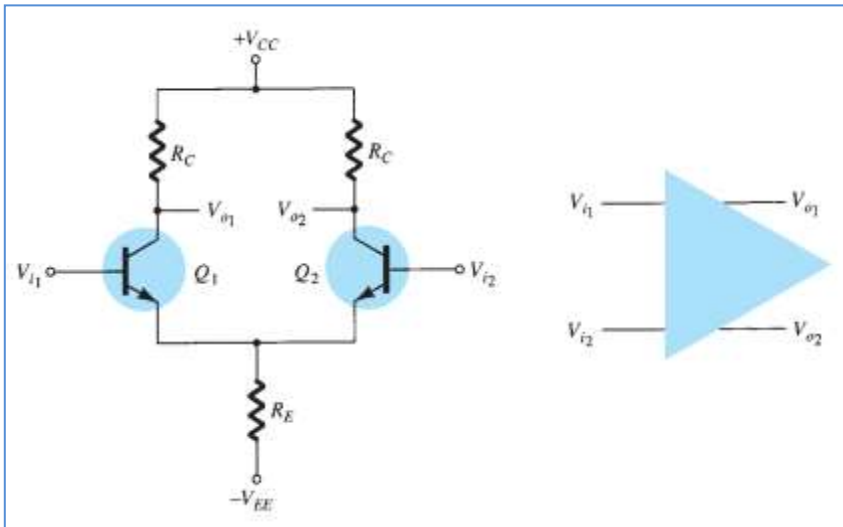
Rechazo en modo común

Una característica significativa de una conexión diferencial es que las señales que son opuestas en las entradas están muy amplificadas, mientras que las que son comunes a las dos entradas sólo se amplifican ligeramente. La operación total consiste en amplificar la diferencia de las señales al mismo tiempo que se rechaza la señal común en las dos entradas. Puesto que el ruido (cualquier señal de entrada indeseable) en general es común a ambas entradas, la conexión diferencial tiende a atenuar esta entrada indeseada al mismo tiempo que amplifica la salida de la diferencia de señal aplicada a las entradas. Esta característica de operación se conoce como rechazo en modo común

Circuito del amplificador diferencial

El circuito del amplificador diferencial es una conexión de muy grande aceptación y uso en unidades de circuitos integrados. Esta conexión se puede describir considerando el amplificador diferencial básico.

Observe que el circuito cuenta con dos entradas y dos salidas distintas, y que los emisores están conectados entre sí. Si bien la mayoría de los circuitos de amplificador utilizan dos fuentes de voltaje distintas, el circuito también puede operar con una sola fuente

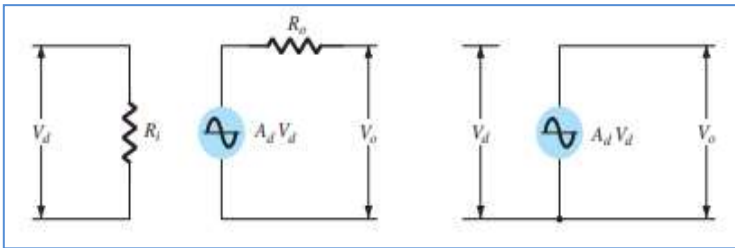


Amplificador diferencial

Fundamentos de amplificadores operacionales

Un amplificador operacional es un amplificador de muy alta ganancia que tiene una impedancia de entrada muy alta (por lo general de algunos mega ohms) y una impedancia de salida baja (de menos de). El circuito básico se construye utilizando un amplificador diferencial de dos entradas (positiva y negativa) y por lo menos una salida. Un amplificador operacional básico. Como vimos anteriormente, la entrada produce una salida que está en fase con la señal aplicada, en tanto que la entrada produce una salida de polaridad opuesta. El circuito equivalente de CA del amplificador operacional. Como se ve, la señal de entrada aplicada entre las terminales de entrada experimenta una impedancia de entrada R_i que suele ser muy alta. Se muestra que el voltaje de salida debe ser la ganancia del amplificador por la señal de entrada tomada a través de una impedancia de salida R_o , la que por lo general es muy baja. Un circuito de amplificador operacional ideal, tendría una impedancia de entrada infinita, una impedancia de salida cero y una ganancia de voltaje infinita.

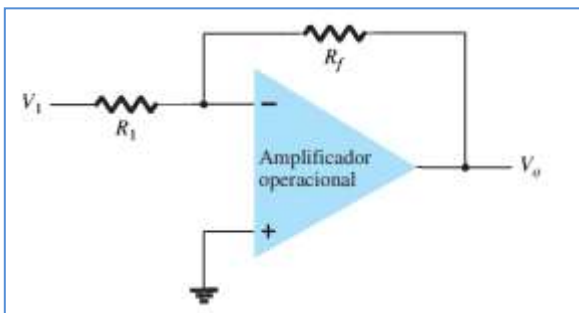




Fundamentos del amplificador operacional básico

Amplificador operacional básico

La conexión de circuito básico utilizando un amplificador operacional. Dicho circuito funciona como un multiplicador de ganancia constante. Se aplica una señal de entrada V_1 a través de un resistor R_1 a la entrada negativa. La salida se conecta de nuevo a la misma entrada negativa por medio de un resistor R_f . La entrada positiva se conecta a tierra. Como la señal V_1 se aplica esencialmente a la entrada negativa, la fase de la salida resultante es la opuesta a la de la señal de entrada. El amplificador operacional reemplazado por su circuito equivalente de CA. Si utilizamos el circuito equivalente del amplificador



Conexión Básica

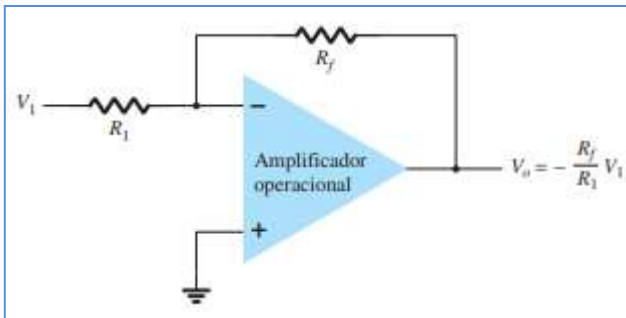
Aplicaciones Lineales y No Lineales del Amplificador Operacional.

El amplificador operacional se puede conectar en una gran cantidad de circuitos para obtener varias características de operación. En esta sección nos ocupamos de algunas de las conexiones más comunes de estos circuitos.

Amplificador inversor

El circuito amplificador de ganancia constante más ampliamente utilizado es el amplificador inversor. La salida se obtiene multiplicando la entrada por una ganancia fija o constante establecida por el resistor de entrada y el resistor de realimentación: esta salida también se invierte a partir de la entrada. Utilizando la ecuación.

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1$$



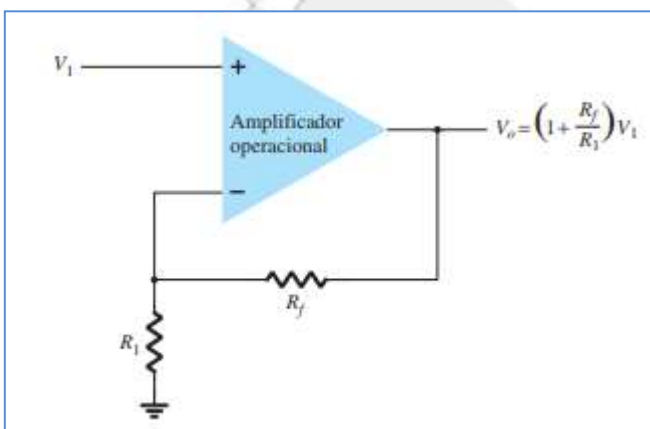
Despejamos la ecuación del inversor

Amplificador no inversor

Un circuito de amplificador operacional que funciona como amplificador no inversor o multiplicador de ganancia constante. Es de notar que la conexión de amplificador inversor se utiliza más porque es más estable en frecuencia (lo cual analizaremos más adelante). Para determinar la ganancia de voltaje del circuito, podemos utilizar la representación. Observe que el voltaje a través de R_1 es V_1 puesto que éste debe ser igual al voltaje de salida, a través de un divisor de voltaje de R_1 y R_f , de modo que.

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_o$$

$$\frac{V_o}{V_1} = \frac{R_1 + R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

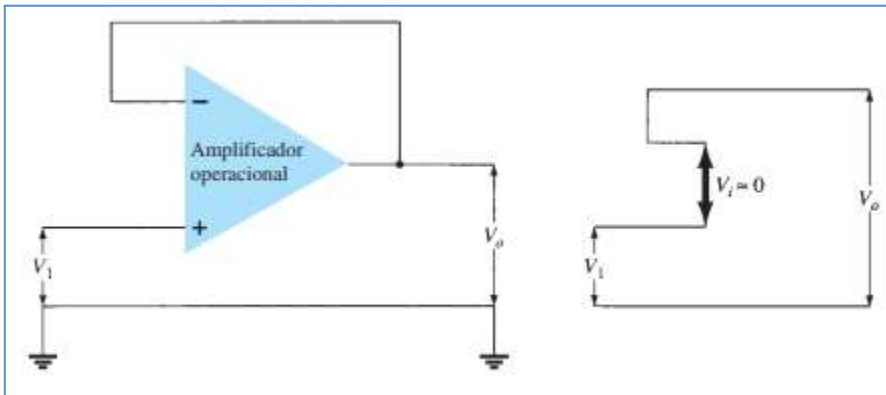


Amplificador No Inversor

Seguidor unitario

El circuito de seguidor unitario, proporciona una ganancia unitaria (1), sin inversión de polaridad o fase. Por el circuito equivalente y que la salida es de la misma polaridad y magnitud que la entrada. El circuito opera como un circuito en emisor, seguidor o en fuente, seguidor, excepto que la ganancia es exactamente unitaria.

$$V_o = V_i$$

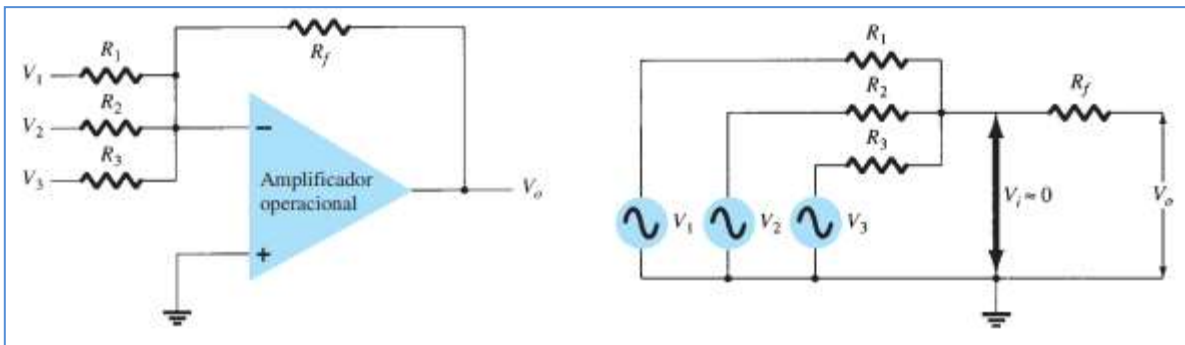


Amplificador sumador

Probablemente el circuito más utilizado de los circuitos de amplificador operacional es el amplificador sumador. El circuito muestra un circuito de amplificador sumador de tres entradas, el cual permite sumar algebraicamente tres voltajes, cada uno multiplicado por un factor de ganancia constante. Utilizando la representación equivalente, podemos expresar el voltaje de salida en función de las entradas como

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right)$$

En otras palabras, cada entrada agrega un voltaje a la salida multiplicado por su multiplicador de ganancia constante distinta. Si se utilizan más entradas, cada una de ellas agrega un componente adicional a la salida



Amplificador sumador

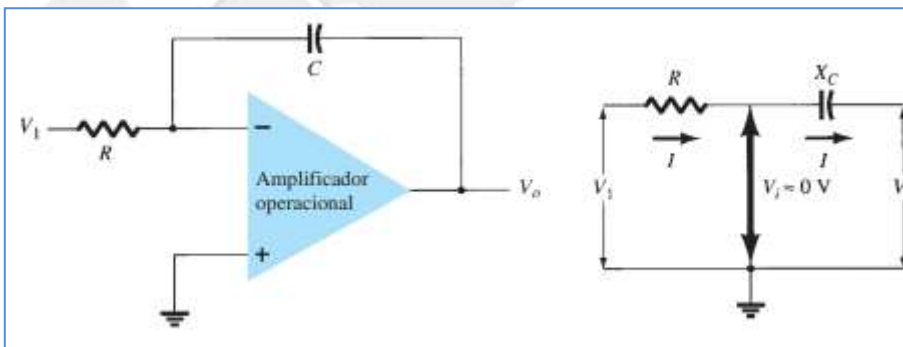
Integrador

Hasta ahora, los componentes de entrada y realimentación han sido resistores. Si el componente de realimentación utilizado es un capacitor, la conexión resultante se llama integrador. El circuito equivalente de tierra virtual muestra que se puede derivar una expresión para el voltaje entre la entrada y la salida en función de la corriente I de la entrada a la salida. Recuerde que tierra virtual implica que podemos considerar que el voltaje en la unión de R y X_C está a tierra (puesto que) pero que no fluye corriente hacia tierra en ese punto. La impedancia capacitiva puede expresarse como

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{sC}$$

donde $s = j\omega$ está en la notación de Laplace*. Resolviendo para V_o/V_1 resulta

$$I = \frac{V_1}{R} = -\frac{V_o}{X_C} = \frac{-V_o}{1/sC} = -sCV_o$$



Esta expresión puede escribirse de nuevo en el dominio del tiempo como

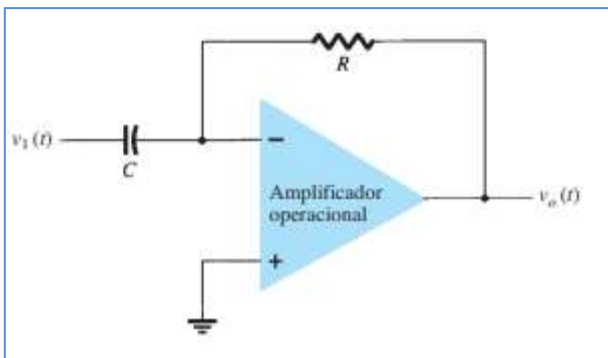
$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

Diferenciador

Un diferenciador. Aunque no es tan útil como los circuitos antes descritos, sí proporciona una operación útil, la relación resultante para el circuito que es

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_i(t)}{dt}$$

Donde el factor de escala es $-RC$.



