

UNIDAD 4

TRANSISTORES BJT Y JFET

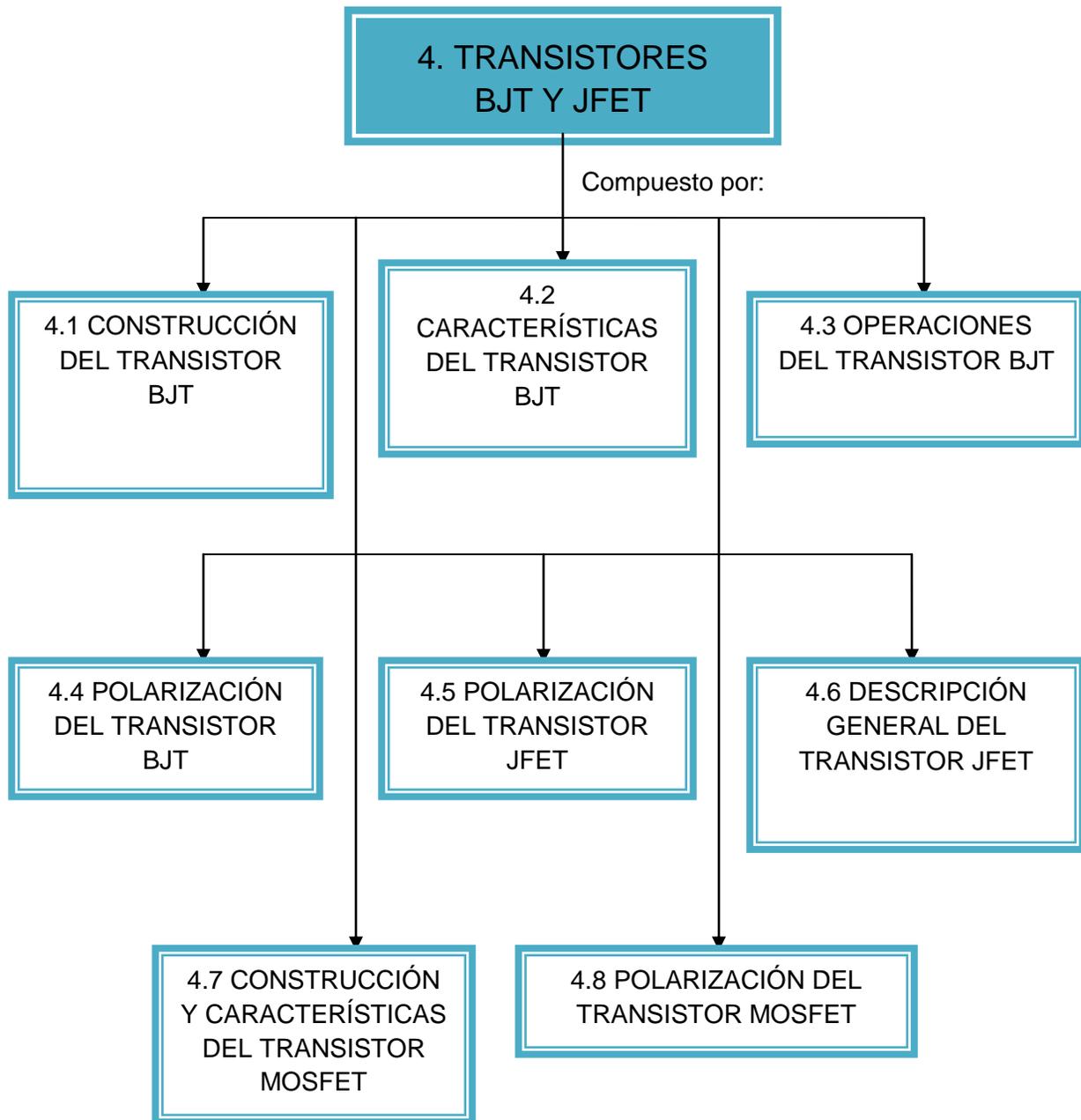
OBJETIVO

Conocer, identificar, resolver y analizar los transistores BJT y JFET, así como distinguir sus ventajas y desventajas.