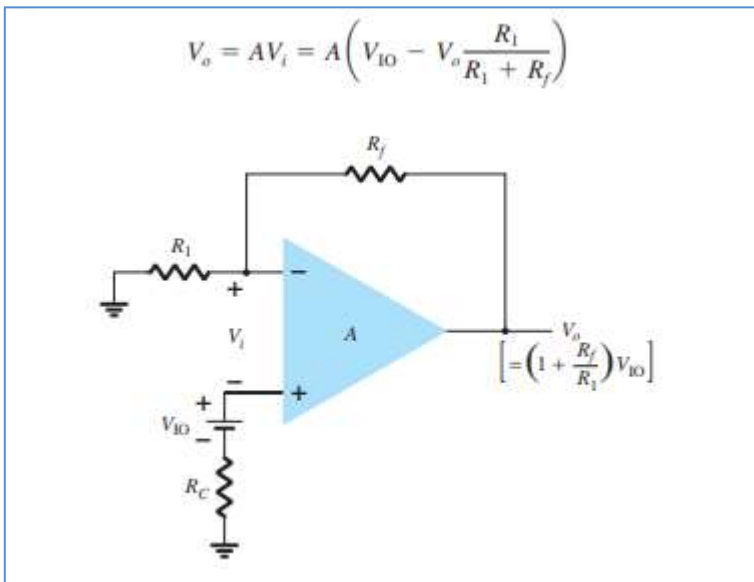
Especificaciones de amplificadores operacionales; parámetros de compensación de Cd.

Antes de abordar varias aplicaciones prácticas que utilizan amplificadores operacionales, debemos familiarizarnos con algunos de los parámetros utilizados para definir la operación de la unidad. Estas especificaciones incluyen tanto características de operación de Cd como transitorias o de frecuencia, como veremos a continuación.

Compensación de corrientes y voltajes

Aun cuando la salida de un amplificador operacional debe ser de 0 V cuando la entrada es de 0 V, en la operación real se presenta un compensación de voltaje a la salida. Por ejemplo, si se conectan 0 V a ambas entradas del amplificador operacional y luego se leen 26 mV (Cd) a la salida, esto representaría 26 mV de voltaje no deseado generado por el circuito y no por la señal de entrada. Como el usuario puede conectar el circuito amplificador para varias operaciones de ganancia y polaridad, sin embargo, el fabricante especifica una compensación de voltaje de entrada para el amplificador operacional. La compensación de voltaje de entrada y la ganancia del amplificador, tal como lo conectó el usuario, determinan la compensación de voltaje de salida.

Se puede demostrar que dos condiciones distintas en el circuito afectan la compensación de voltaje de salida: (1) una compensación de voltaje de entrada V_{IO} y (2) una compensación de corriente debido a la diferencia de las corrientes resultantes en las entradas y .

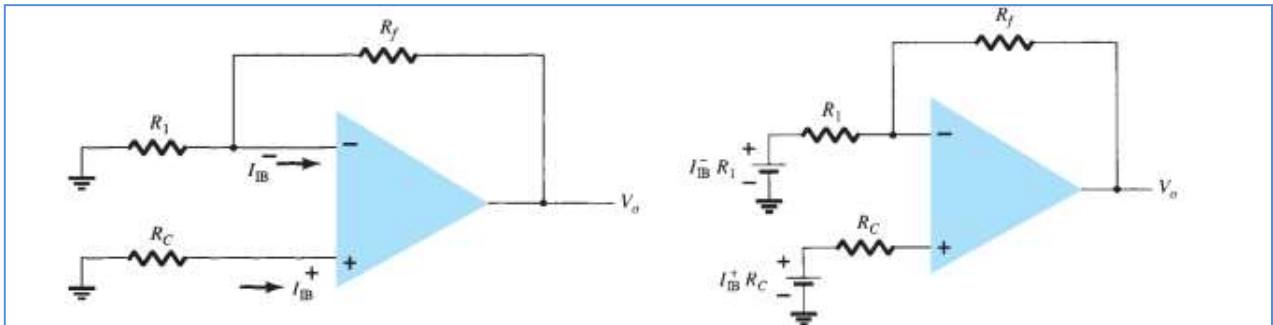


$$V_o(\text{compensación}) = V_{IO} \frac{R_1 + R_f}{R_1}$$

La ecuación anterior muestra cómo se obtiene una compensación de voltaje de salida con una compensación de voltaje de entrada especificado para una conexión de amplificador típica del amplificador operacional.

Compensación de voltaje de salida debido a la compensación de corriente de entrada

También se obtendrá una compensación de voltaje de salida a consecuencia de cualquier diferencia en las corrientes de polarización de I_b en ambas entradas. Como los dos transistores de entrada nunca coinciden con exactitud, cada uno operará con una corriente ligeramente diferente. Para una conexión de amplificador operacional, se puede determinar una compensación de voltaje de salida como sigue. Si reemplazamos las corrientes de polarización que fluyen a través de los resistores de entrada por la caída de voltaje que cada una desarrolla, podemos determinar la expresión para la compensación de voltaje



Circuitos Generadores de Formas de Onda

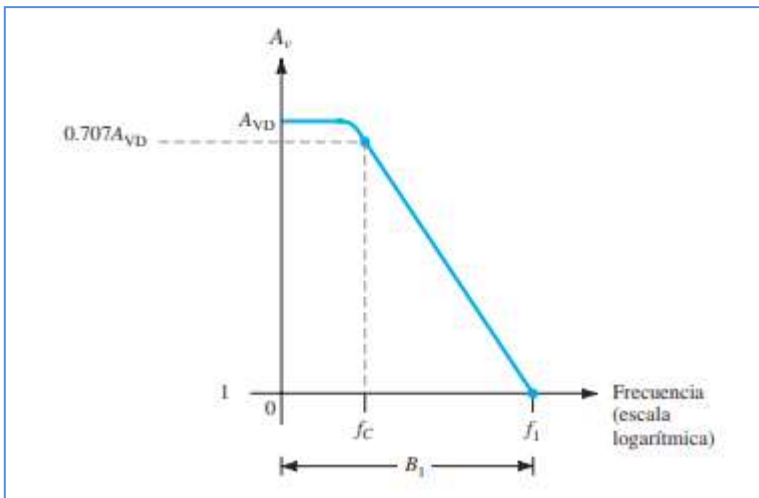
Especificaciones de amplificadores operacionales; parámetros de frecuencia

Un amplificador operacional está diseñado para que funcione como un amplificador de banda ancha de alta ganancia. Esta operación tiende a ser inestable (a oscilar) debido a la realimentación positiva. Para garantizar su operación estable, los amplificadores operacionales se construyen con una circuitería de compensación interna, que también hace que se reduzca la alta ganancia en lazo abierto al incrementarse la frecuencia. Esta reducción de la ganancia se conoce como pendiente. En la mayoría de los amplificadores operacionales, la pendiente ocurre a razón de 20 dB por década (20 dB/década) o 6 dB por octava (6 dB/octava). (Remítase al capítulo 9 por lo que se refiere a la introducción a los dB y la respuesta en frecuencia).

Observe que aunque las especificaciones del amplificador operacional incluyen una ganancia de voltaje en lazo abierto (AVD), el usuario en general conecta el amplificador operacional con resistores de realimentación para reducir la ganancia de voltaje del circuito a un valor mucho más pequeño (ganancia de voltaje en lazo cerrado, ACL). Con esta reducción de la ganancia se logran varias mejoras del circuito. En primer lugar, la ganancia de voltaje del amplificador es un valor más estable y preciso determinado por los resistores externos; en segundo lugar, la impedancia de entrada del circuito se incrementa con respecto a la del amplificador operacional solo; en tercer lugar, la impedancia de salida del circuito se reduce a partir de la del amplificador operacional solo y, por último, la respuesta en frecuencia del circuito se incrementa con respecto a la del amplificador operacional solo.

Ganancia y ancho de banda

Debido a la circuitería de compensación interna incluida en un amplificador operacional, la ganancia de voltaje se reduce a medida que se incrementa la frecuencia. Las especificaciones del amplificador operacional describen la ganancia contra el ancho de banda.



Incluye una gráfica de ganancia contra frecuencia para un amplificador típico. A baja frecuencia de operación de Cd el valor de la ganancia es el que aparece en la especificación AVD (ganancia de voltaje diferencial) del fabricante, y por lo general es un valor muy grande. A medida que se incrementa la frecuencia de la señal de entrada, la ganancia en lazo abierto se reduce hasta finalmente alcanzar el valor de 1 (unitario). El fabricante especifica la frecuencia con este valor de ganancia como el ancho de banda de ganancia unitaria, B1. Aun cuando este valor es una frecuencia a la cual la ganancia llega a ser 1, se puede considerar como un ancho de banda, puesto que la banda de frecuencia desde 0 Hz hasta la frecuencia de ganancia unitaria también es un ancho de banda. Por consiguiente, nos podríamos referir al punto en que la ganancia se reduce a 1 como frecuencia de ganancia unitaria (f_1) o como ancho de banda de ganancia unitaria (B1).

Otra frecuencia de interés, es aquella a la cual la ganancia se reduce en 3 dB (o a 0.707 de la ganancia de Cd, AVD), es decir la frecuencia de corte del amplificador operacional, f_c . En realidad, la frecuencia de ganancia unitaria y la frecuencia de corte están relacionados por:

$$f_1 = A_{VD} f_c$$

Velocidad de razón de cambio (SR)

Otro parámetro que refleja la capacidad del amplificador operacional de manejar señales variables es la velocidad de razón de cambio (Slew Rate), definida como:

Velocidad de razón de cada velocidad máxima a la cual la salida del amplificador puede cambiar en volts por microsegundo (VNms)

$$SR = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \quad \text{con } t \text{ en } \mu s$$

La velocidad de razón de cambio proporciona un parámetro que especifica la velocidad máxima de cambio del voltaje de salida cuando es excitado por un gran señal de entrada escalón*.

Si tratáramos de excitar la salida a una velocidad de cambio del voltaje mayor que la velocidad de razón de cambio, la salida no sería capaz de cambiar con suficiente rapidez y no variaría dentro del intervalo total esperado y el resultado sería el recorte o distorsión de la señal. En todo caso, la salida no sería un duplicado amplificado de la señal de entrada si se excediera la velocidad de razón de cambio del amplificador operacional.

Frecuencia máxima de la señal

La frecuencia máxima de la señal a la cual un amplificador operacional puede funcionar depende tanto del ancho de banda (BW) como de la velocidad de razón de cambio del amplificador operacional. Para una señal senoidal de forma general

Para evitar la distorsión a la salida, la velocidad de cambio también debe ser menor que la velocidad de razón de cambio, es decir.

$$2\pi fK \leq SR$$

$$\omega K \leq SR$$

$f \leq \frac{SR}{2\pi K}$	Hz
$\omega \leq \frac{SR}{K}$	rad/s

Especificación de unidades de amplificadores operacionales

En esta sección analizamos cómo se leen las especificaciones del fabricante para una unidad de amplificador operacional típico. Un amplificador operacional de circuito integrado bipolar muy aceptado es el 741, descrito por la información proporcionada. El amplificador operacional está disponible en varias cápsulas y entre las más comunes se cuentan las de dos en línea (DIP) de 8 terminales y la plana de 10 terminales.

Valores nominales máximos absolutos

Los valores nominales máximos absolutos proporcionan información sobre qué fuentes de voltaje máximos pueden usarse, cuán grande puede ser la excursión de la señal de entrada y a cuánta potencia es capaz de operar el dispositivo. Según la versión particular del amplificador 741 utilizado, el voltaje de alimentación máximo es un voltaje doble de 18 V o 22 V. Además, el circuito integrado puede disipar internamente de 310 mW a 570 mW, según el paquete de circuito integrado que se haya utilizado. Resume algunos valores típicos a usarse en ejemplos y problemas.

Valores nominales máximos absolutos

Voltaje de alimentación	±22 V
Disipación de potencia interna	500 mW
Voltaje de entrada diferencial	±30 V
Voltaje de entrada	±15 V

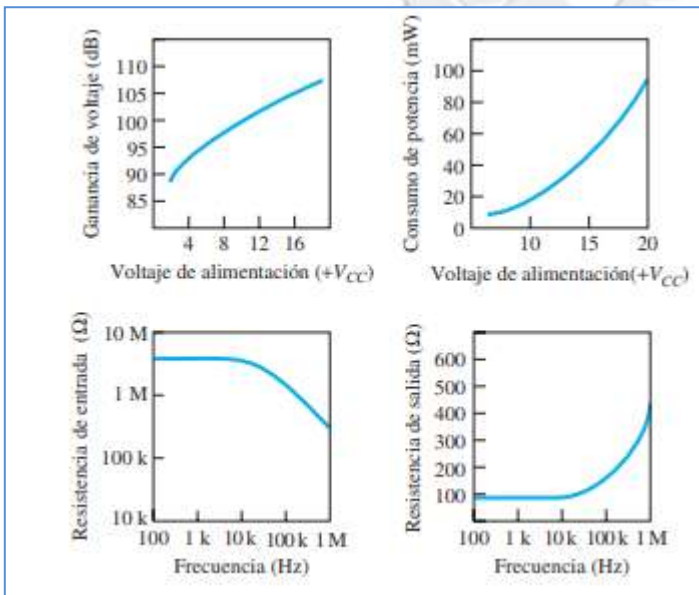
Características eléctricas

Las características eléctricas incluyen muchos de los parámetros antes descritos en este capítulo. El fabricante proporciona una combinación de valores típicos, mínimos o máximos de varios parámetros que se consideran como los más útiles.

VIO Compensación de voltaje de entrada: Esta compensación suele ser de 1 mV, pero puede llegar a ser tan alto como 6 mV. Entonces, la compensación de voltaje de salida se calcula con base en el circuito utilizado. Si la peor condición posible le es interesante, deberá utilizar el valor máximo. Los valores típicos son los más esperados cuando se utiliza el amplificador operacional.

Desempeño del amplificador operacional

El fabricante proporciona varias descripciones gráficas para describir el desempeño del amplificador operacional. Algunas curvas de desempeño típicas que comparan varias características como una función del voltaje de alimentación. Se ve que la ganancia de voltaje en lazo abierto se incrementa con un valor del voltaje de alimentación incrementado. Mientras que la información tabular anterior proporciona información con un voltaje de alimentación particular, la curva de desempeño muestra cómo se ve afectada la ganancia de voltaje cuando se utiliza un intervalo de valores de voltaje de alimentación.



Curvas de Desempeño

Otra curva de desempeño muestra cómo varía el consumo de potencia en función del voltaje de alimentación. Como se muestra, el consumo de potencia se incrementa con valores mayores de voltaje de alimentación. Por ejemplo, mientras que la disipación de potencia es de alrededor de 50 mW con 15 V, se reduce a aproximadamente 5 mW con 5 V. Otras dos curvas muestran cómo afecta la frecuencia a las resistencias de entrada y salida: la impedancia de entrada se reduce y la resistencia de salida se incrementa a frecuencias más altas.

Operación diferencial y en modo común

Una de las características más importantes de una conexión del circuito diferencial, como se da en un amplificador operacional, es la capacidad del circuito de amplificar en gran medida las señales opuestas en las dos entradas al mismo tiempo que sólo amplifica ligeramente las señales comunes a ambas entradas. Un amplificador operacional proporciona un componente de entrada que se debe a la amplificación de la diferencia de las señales aplicadas a las entradas positiva y negativa, y un componente debido a las señales comunes a ambas entradas. Como la amplificación de las señales de entrada opuestas es mucho mayor que la de las señales de entrada comunes, el circuito proporciona un rechazo en modo común como se describe por medio de un valor numérico llamado razón de rechazo en modo común (CMRR)

Entradas diferenciales

Cuando se aplican señales distintas al amplificador operacional, la diferencia de las señales resultante es la diferencia entre las dos entradas

$$V_d = V_{i1} - V_{i2}$$

Entradas comunes

Cuando las dos señales son iguales, se puede definir un elemento de señal común debido a las dos entradas para definir como el promedio de la suma de las dos señales.

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2})$$

Voltaje de salida

Como cualesquier señales aplicadas a un amplificador operacional tienen en general tantos componentes en fase como desfasados, la salida resultante se expresa como:

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c$$

Razón de rechazo en modo común

Habiendo obtenido A_d y A_c (como en el procedimiento de medición explicado), ahora podemos calcular un valor para la razón de rechazo en modo común (CMRR), la cual se define mediante la siguiente ecuación:

$$\text{CMRR} = \frac{A_d}{A_c}$$

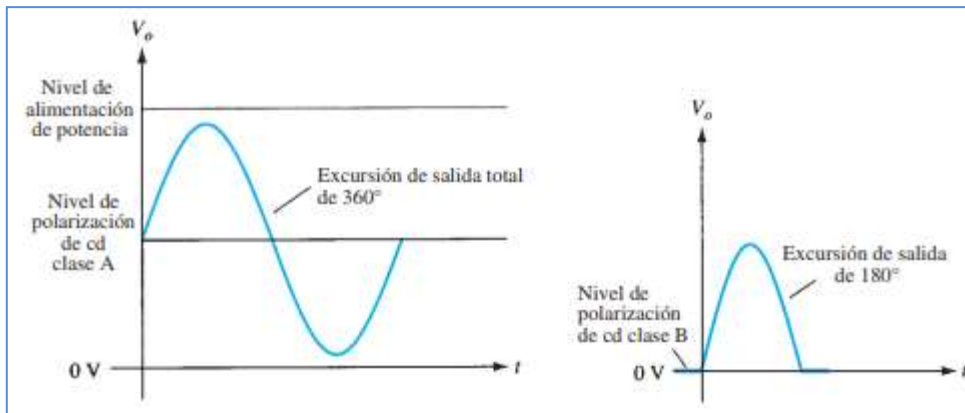
El valor de la CMRR también se puede expresar en términos logarítmicos como

$$\text{CMRR (log)} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c}$$

Circuitos Electrónicos de Potencia.

Un amplificador recibe una señal proveniente de algún transductor de detección u otra fuente de entrada, y entrega una versión amplificada de la señal a algún dispositivo de salida o a otra etapa del amplificador. En general, la señal de un transductor de entrada es pequeña (de algunos milivolts provenientes de la entrada de un reproductor de casetes, CDs o cualquier otro dispositivo de almacenamiento, o bien de una antena) y necesita ser amplificada lo suficiente para que funcione un dispositivo de salida (bocina u otro dispositivo de manejo de potencia). En amplificadores de señal pequeña, los factores principales suelen ser la linealidad de la amplificación y la magnitud de la ganancia. Como la corriente y el voltaje de la señal son pequeños en un amplificador de señal pequeña, la cantidad de capacidad de manejo de potencia y la eficiencia en relación con la potencia no son determinantes. Un amplificador de voltaje amplifica el voltaje sobre todo para incrementar el voltaje de la señal de entrada. Los amplificadores de potencia o de gran señal, por otra parte, proporcionan la suficiente potencia a una carga de salida para excitar una bocina u otro dispositivo de potencia, por lo general desde algunos watts hasta decenas de watts. En este capítulo nos concentramos en los circuitos de amplificadores que se utilizan para el manejo de señales de gran voltaje con niveles de corriente que van de moderados a altos. Las características principales de un amplificador de gran señal son la eficiencia de potencia del circuito, la máxima cantidad de potencia que el circuito es capaz de manejar y el acoplamiento de impedancia con el dispositivo de salida

Un método utilizado para categorizar amplificadores es por clase. Básicamente, las clases de amplificadores representan la cantidad de variación de la señal de salida en un ciclo de operación durante el ciclo completo de la señal de entrada. A continuación veremos una descripción breve de las clases de amplificador.



Clase A

La señal de salida varía a lo largo de los 360° del ciclo. Esto requiere que el punto Q se polarice a un nivel de modo que cuando menos la mitad de la excursión de la señal de salida pueda variar hacia arriba y hacia abajo sin que llegue a ser un voltaje suficientemente alto como para ser limitado por el nivel de alimentación de voltaje, o demasiado bajo como para que se aproxime al nivel de alimentación bajo, o 0 V en esta descripción.

Clase B

Un circuito clase B proporciona una señal que varía durante la mitad del ciclo de la señal de entrada, o durante 180° de la señal. El punto de polarización de Cd de la clase B es por consiguiente de 0 V, con la salida que varía entonces a partir de este punto de polarización durante medio ciclo. Obviamente, la salida no es una reproducción fiel de la entrada si sólo hay un semiciclo. Se requieren dos operaciones de clase B: una para que proporcione una salida en el semiciclo de salida positiva y la otra para que haya operación en el semiciclo de salida negativa. Entonces, los semiciclos combinados proporcionan salida durante los 360° de operación. Este tipo de conexión se conoce como operación equilibrada (push-pull), la cual analizaremos más adelante en este capítulo. Observe que la operación B por sí misma crea una señal de salida muy distorsionada, puesto que la reproducción de la entrada ocurre durante sólo 180° de la excursión de la señal de salida.

Clase AB

Un amplificador se puede polarizar a un nivel de Cd sobre el nivel de corriente de base cero de la clase B y por sobre la mitad del nivel de voltaje de alimentación de la clase A; esta condición de polarización es la clase AB. No obstante, la operación clase AB requiere una conexión push-pull para lograr un ciclo completo de salida, pero el nivel de polarización de Cd suele estar más cerca del nivel de corriente de base cero para una mejor eficiencia de la potencia, como se describirá en breve. Para la operación clase AB, la excursión de la señal de salida ocurre entre 180° y 360° y no es ni operación clase A ni operación clase B.

Clase C

La salida de un amplificador clase C se polariza para que opere a menos de 180° del ciclo y funcionará sólo con un circuito sintonizado (resonante), el cual proporciona un ciclo completo de operación a la frecuencia sintonizada o resonante. Por consiguiente, esta clase de operación se utiliza en áreas especiales de circuitos sintonizados, como radio o comunicaciones.

Clase D

Esta clase de operación es una forma de un amplificador que utiliza señales de pulsos (digitales), las cuales se activan durante un intervalo corto y se desactivan durante un intervalo más largo. La aplicación de técnicas digitales permite obtener una señal que varíe durante el ciclo completo (mediante circuitos de muestreo y retención) para recrear la salida de muchas piezas de la señal de entrada. La ventaja principal de la operación clase D es que el amplificador se “activa” (utilizando potencia) sólo durante intervalos cortos y la eficiencia total puede ser prácticamente muy alta, como se describe a continuación.

Eficiencia de un amplificador

La eficiencia de potencia de un amplificador, definida como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada, mejora (se hace mayor) cuando va de la clase A la clase D. En términos generales, vemos que un amplificador clase A, con polarización de I_{CQ} a la mitad del nivel del voltaje de alimentación, utiliza bastante potencia para mantener la polarización, incluso sin señal de entrada aplicada. Lo anterior da como resultado una eficiencia muy pobre, en especial con señales de entrada pequeñas, cuando se suministra muy poca potencia de I_{CQ} a la carga. En realidad, la eficiencia máxima de un circuito de clase I_{CQ} , la cual ocurre durante la excursión

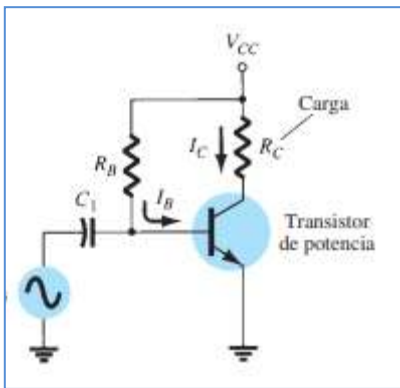
	A	AB	Clase B	C	D
Ciclo de operación	360°	180° a 360°	180°	Menos de 180°	Operación pulsante en general más de 90%
Eficiencia de potencia	25% to 50%	Entre 25% (50%) y 78.5%	78.5%		

De corriente y voltaje máxima, es de sólo 25% con una conexión de carga directa o alimentado en serie, y de 50% con una conexión de transformador con la carga. Se puede demostrar que la operación clase B con potencia de polarización de I_{CQ} , sin señal de entrada, proporciona una eficiencia máxima de 78.5%. La operación clase D puede alcanzar una eficiencia de potencia de más de 90% y es la operación más eficiente de todas las clases de operación. Como la clase AB se encuentra entre las clases A y B en cuanto a polarización, también cae entre sus valores de eficiencia: entre 25% (o 50%) y 78.5%. La tabla anterior resume la operación de las diversas clases de amplificadores. Esta tabla proporciona una comparación relativa de la operación del ciclo de salida y la eficiencia de potencia de los diversos tipos de clases. En la operación clase B, una conexión push-pull se obtiene o con un acoplamiento de transformador o mediante una operación en simetría complementaria (o casi complementaria) con transistores npn y pnp para proporcionar operación en ciclos de polaridad opuesta. Aun cuando la operación con transformador proporciona señales en ciclos opuestos, el transformador en sí mismo es bastante grande en muchas aplicaciones. Un circuito sin transformador que utiliza transistores en simetría complementaria opera de

la misma manera en un paquete mucho más pequeño. Más adelante en este capítulo se dan ejemplos y circuitos

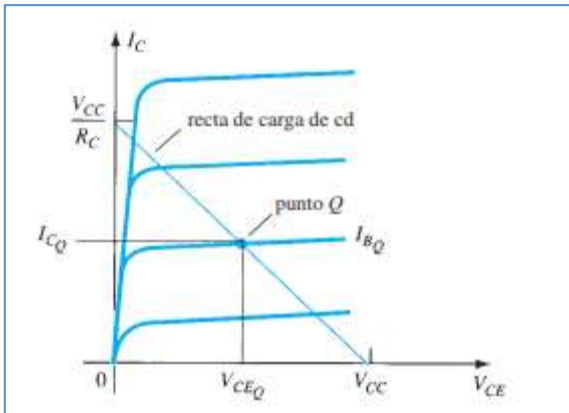
Amplificador clase A alimentado en serie