TEMARIO

- 4.1 Construcción del transistor BJT
- 4.2 Características del transistor BJT
- 4.3 Operaciones del transistor BJT
- 4.4 Polarización del transistor BJT
- 4.5 Polarización del transistor JFET
- 4.6 Descripción general del transistor JFET
- 4.7 Construcción y características del transistor MOSFET
- 4.8 Polarización del transistor MOSFET

MAPA CONCEPTUAL



INTRODUCCIÓN

El transistor es un dispositivo que ha originado una gran transformación en el campo de la electrónica y en todos los contextos de la vida humana.

Los transistores son dispositivos electrónicos integrados por tres cristales semiconductores, con tres terminales, una terminal es la de la base, otra es la del emisor, y una última es el colector; estas tres terminales se simbolizan con las letras mayúsculas: E, B y C, respectivamente.

- *Funcionamiento del transistor como interruptor:*

Para que el transistor funcione como un interruptor o *switch*, se deben cumplir ciertas situaciones de operación, las más importantes son las de corte y saturación. En situación de corte, la corriente de colector simbolizada I_c debe tener un valor mínimo y la tensión entre el colector y el emisor debe tener un valor máximo. El transistor en situación de saturación también debe cumplir ciertas características como son una corriente de colector, simbolizada I_c con un valor máximo, y una tensión entre el colector y el emisor mínimo o de cero volts.

- *Funcionamiento del transistor como amplificador:*

La amplificación de una señal de corriente alterna en la entrada del circuito dependerá del tipo de funcionamiento del amplificador, que puede ser de corriente o de voltaje. Para ello, el transistor se puede utilizar como dos diodos, uno formado por la base y el emisor que se polariza en forma directa; y otro formado por la base y el colector que se polariza en forma inversa, con ello tendremos una tensión de 0.7 V entre base y emisor si es de silicio, y de 0.4 V si es de germanio.

El transistor ha conducido a muchos otros descubrimientos basados en semiconductores, incorporado al circuito integrado (CI), que es un diminuto dispositivo que contiene miles de transistores miniaturizados. Debido a los

circuitos integrados son posibles las computadoras modernas y todos los implementos de tecnología en materia de telecomunicaciones vía satelital. Existen dos tipos de dispositivos con esta denominación: el transistor de efecto de campo y el transistor de unión bipolar.

En esta unidad, se abordarán las principales características del transistor bipolar BJT y FET, además se estudiarán los modelos básicos de estos dispositivos y su utilización; así como su análisis en los diferentes circuitos electrónicos y su polarización.

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL TRANSISTOR BJT

El transistor es un dispositivo semiconductor integrado por tres capas previamente construidas de material semiconductor; dos capas son de material tipo N y una capa tipo P, o pueden ser dos capas de material tipo P y una de tipo N. Al primero se le denomina transistor NPN, y al segundo se le conoce como transistor PNP.

El dopado de la capa central denominada *base* es mucho menor que el dopado de las capas exteriores conocidas como *emisor* y *colector* (casi siempre 10:1 o menos). Este bajo nivel de dopado reduce la conductividad (incrementando la resistencia) de este material al limitar el número de portadores libres, esto será utilizado para controlar la corriente que circula entre la base y el colector.