Podemos utilizar la conexión de circuito de polarización fija para analizar las características principales de un amplificador clase A alimentado en serie. Las únicas diferencias entre este circuito y la versión de señal pequeña ya antes considerada son que las señales manejadas por el circuito de gran señal se encuentran en el orden de volts, y el transistor utilizado es un transistor de potencia que es capaz de operar en un rango que va desde algunos watts hasta decenas. Como se demostrará en esta sección, este circuito no es el mejor a utilizar como amplificador de señal grande debido a su baja eficiencia de potencia. En general, la beta de un transistor de potencia es menor de 100, el circuito de amplificador total que utiliza transistores de potencia capaces de manejar grandes cantidades de corriente o potencia aunque no proporcionen mucha ganancia de voltaje



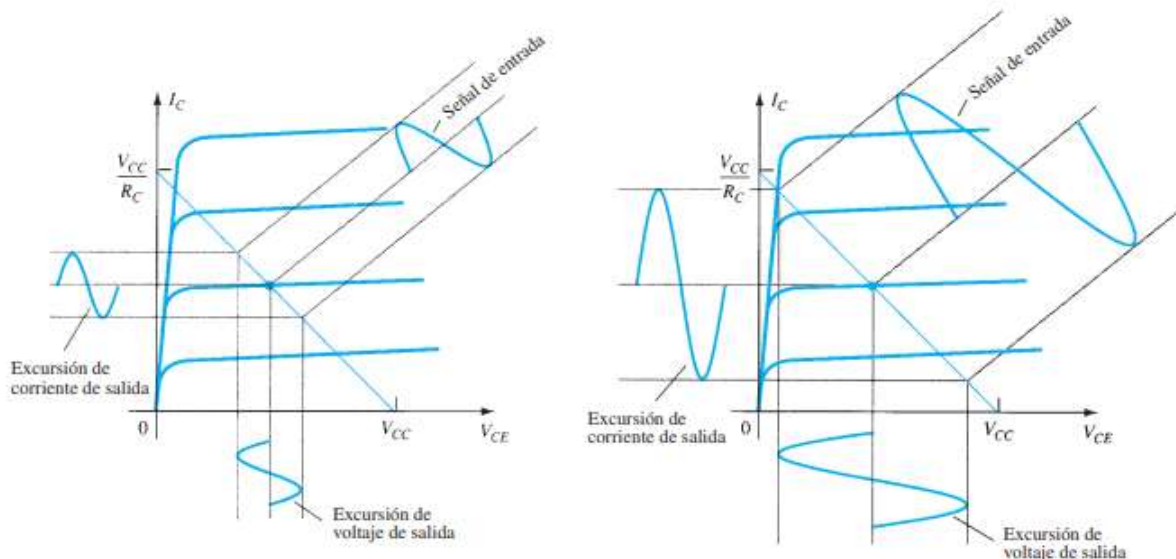
Operación con polarización de Cd

Para apreciar la importancia de la polarización de Cd en la operación del amplificador de potencia, considere la característica de colector. Se traza una recta de carga de Cd con los valores de VCC y RC. La intersección del valor de polarización de Cd de IB con la recta de carga de Cd determina entonces el punto de operación (punto Q) para el circuito. Los valores de punto quiescente son los calculados con las ecuaciones. Si la corriente de colector de polarización de Cd se establece a la mitad de la posible excursión de la señal (entre 0 y), se podrá dar la máxima excursión de la corriente de colector. Además, si el voltaje quiescente de colector a emisor se establece a la mitad del voltaje de alimentación, será posible la mayor excursión del voltaje. Con el punto Q establecido en este punto de polarización óptima, las consideraciones de potencia para el circuito se determinan como se describe a continuación.



Operación en ca

Quando se aplica una señal de entrada de ca al amplificador, la salida variará a partir de su voltaje y corriente de operación de polarización de Cd. Una señal de entrada pequeña hará que la corriente de base varíe por arriba y por debajo del punto de polarización de Cd, la cual hará entonces que la corriente de colector (salida) varíe a partir del punto de polarización de Cd establecido, así como también que el voltaje de colector a emisor varíe en torno a su valor de polarización de Cd. A medida que la señal de entrada se haga más grande, la salida variará aún más en torno al punto de polarización de Cd establecido hasta que la corriente o el voltaje alcancen una condición limitante. Para la corriente, esta condición limitante es o una corriente cero en el extremo bajo, o en el extremo alto de su excursión. Para el voltaje de colector a emisor, el límite es o bien 0 V o el voltaje de alimentación, VCC



Consideraciones sobre la potencia

La potencia que entra a un amplificador la proporciona la fuente. Sin señal de entrada, la corriente de Cd absorbida es la corriente de polarización de colector. Por tanto, la potencia extraída de la fuente es

$$P_i(\text{cd}) = V_{CC}I_{CQ}$$

Incluso con una señal de ca aplicada, la corriente promedio extraída de la fuente no cambia, de modo que la ecuación anterior representa la potencia de entrada suministrada al amplificador clase A alimentado en serie.

Potencia de salida

La corriente y voltaje de salida que varían alrededor del punto de polarización entregan potencia de ca a la carga. Esta potencia de ca se suministra a la carga RC. La señal de ca Vi hace que la corriente de base varíe alrededor de la corriente de polarización de Cd y que la corriente de colector lo haga alrededor de su nivel quiescente ICQ. La señal de entrada de ca genera señales de corriente y voltaje de ca. Cuanto más grande es la señal de entrada mayor es la excursión de salida, hasta el valor máximo establecido por el circuito. La potencia de ca entregada a la carga se expresa de diferentes maneras.

$$P_o(\text{ca}) = V_{CE(\text{rms})}I_C(\text{rms})$$

$$P_o(\text{ca}) = I_C^2(\text{rms})R_C$$

$$P_o(\text{ca}) = \frac{V_C^2(\text{rms})}{R_C}$$

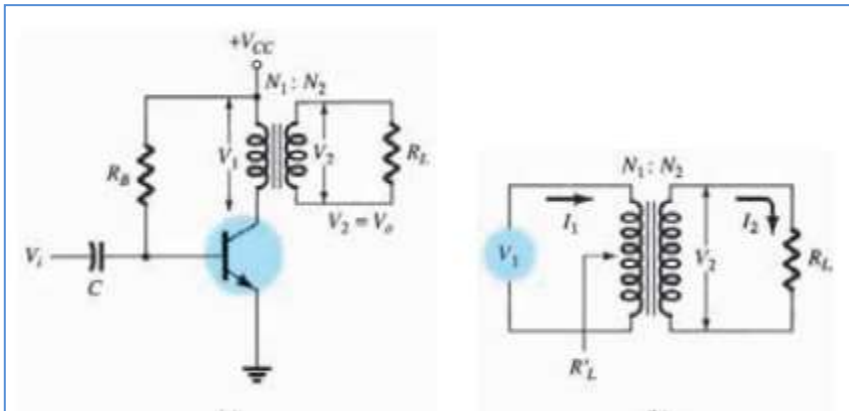
Eficiencia

La eficiencia de un amplificador representa la cantidad de potencia de ca suministrada (transferida) desde la fuente de Cd. La eficiencia del amplificador se calcula con

$$\% \eta = \frac{P_o(\text{ca})}{P_i(\text{cd})} \times 100\%$$

Amplificador clase a acoplado por transformador

Una forma de amplificador clase A con eficiencia máxima de 50% utiliza un transformador para acoplar la señal de salida a la carga. Ésta es una forma de circuito simple que utilizaremos para presentar algunos conceptos. Más adelante estudiaremos la mayoría de las versiones de circuito prácticos. Dado que el circuito utiliza un transformador para escalar el voltaje o la corriente, a continuación repasaremos la elevación y reducción de voltaje y corriente.



Acción de transformador

Un transformador puede elevar o reducir los niveles de voltaje y corriente, de acuerdo con la relación de vueltas, como explicaremos a continuación. Además, la impedancia conectada a un lado de un transformador puede hacerse que aparezca o más grande o más pequeña (elevada o reducida) en el otro lado del transformador, dependiendo del cuadrado de la relación de vueltas de los devanados del transformador. El siguiente análisis supone una transferencia de potencia ideal (100%) del primario al secundario; es decir, no se consideran pérdidas de potencia.

Transformación de voltaje

El transformador puede elevar o reducir un voltaje aplicado a un lado directamente como la relación de vueltas (o número de devanados) en cada lado. La transformación del voltaje la da

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

La ecuación muestra que si el número de vueltas de alambre en el secundario es mayor que el número de vueltas en el primario, el voltaje en el secundario es mayor que el voltaje en el primario

Transformación de corriente

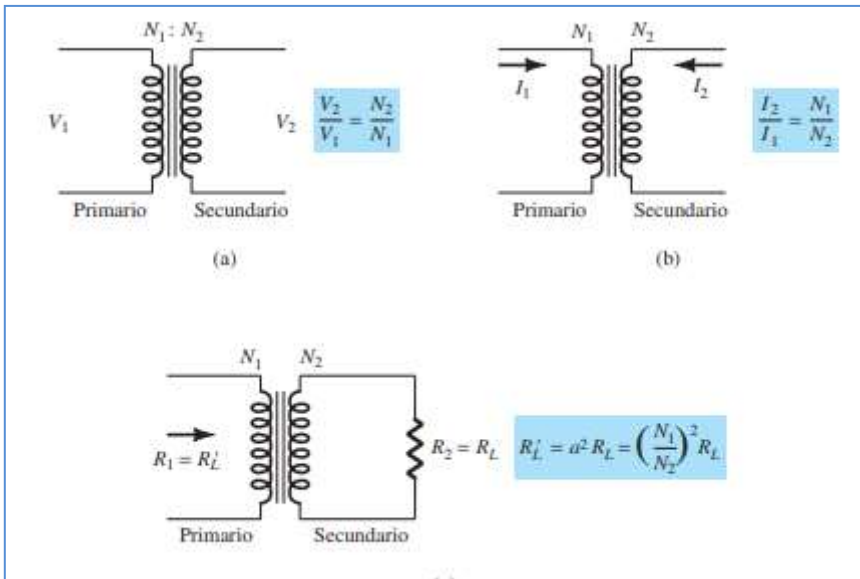
La corriente en el devanado secundario es inversamente proporcional al número de vueltas en los devanados. La transformación de corriente la da

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Si el número de vueltas de alambre en el secundario es mayor que en el primario, la corriente en el secundario será menor que en el primario

Transformación de impedancia

Como un transformador puede cambiar el voltaje o la corriente, también se puede cambiar una impedancia “vista” desde cualquiera de los dos lados (primario O SECUNDARIA)



Operación de una etapa de amplificación

Recta de carga de Cd

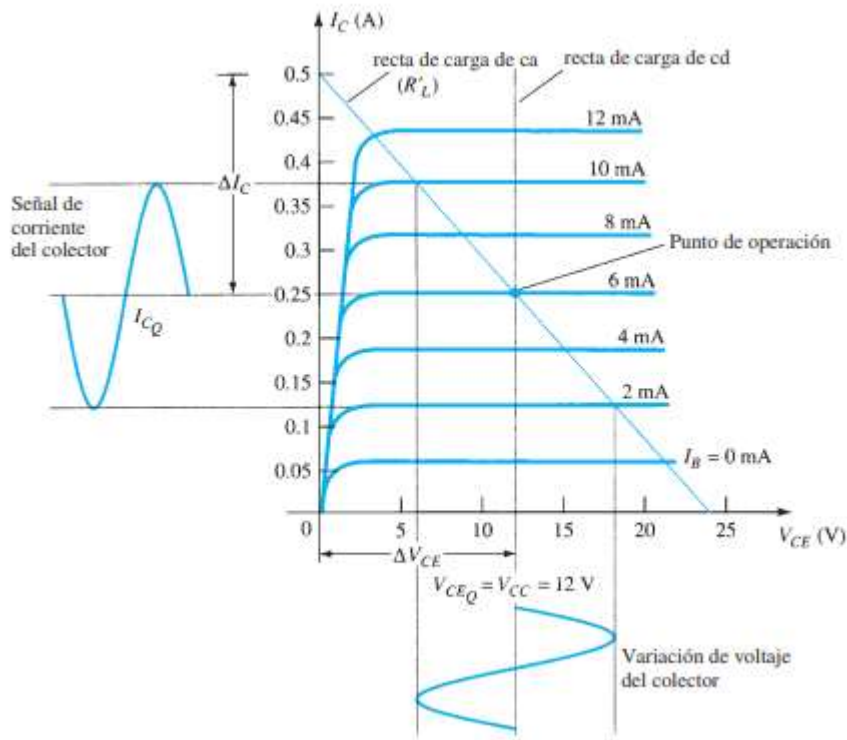
La resistencia del devanado (Cd) de un transformador determina la recta de carga de Cd para el circuito de. En general, esta resistencia de Cd es pequeña (idealmente de $0 \text{ } \Omega$) y, una recta de carga de Cd de $0 \text{ } \Omega$ es una línea recta vertical. La resistencia del devanado de un transformador práctico sería de algunos ohms, pero en este análisis sólo consideraremos el caso ideal. No hay caída de voltaje de Cd a través de la resistencia de carga de Cd de $0 \text{ } \Omega$, y la recta de carga se traza verticalmente recta a partir del punto de voltaje

Punto de operación quiescente

El punto de operación en la curva de características, se obtiene gráficamente en el punto de intersección de la recta de carga de Cd y la corriente de base establecida por el circuito. La corriente quiescente de colector se obtiene entonces a partir del punto de operación. En operación clase A, tenga en cuenta que el punto de polarización de Cd establece las condiciones para la excursión de la señal no distorsionada máxima tanto de la corriente de colector como del voltaje de colector a emisor. Si la señal de entrada origina una excursión de voltaje menor que la máxima posible, la eficiencia del circuito en ese momento será menor que 25%. Por consiguiente, el punto de polarización de Cd es importante al establecer la operación de un amplificador clase A alimentado en serie

Recta de carga de ca

Para realizar un análisis de ca, es necesario calcular la resistencia de carga de ca “vista” al examinar el lado primario del transformador, y luego trazar la recta de carga de ca en la característica de colector. El valor de la carga conectada a través del secundario y la relación de vueltas del transformador. La técnica del análisis gráfico procede entonces como sigue. Trace la recta



Eficiencia

Hasta ahora hemos considerado calcular la potencia de ca entregada a la carga. A continuación consideramos la potencia de entrada de la batería, las pérdidas de potencia en el amplificador y la eficiencia de potencia total del amplificador clase A acoplado por transformador. La potencia (Cd) de entrada producida por la fuente se calcula a partir del voltaje de alimentación de Cd y la potencia promedio extraída de la fuente:

$$P_i(\text{cd}) = V_{CC} I_{CQ}$$

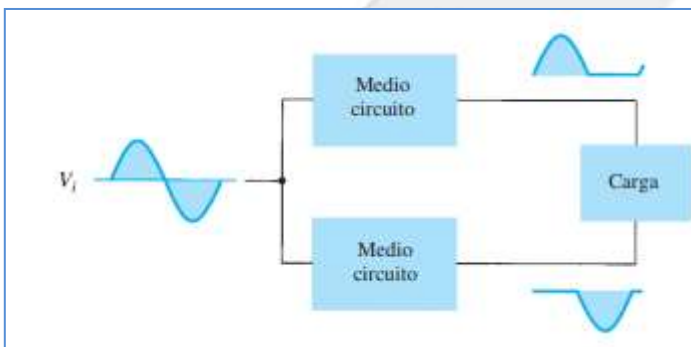
Para el amplificador acoplado por transformador, la potencia disipada por éste es pequeña (debido a la resistencia mínima de Cd de una bobina) y la omitiremos en estos cálculos. Así pues, la única pérdida de potencia considerada en este caso es la disipada por el transistor de potencia y calculada con

$$P_Q = P_i(\text{cd}) - P_o(\text{ca})$$

Donde PQ es la potencia disipada como calor. Aunque la ecuación es simple, no obstante es significativa cuando se opera un amplificador clase A. La cantidad de potencia disipada por el transistor es la diferencia entre la extraída de la fuente de Cd (establecida por el punto de polarización) y la cantidad entregada a la carga de ca. Cuando la señal de entrada es muy pequeña, con muy poca potencia de ca entregada a la carga, la potencia máxima es la disipada por el transistor. Cuando la señal de entrada es grande y la potencia entregada a la carga también lo es, el transistor disipa menos potencia. En otras palabras, el transistor de un amplificador clase A tiene que trabajar más duro (disipar casi toda la potencia) cuando se desconecta la carga del amplificador y el transistor disipa el mínimo de potencia cuando la carga extrae la potencia máxima del circuito.

Operación de un amplificador clase b

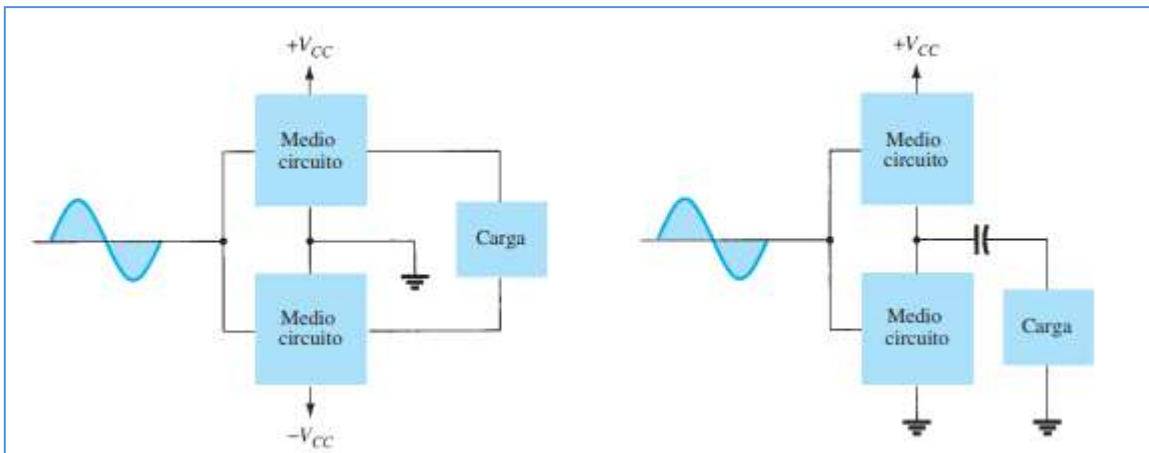
La operación clase B se da cuando la polarización de Cd deja el transistor polarizado apagado; el transistor se enciende cuando se aplica la señal de ca. Esto en esencia no es polarización, y el transistor conduce corriente de sólo la mitad del ciclo de la señal. Para obtener salida durante el ciclo completo de la señal se requieren dos transistores y hacer que cada uno conduzca durante semiciclos opuestos; la operación combinada completa un ciclo de la señal de salida. Como una parte del circuito empuja (push) la señal hacia arriba durante medio ciclo y la otra parte jala (pull) la señal hacia abajo durante el otro semiciclo, el circuito se conoce como circuito push-pull. Un diagrama de la operación push-pull. Se aplica una señal de entrada de ca al circuito push-pull, con cada una de las mitades operando durante semiciclos alternos, ya carga recibe entonces una señal durante el ciclo completo de ca. Los transistores de potencia utilizados en el circuito push-pull son capaces de suministrar la potencia deseada a la carga, y la operación clase B de estos transistores proporciona una mayor eficiencia que la que era posible con un solo transistor en la operación clase A



Potencia de entrada (Cd)

La potencia entregada a la carga por un amplificador se extrae de la fuente de alimentación (o fuentes de alimentación; proporciona la entrada o potencia de Cd. La cantidad de esta potencia de entrada se calcula con

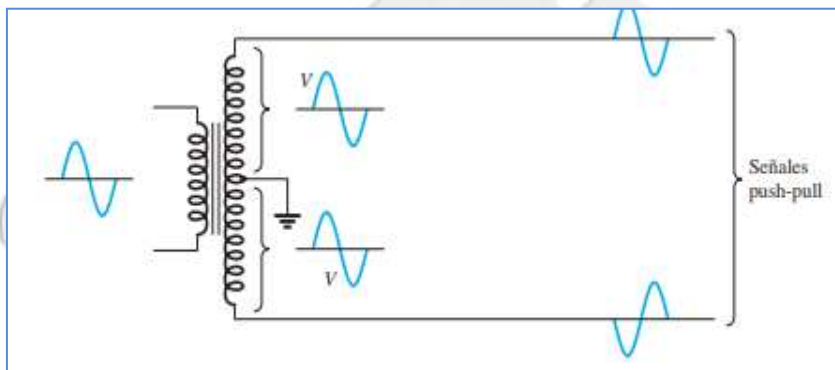
$$P_i(\text{cd}) = V_{CC}I_{cd}$$



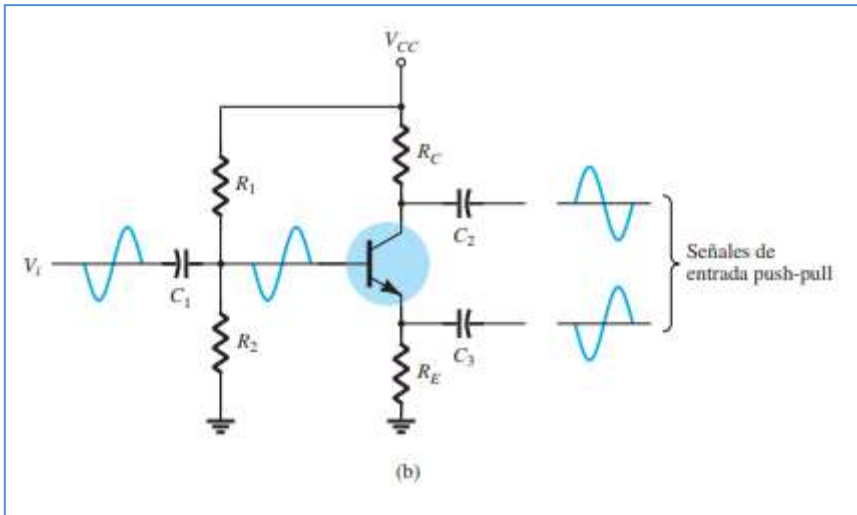
Circuitos del amplificador clase b

Hay varias configuraciones posibles de circuito para obtener operación clase B. En esta sección consideraremos las ventajas y desventajas de varios de los circuitos de más uso. Las señales de entrada al amplificador podrían ser una señal única, y entonces el circuito proporcionaría dos etapas de salida diferentes, cada una operando durante la mitad del ciclo. Si la entrada está en la forma de dos señales de polaridad opuesta, podríamos utilizar dos etapas similares, con cada una operando en el ciclo alterno debido a la señal de entrada. Una forma de invertir la polaridad o fase es utilizar un transformador y durante mucho tiempo se ha preferido el amplificador acoplado por transformador.

Diferentes de obtener señales de fase invertida a partir de una sola señal de entrada.



Un transformador con derivación central para proporcionar señales de fase opuesta.



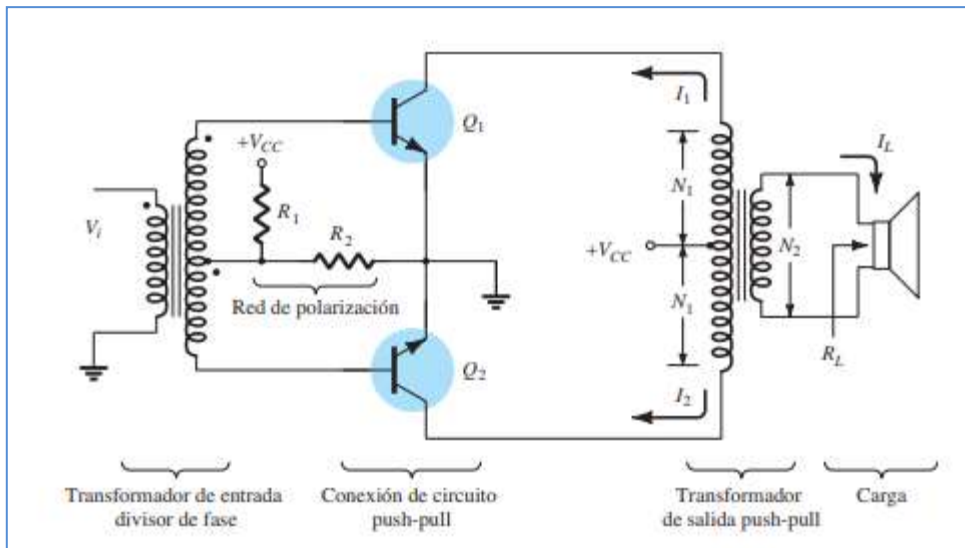
Si el transformador es exactamente de derivación central, las dos señales son de igual manera de fase opuesta de la misma magnitud.

Utiliza una etapa de BJT con salida en fase por el emisor y salida de fase opuesta por el colector. Si la ganancia es de casi 1 para cada salida, se obtiene la misma magnitud. Probablemente lo más común sería utilizar etapas de amplificador operacional, una para proporcionar ganancia unitaria invertida y la otra una ganancia unitaria sin inversión de fase, para proporcionar dos salidas de la misma magnitud pero de fase opuesta

Circuitos push-pull acoplados por transformador

Un transformador con derivación central para producir señales de polaridad opuesta a las entradas de dos transistores y un transformador de salida para excitar la carga en un modo de operación push-pull que describimos a continuación.