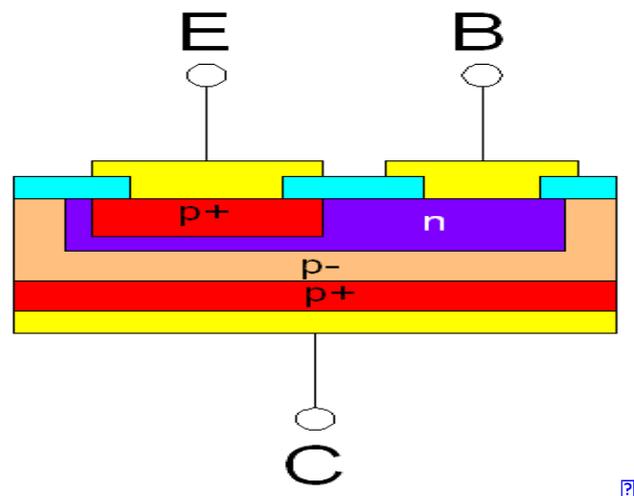


Figura 4-1 Estructura de un transistor bipolar¹⁶

En la polarización que se muestra en la figura 4-1, las terminales se han señalado con letras mayúsculas, E para el emisor, C para el colector y B para la base.

Las siglas BJT (del inglés *bipolar junction transistor* = transistor de unión bipolar) se aplican generalmente a este dispositivo de tres terminales (figura 4-2). El término bipolar se refiere a que los electrones y los huecos participan en el proceso de inyección en el material polarizado opuestamente. Si sólo uno de

¹⁶ <http://es.wikipedia.org>

los portadores se emplea (electrón o huecos), se considera que el dispositivo es unipolar.

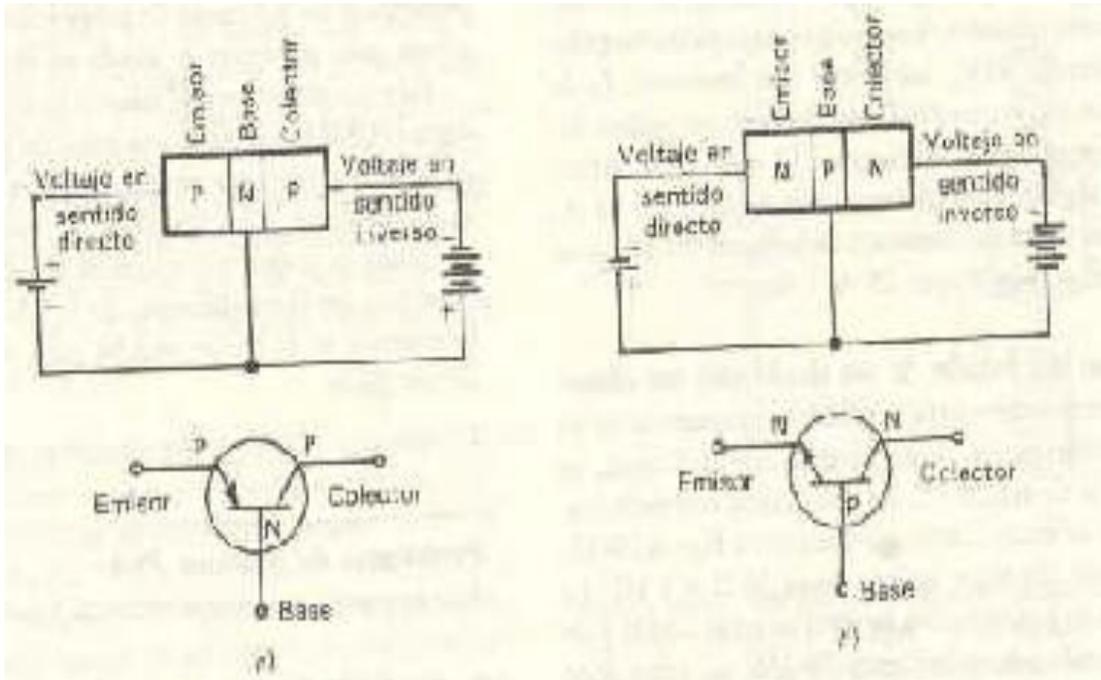


Figura 4-2. Tipos de transistores y su respectiva polarización en región activa a) PNP, b) NPN

4.2 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSISTOR BJT

La operación normal de un transistor BJT es de manera directa, logrando en este caso que la corriente del emisor sea igual a la corriente de la base sumada a la corriente de colector: ($I_E = I_B + I_C$).