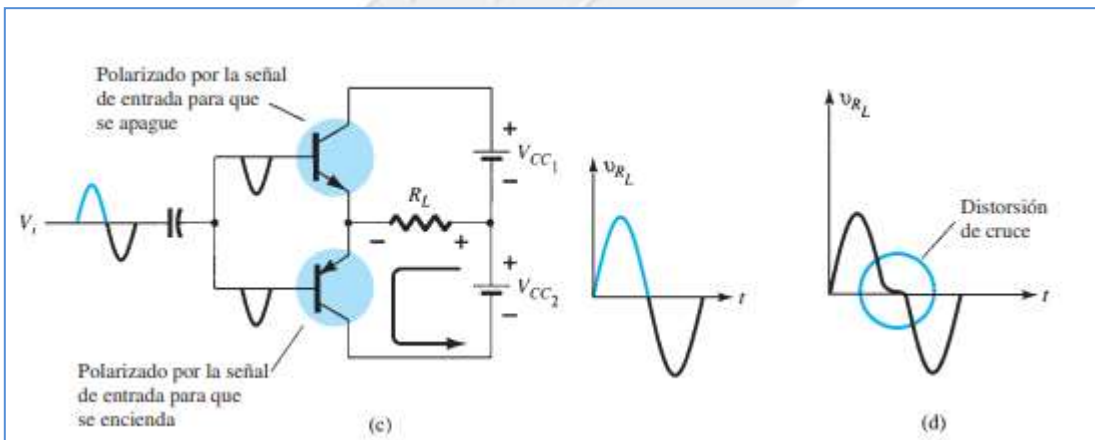
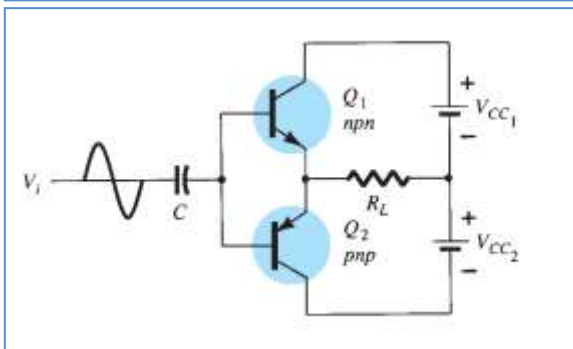
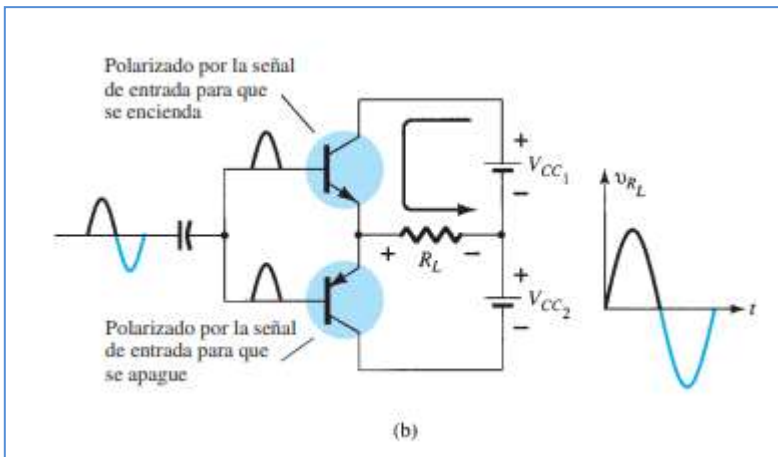
Durante el primer semiciclo de operación, se hace que el transistor Q1 conduzca, en tanto que el transistor Q2 se apaga. La corriente I1 a través del transformador da como resultado el primer semiciclo de la señal entregada a la carga. Durante el segundo semiciclo de la señal de entrada, Q2 conduce, en tanto que Q1 permanece apagado, y la corriente I2 a través del transformador produce el segundo semiciclo de la carga. Entonces toda la señal desarrollada a través de la carga varía durante el ciclo completo de la operación de la señal.



Circuitos de simetría complementaria

Al usar transistores complementarios (nnp y pnp) podemos obtener una salida de ciclo completo a través de una carga con los semiciclos de operación de cada transistor. En tanto se aplique una sola señal de entrada a la base de ambos transistores de tipo opuesto, conducirán durante los semiciclos opuestos de la entrada. El transistor npn se polarizará para que conduzca por el semiciclo positivo de la señal, con un semiciclo de la señal a través de la carga. Durante el semiciclo negativo de la señal, el transistor pnp se polariza para que conduzca cuando la entrada se haga negativa.

Durante un ciclo completo de entrada, a través de la carga se desarrolla un ciclo completo de la señal de salida. Una desventaja del circuito es que necesita dos fuentes de voltaje distintas. Otra menos obvia con el circuito complementario se muestra en la distorsión de cruce en la señal de salida. El término distorsión de cruce se refiere a que durante el cruce de la señal de positiva a negativa (o viceversa) no hay linealidad en la señal de salida. Esto se deriva de que el circuito no proporciona una conmutación exacta de un transistor apagado y del otro encendido en la condición de voltaje cero. Ambos transistores pueden estar parcialmente apagados, de modo que el voltaje de salida no sigue la entrada en torno a la condición de voltaje cero. La polarización de los transistores en la clase B mejora esta operación al polarizar ambos transistores para que permanezcan encendidos durante más de medio ciclo

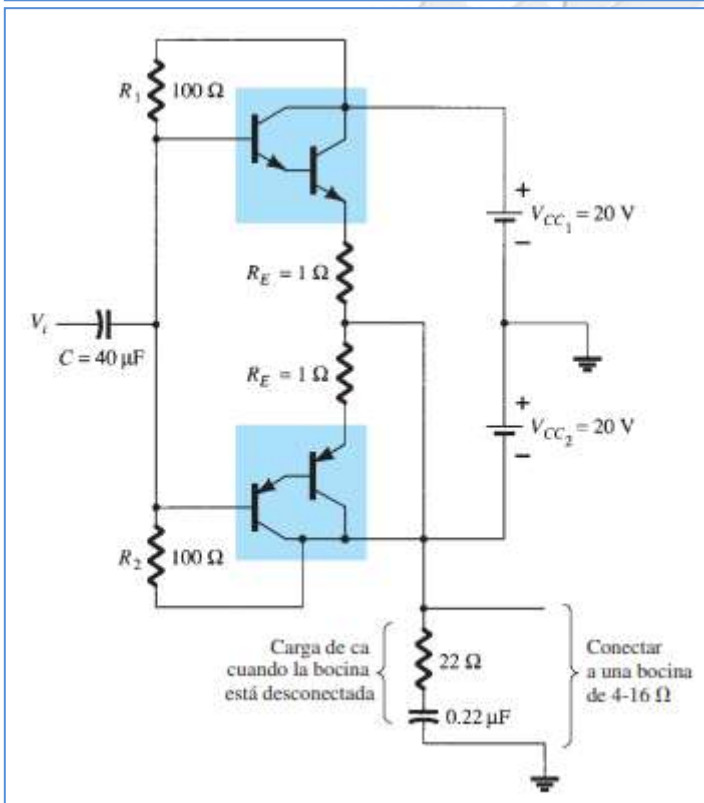
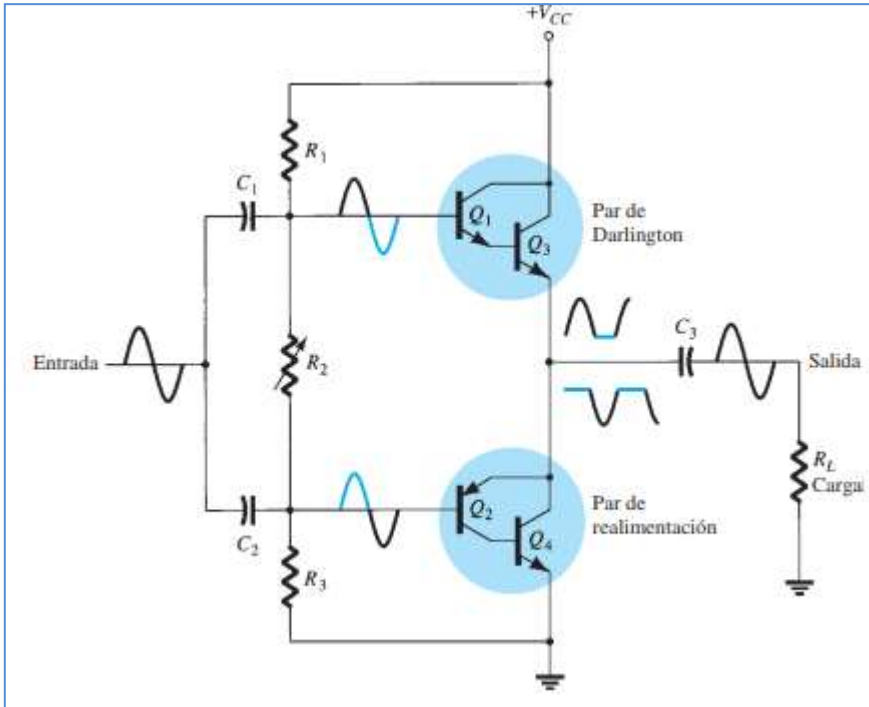


Observe que la carga se excita como la salida de un emisor seguidor, de modo que la resistencia de la carga es igual a la baja resistencia de salida de la fuente de control. El circuito utiliza transistores de conexión Darlington complementarios para proporcionar una alta corriente de salida y una baja resistencia de salida.

Amplificador push-pull casi complementario

En circuitos de amplificador de potencia prácticos, es preferible utilizar transistores npn para ambos dispositivos de alta corriente de salida. Como la conexión push-pull requiere dispositivos

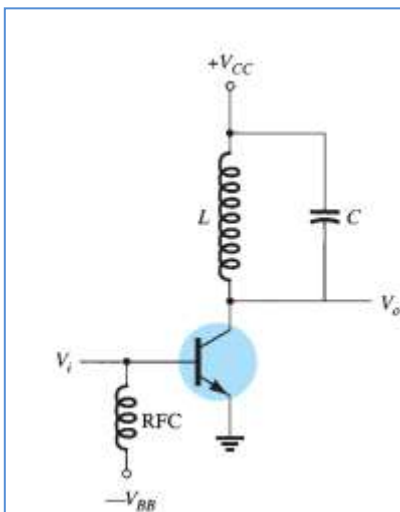
complementarios, se debe utilizar un transistor pnp de alta potencia. Una forma práctica de obtener operación complementaria al utilizar los mismos transistores npn apareados a la salida



La proporciona un circuito casi complementario. La operación push-pull se logra por medio de transistores complementarios (Q1 y Q2) antes de los transistores concordantes npn de salida (Q3 y Q4). Observe que los transistores Q1 y Q3 forman una conexión Darlington que proporciona salida a través de un emisor seguidor de baja impedancia. La conexión de los transistores Q2 y Q4 forma un par de realimentación, cuya semejanza proporciona un control de baja impedancia a la carga. El resistor R2 se puede ajustar para reducir al mínimo la distorsión de cruce con la condición de polarización de Cd. La señal de entrada única aplicada a la etapa push-pull produce entonces una salida de ciclo completo para la carga. El amplificador push-pull casi complementario es la forma más usual de amplificador de potencia.

Amplificadores clase c y clase d

Aunque los amplificadores clase A, clase AB y clase B se utilizan más como amplificadores de potencia, los amplificadores clase D son bastante requeridos por su muy alta eficiencia. Los amplificadores clase C, aunque no se utilizan como amplificadores de audio, sí se utilizan tanto en circuitos sintonizados como en sistemas de comunicaciones.



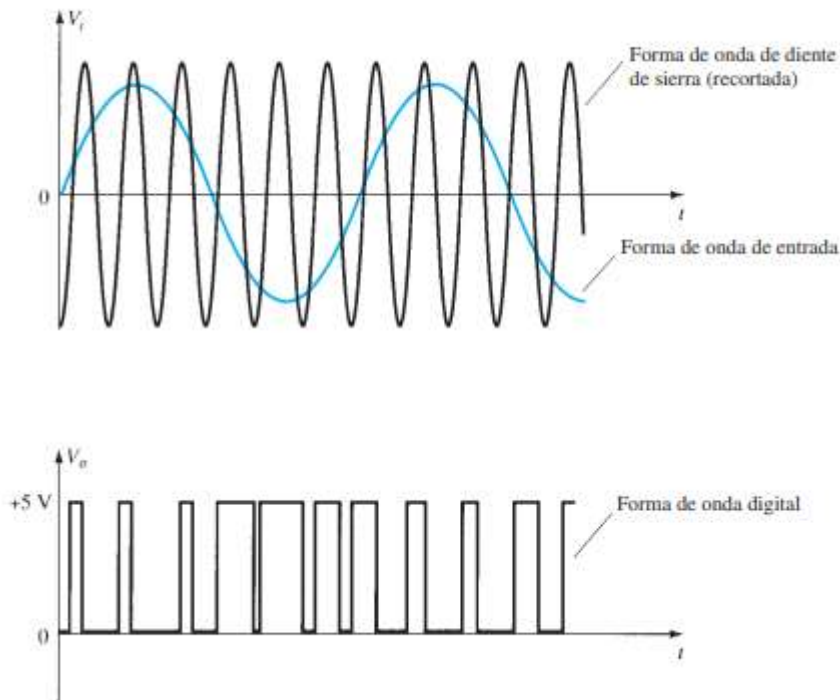
Amplificador clase C

Un amplificador clase C, se polariza para que opere a menos de 180° del ciclo de la señal de entrada. El circuito sintonizado en la salida, sin embargo, proporcionará un ciclo completo de la señal de salida a la frecuencia fundamental o resonante del circuito sintonizado (circuito tanque L y C) de la salida. Por consiguiente, este tipo de operación está limitado en su uso a una frecuencia fija, como ocurre en un circuito de comunicaciones, por ejemplo. La operación de un circuito clase C no está pensada para amplificadores de potencia o de gran señal.

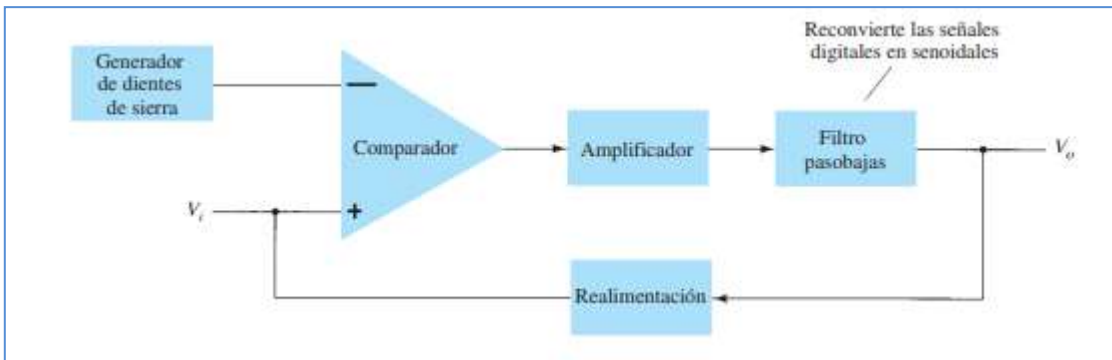
Amplificador clase D

Un amplificador clase D está diseñado para que opere con señales digitales o de pulsos. Con este tipo de circuito se logra una eficiencia de más de 90%, lo que lo hace bastante deseable en amplificadores de potencia. Se necesita, sin embargo, convertir cualquier señal de entrada en una forma de onda pulsante antes de utilizarla para excitar una carga de gran potencia y luego volver a convertir la señal en una señal

senoidal a fin de recuperar la señal original. Se puede convertir una señal senoidal en una señal de pulsos con alguna forma de onda de diente de sierra o recortada, para que se aplique junto con la entrada a un circuito de amplificador operacional tipo comparador, de modo que se produzca una señal de pulso representativa. Aunque se utiliza la letra D para describir el siguiente tipo de operación de polarización después de la clase C, la D también podría significar “Digital”, puesto que tal es la naturaleza de las señales proporcionadas al amplificador clase D.