En los transistores NPN, la diferencia de potencial entre el emisor y el colector es igual a la suma de la diferencia de potencial entre la base y el colector con la diferencia de potencial entre la base y el emisor; en los transistores PNP, la diferencia de potencial entre el emisor y el colector es igual a la diferencia de potencial entre la base y el emisor más la diferencia de potencial entre la base y el colector.

Los transistores BJT se usan comúnmente en aplicaciones de amplificación, polarizando el circuito de entrada (E-B) en forma directa, y polarizando el circuito de salida (B-C) en inverso. Se pueden utilizar con el emisor a tierra, con la base a tierra o con el colector a tierra.

Los transistores BJT trabajan con impedancias bajas, con diferencias de potencial pequeñas, y con corrientes relativamente altas; se utilizan con bastante frecuencia en circuitos de electrónica analógica, y con menos frecuencia en circuitos de electrónica digital.

La simbología de los dos tipos de transistores se muestra en las figuras 4.3 a y b.

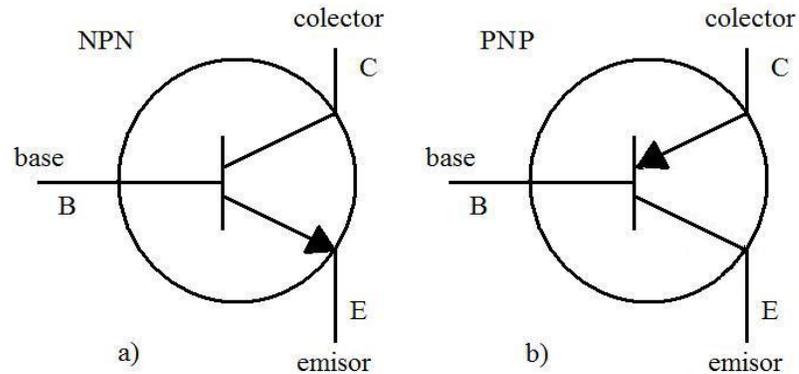


Figura 4-3 Símbolos del transistor bipolar:
a) transistor NPN b) transistor PNP

Una forma curiosa de recordar el tipo de transistor en su representación gráfica es observando la flecha que llega a la base, y pensar en el término: *pone*, para identificar el transistor PNP, y cuando la flecha se aleja de la base, pensaremos en: *no pone*, por lo que ubicaremos el transistor tipo NPN.

El comportamiento de un transistor bipolar se analiza considerando las características de entrada sobre el emisor y la base, y sus características de salida sobre el diodo que forman la base y el colector.

Característica de entrada

La entrada está formada por el *diodo emisor-base*, en la figura 4-4 se observa su simbología. La diferencia entre un transistor NPN y un transistor PNP, son los diodos que lo integran, el NPN tiene uno NP y otro PN; en el transistor PNP, habrán dos diodos, uno PN, y otro NP, en los cuales el sentido de la corriente será diferente y se simboliza con la flecha dibujada en el emisor. Por ciertas razones, se ha adoptado el sentido de circulación de la corriente desde los puntos del circuito con polaridad positiva hacia los puntos de polaridad negativa

(de más a menos, recordando el flujo de electrones en el circuito externo de una válvula tríodo al vacío).

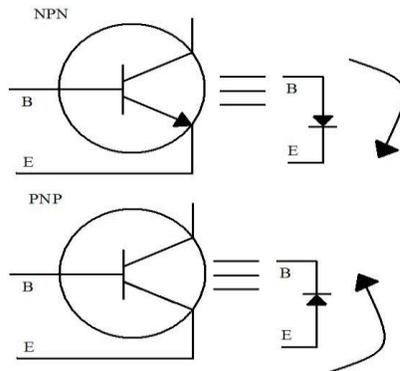


Figura 4-4 Representación simbólica de transistores NPN y PNP

Características de salida

La salida está formada por las terminales que forman el *diodo base-colector*. Para comprender el efecto de control del circuito de entrada sobre la salida del transistor analicemos la figura 4-5. Utilizando una fuente de tensión de polaridad adecuada a las terminales del diodo base-emisor, circulará una corriente de base I_B , determinada por la tensión de alimentación, la resistencia de base R_B y la resistencia propia del diodo.

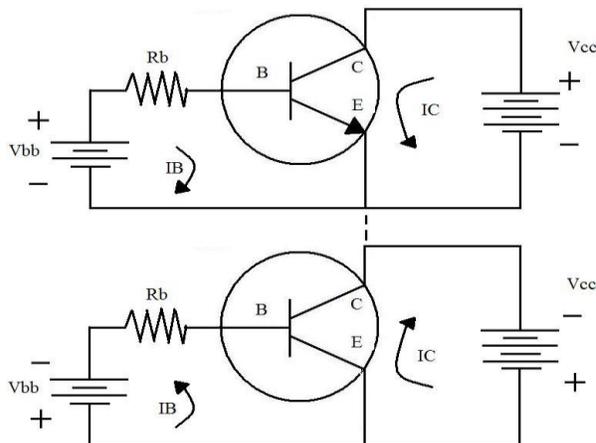


Figura 4-5 Circuitos de entrada y salida

La corriente de salida I_C es resultado de la corriente de base I_B que circula a través de la resistencia de base R_B . También podemos observar los siguientes efectos:

- Si desconectamos la fuente V_{bb} , la corriente de colector I_C se convierte en cero, así como también la corriente del circuito de entrada E-B.
- La corriente en el circuito de entrada E-B, es proporcional a la corriente I_C del circuito de salida B-C.

Para describir el comportamiento de los transistores bipolares, se necesitan dos características, que dependen de la configuración utilizada (base común, emisor común o colector común). Una es la característica de voltaje contra corriente de entrada, y la otra, es la característica de voltaje contra corriente de salida.

Configuración de base común

En esta configuración, la terminal de la base es común a los lados de entrada (emisor) y salida (colector), y generalmente se conecta a un potencial de tierra (o se encuentra más cercana a este potencial). Esta configuración se indica en la figura 4-6. La fuente de voltaje V_{BB} ofrece polarización directa a la unión B-E y controla la corriente del emisor I_E .

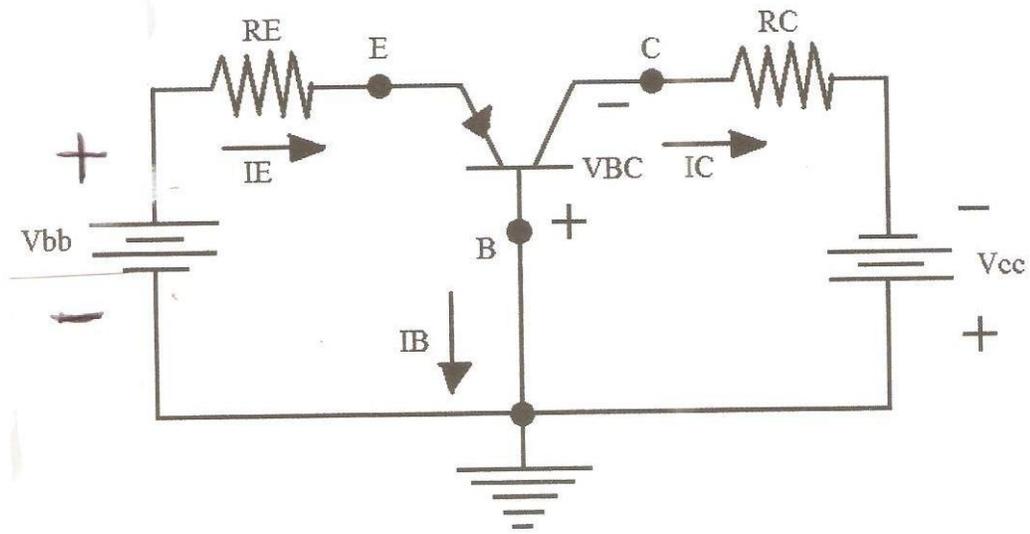


Figura 4-6. Circuito amplificador de base común con transistor PNP

En el circuito de conexión de un transistor bipolar con base común o a tierra, la característica en el circuito de entrada de corriente-voltaje relaciona la corriente de emisor I_E , con la tensión aplicada entre el emisor y la base.