Un diagrama de bloques de la unidad requerida para amplificar la señal clase D y luego convertirla de nuevo en una señal senoidal mediante un filtro paso bajas. Como los dispositivos transistorizados de los amplificadores utilizados para generar la salida están básicamente apagados o encendidos, proporcionan corriente sólo cuando están encendidos, con poca pérdida de potencia por su bajo voltaje de “encendido”. Como la mayor parte de la potencia aplicada al amplificador se transfiere a la carga, la eficiencia del circuito en general es muy alta. Los dispositivos de potencia MOSFET han sido los preferidos como dispositivos de control del amplificador clase D.



Análisis por Computadora

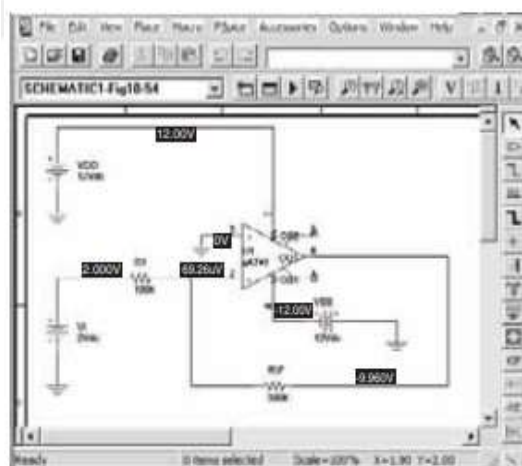
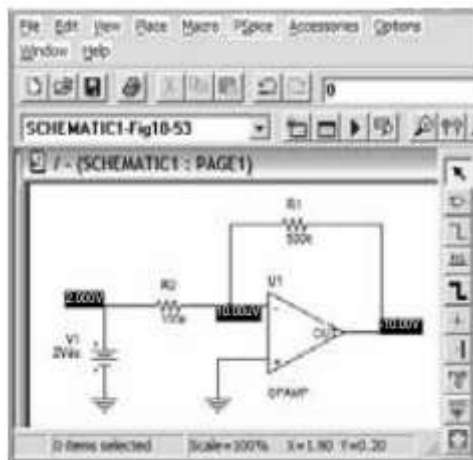
Se realizarán diferentes simulaciones PSpice para Windows

Programa 1

Amplificador operacional inversor

Primero se considera el amplificador inversor. Con el despliegado del voltaje en encendido en la pantalla, el resultado después de ejecutar un análisis muestra que para una entrada de 2 V y una ganancia de 5

La entrada a la terminal negativa es de 50.01 mV, la cual es virtualmente tierra, o 0 V. a continuación aparece dibujado un circuito de amplificador operacional inversor práctico. Utilizando los mismos valores de resistor, con una unidad de amplificador operacional práctico, el obtenemos la salida resultante de 9.96 V, cercana al valor ideal de 10 V. Esta leve diferencia con respecto al valor ideal se debe a la ganancia y la impedancia de entrada reales de la unidad del amplificador operacional.



Antes de realizar el análisis, al seleccionar el menú Analysis Setup, Transfer Function y luego las opciones Output de V (RF: 2) e Input Source de Vi obtendremos las características de señal pequeña en la lista de resultados. Se ve que la ganancia del circuito es

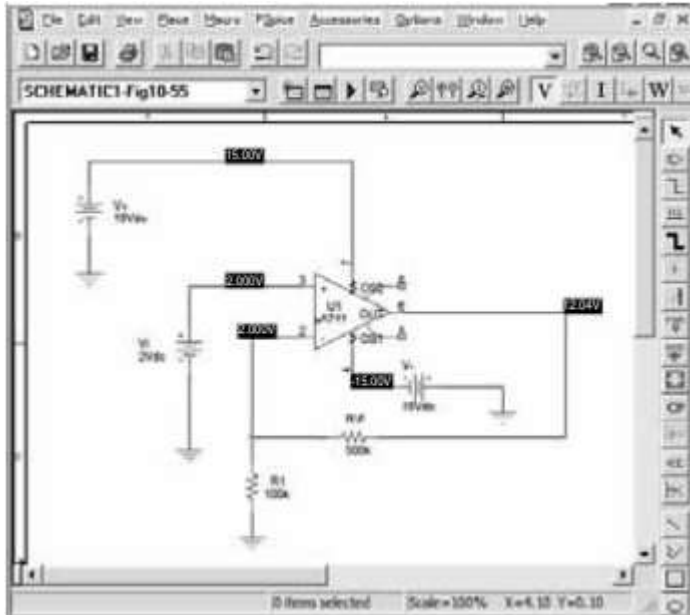
$$V_o/V_i = -5$$

Programa 2

Amplificador operacional no inversor

Un circuito de amplificador operacional no inversor. En la figura se muestran los voltajes de polarización. La ganancia teórica del circuito del amplificador debe ser

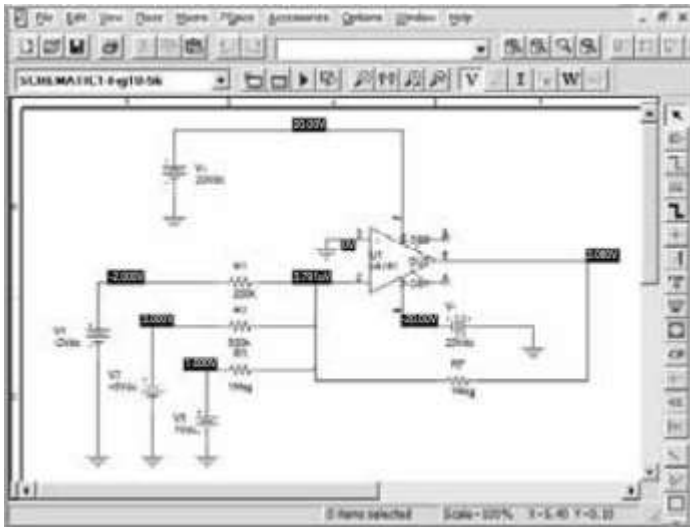
$$V_o = A_v V_i = 5(2 \text{ V}) = 10 \text{ V}$$



Programa 3

Circuito de amplificador operacional sumador

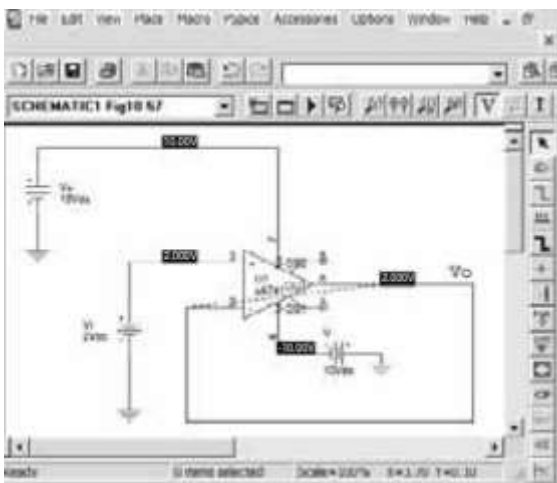
Un amplificador operacional sumador, los voltajes de polarización, y que la salida es de 3 V, tal como se calculó. Observe lo bien que funciona el concepto de tierra virtual con la entrada negativa de sólo 3.791 mV



Programa 4

Circuito de amplificador operacional de ganancia unitaria

Un circuito de amplificador operacional de ganancia unitaria con los voltajes de polarización desplegados. Para una entrada de 2 V, la salida es exactamente de 2 V.

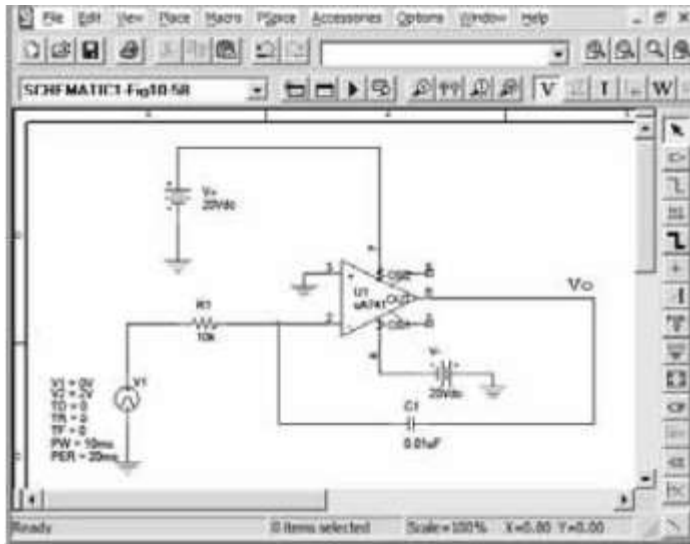


Programa 5

Circuito de amplificador operacional integrador

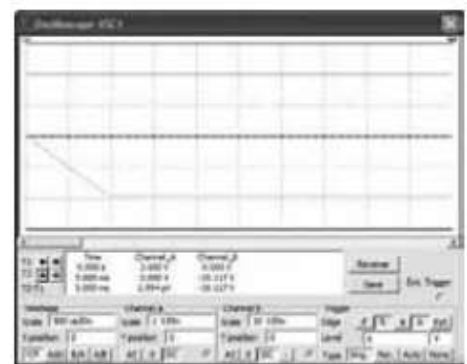
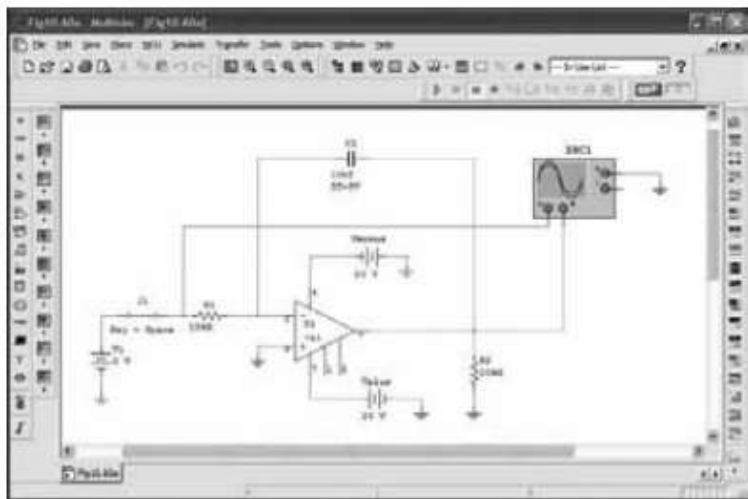
un integrador de amplificador operacional. La entrada se selecciona como VPULSE, la cual se establece como entrada escalonada como sigue: haga ac 0, dc 0, V1 0 V, V2 2 V, TD 0, TR 0, TF 0, PW 10 ms y PER 20 mS. De este modo se obtiene un escalón de 0 a 2 V, sin retardo, tiempo de levantamiento o tiempo de caída, con un periodo de 10 ms y repetición después de un periodo de 20 ms. Para este problema, el

voltaje se eleva de forma instantánea a 2 V, luego permanece allí durante un tiempo suficientemente largo para la que salida



Multisim

El mismo circuito integrador se puede construir y operar con Multisim. El circuito integrador construido con Multisim, con un osciloscopio conectado a la salida del amplificador operacional. La gráfica obtenida con el osciloscopio; es la forma de onda de salida lineal que va de 20 V hasta 20 V en un periodo de aproximadamente 2 ms

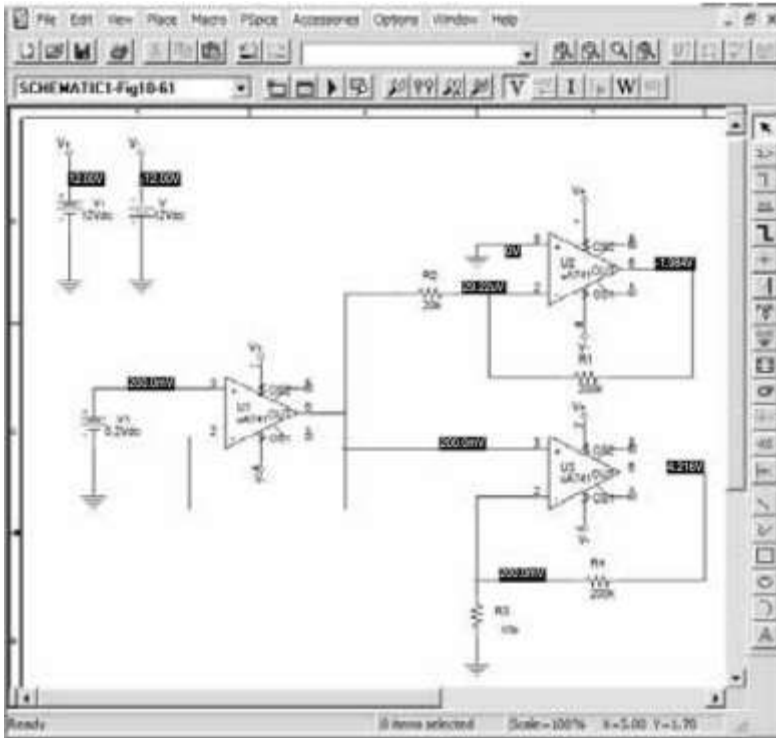


Programa 6

Circuito de amplificador operacional de múltiples etapas

un circuito de amplificador operacional de múltiples etapas. La entrada a la etapa 1 de 200 mV proporciona una salida de 200 mV a las etapas 2 y 3. La etapa 2 es un amplificador inversor con ganancia

de con una salida de la etapa 2 de $10(200 \text{ mV}) 2 \text{ V}$. La etapa 3 es un amplificador no inversor con ganancia de $11 + 200 \text{ k}\Omega > 10 \text{ k}\Omega = 212$, y el resultado es una salida de $21 (200 \text{ mV}) 4.2 \text{ V}$.

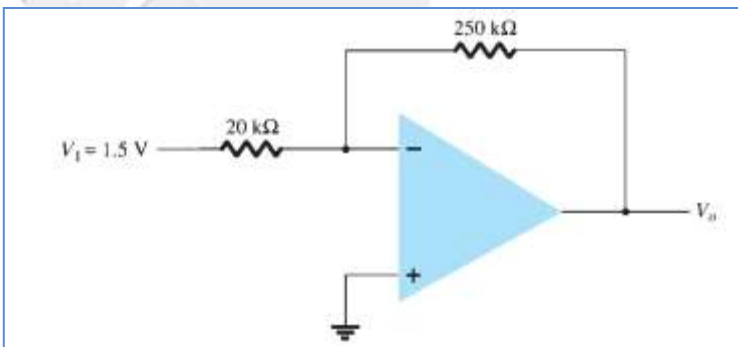


Guía de ejercicios.

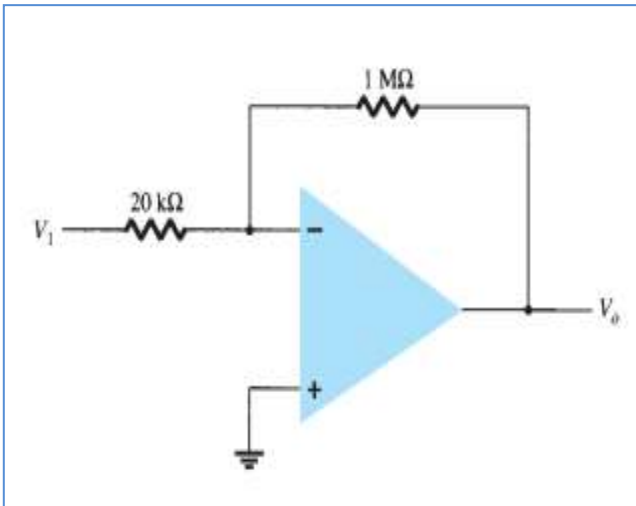
Parte I.

Circuitos prácticos de amplificadores operacionales.

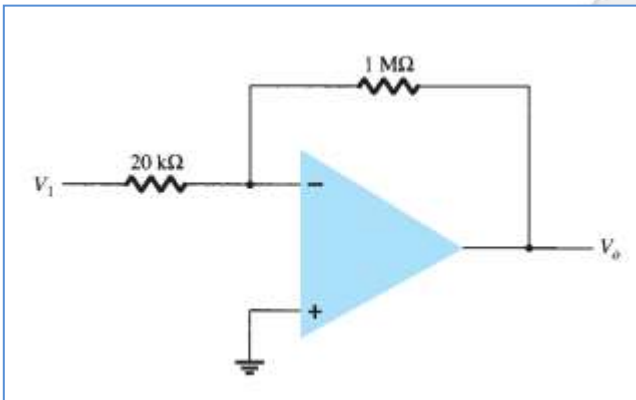
1. ¿Cuál es el voltaje de salida en el circuito de la figura?



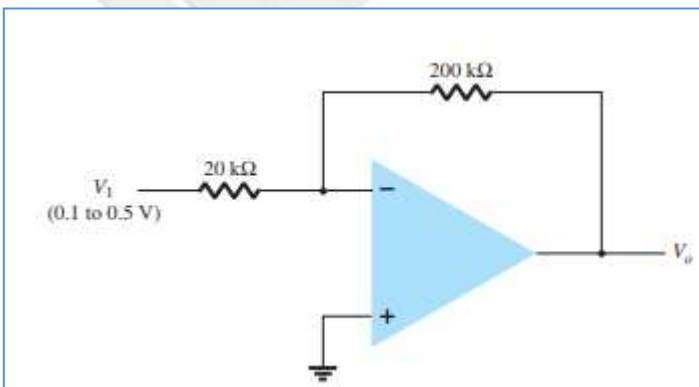
2. ¿Cuál es el intervalo del ajuste de la ganancia de voltaje en el circuito de la figura?



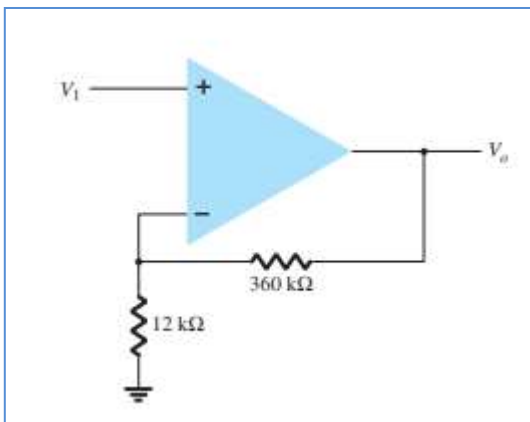
3. ¿Qué voltaje de entrada produce una salida de 2 V en el circuito de la figura?



4. ¿Cuál es el intervalo del voltaje de salida en el circuito de la figura, si la entrada puede variar de 0.1 a 0.5 V?



5. ¿Qué voltaje resulta en el circuito de la figura para una entrada de $V_1 = -0.3 \text{ V}$?

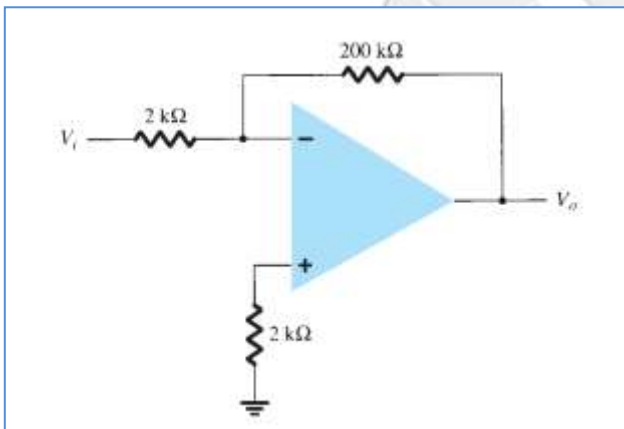


Parte II.

Especificaciones de amplificadores operacionales; parámetros de compensación de Cd

*16. Calcule la compensación de voltaje total para el circuito de la figura para un amplificador operacional con valores especificados de compensación de voltaje de entrada $V_{IO} = 6 \text{ mV}$ y compensación de corriente de entrada $I_{IO} = 120 \text{ nA}$

*17. Calcule la corriente de polarización de entrada en cada entrada de un amplificador operacional que tiene valores especificados de $I_{IO} = 4 \text{ nA}$ y de $I_{IO} = 20 \text{ nA}$.



Parte III.

Especificaciones de amplificadores operacionales; parámetros de frecuencia

8. Determine la frecuencia de corte de un amplificador operacional que tiene valores especificados $B_1 = 800 \text{ kHz}$ y $AVD = 150 \text{ V/mV}$.

*19. Para un amplificador con una velocidad de razón de cambio SR 2.4 V/ms, ¿cuál es la ganancia máxima de voltaje en lazo cerrado que se puede utilizar cuando la señal de entrada varía 0.3 V en 10 ms?

*20. Para una entrada de V_1 50 mV en el circuito, determine la frecuencia máxima que se puede utilizar. La velocidad de razón de cambio del amplificador operacional es SR 0.4 V/ms.

Parte A

Operación diferencial y en modo común

23. Calcule la CMRR (en dB) con las mediciones del circuito de V_d 1 mV, V_o 120 mV y V_C 1 mV, V_o 20 mV.

24. Determine el voltaje de salida de un amplificador operacional para voltajes de entrada de y La ganancia diferencial del amplificador es A_d 6000 y el valor de su CMRR es

a. 200.

b. 10

Conclusiones

1. La operación diferencial implica el uso de entradas de polaridad opuesta
2. La operación en modo común implica el uso de entradas de la misma polaridad.
3. El rechazo en modo común compara la ganancia para entradas diferenciales con la de entradas comunes.
4. Un amp-op es un amplificador operacional.
5. Las características básicas de un amplificador operacional son: Una muy alta impedancia de entrada (por lo general de mega ohms). Una muy alta ganancia de voltaje (por lo general de algunos cientos de miles y más). Una baja impedancia de salida (por lo general de menos de $100 \text{ } \Omega$).
6. La tierra virtual es un concepto basado en el hecho práctico de que el voltaje de entrada diferencial entre las entradas es casi (virtualmente) de cero volts, cuando se calcula como el voltaje de salida (cuando mucho, el de la fuente de voltaje) dividido entre la muy alta ganancia de voltaje del amplificador operacional.
7. Las conexiones básicas del amplificador operacional incluyen: Amplificador inversor. Amplificador no inversor. Amplificador de ganancia unitaria. Amplificador sumador. Amplificador integrador.
8. Las especificaciones del amplificador operacional incluyen: Compensación de voltajes y corrientes Parámetros de frecuencia Ganancia y ancho de banda Velocidad de razón de cambio

9. Ecuaciones:

$$CMRR = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c}$$

Amplificador inversor:

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

Amplificador no inversor:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

Seguidor unitario:

$$V_o = V_i$$

Amplificador sumador:

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3\right)$$

Amplificador integrador:

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int v_i(t) dt$$

Velocidad de variación (SR) = $\frac{\Delta V_o}{\Delta t}$ V/ μ s

10. Clases de amplificadores: Clase A. La etapa de salida conduce durante 360° (un ciclo completo de la forma de onda). Clase B. Cada una de las etapas de salida conduce durante 180° (juntas proporcionan un ciclo completo). Clase AB. Cada una de las etapas de salida conduce durante 180° y 360° (proporcionan un ciclo completo con menos eficiencia). Clase C. La etapa de salida conduce durante menos de 180° (utilizada en circuitos sintonizados). Clase D. Opera con señales digitales o de pulso.

11. Eficiencia de un amplificador: Clase A. Eficiencia máxima de 25% (sin transformador) y 50% (con transformador). Clase B. Eficiencia máxima de 78.5%.

12. Consideraciones acerca de la potencia: a. La fuente de alimentación de Cd proporciona la potencia de entrada. b. La potencia de salida es la que se entrega a la carga. c. La potencia disipada por los dispositivos activos es en esencia la diferencia entre las potencias de entrada y salida.

13. La operación push-pull (complementaria) en general es la opuesta de los dispositivos con un periodo de encendido a la vez: una “empuja” durante un semiciclo y la otra “jala” durante el otro semiciclo.

14. Distorsión armónica se refiere a la naturaleza no senoidal de una forma de onda periódica: la distorsión se define como perteneciente a la frecuencia periódica y a múltiplos de dicha frecuencia.

15. Disipador de calor se refiere al uso de cápsulas o marcos metálicos o ventiladores, para eliminar el calor generado en un elemento del circuito.

Recomendaciones

Al estudiante.

La intención es que el estudiante analice, entienda y ponga en práctica todos los circuitos incluidos en este documento. Antes de proceder a utilizar amplificadores operacionales, es conveniente citar las siguientes recomendaciones, basadas en la experiencia, sobre como trabajar con este tema.

- Todo el cableado debe realizarse con la fuente apagada
- Procure conocer el material que compone el alambrado y los conductores con que trabaje.
- Estudie primero la filosofía de conexión +V y -V explicado en el tema (1). Es sorprendente con cuanta frecuencia se omite este paso fundamental
- Tome las mediciones al respecto a tierra. Por ejemplo si una resistencia está conectada entre dos terminales de un circuito integrado, no se conecta a un osciloscopio; por el contrario, mida el voltaje en un lado de la resistencia y después en el otro, y luego calcule la caída de voltaje a través de la resistencia
- Evite en lo posible el uso de amperímetro (mida el voltaje como en la recomendación anterior) Un error muy frecuente en los estudiantes.
- Desconecte la señal de entrada antes de quitar la corriente directa; de lo contrario podría destruir el circuito integrado
- Al utilizar los circuitos integrados presentes en laboratorio o en el simulador trabajado (Nunca haga lo siguiente); Invertir la polaridad de las fuentes de alimentación; dejar conectada una señal de entrada sin haber corriente en el circuito integrado

Los mismos principios anteriores se aplican en todo los demás circuitos integrados (Aplicaciones Lineales y no lineales del Amplificador Operacional, Circuitos Generadores en forma de Onda, Circuitos electrónicos de Potencia.)

Bibliografía

1. BOYLESTAD, Robert. "Electronica. Teoria de Circuitos". Editorial Prentice Hall. Sexta Edición. México.1996.