En la figura 4.7a se muestran los valores de corriente de emisor en miliamperes contra la diferencia de potencial aplicada entre la base y el emisor.

En la figura 4.7b se presenta la relación de la corriente de colector I_C con la diferencia de potencial aplicada en el circuito de salida para varios valores de corriente en el circuito de entrada I_E .

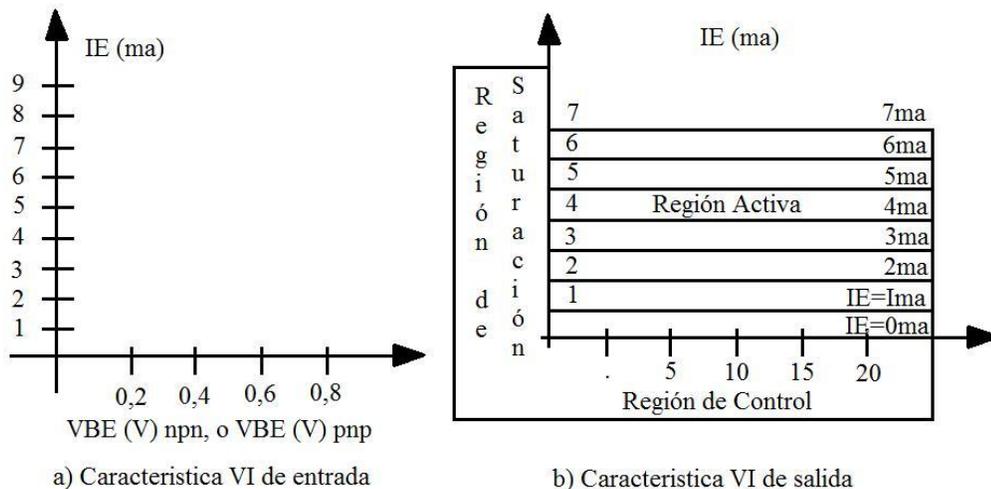


Figura 4-7 Características corriente-voltaje del transistor en configuración base común.

ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Consulta información sobre las corrientes de base, emisor y colector de un BJT en un manual de transistores.
- Realiza un montaje para un transistor tipo PNP, como el de la figura 4-6, y mide las corrientes de base, emisor y colector.
- Determina el porqué de los valores de las corrientes medidas.

4.3 OPERACIONES DEL TRANSISTOR BJT

Los transistores bipolares BJT operan en tres zonas, dependiendo de la polarización de los circuitos de entrada y de salida que lo constituyen, estas zonas son: la zona de corte, la zona activa y la zona de saturación; trabajar con cada zona define un uso característico del transistor.

Operación del transistor en zona de corte

En esta zona existe muy baja corriente circulando en el circuito de entrada y en el circuito de salida, y el dispositivo funciona como si fuera un circuito abierto. La característica que define la zona de corte es que las dos uniones formadas por el circuito de entrada y el circuito de salida se polarizan en forma inversa. El transistor cuando trabaja en esta zona de corte se comporta como un interruptor electrónico.

Operación del transistor en zona de saturación

En esta posición las uniones base-emisor y base –colector, circuitos de entrada y de salida se polarizan en forma directa, generando una corriente de emisor-colector muy grande, siendo la caída de tensión entre estas terminales muy pequeña. En esta posición, el transistor funciona como si fuera un interruptor cerrado.

Operación del transistor en la zona activa

En esta zona el circuito de entrada emisor-base se polariza directamente, en tanto que el circuito de salida base-colector se polariza en forma inversa, dando

como resultado que si se controla la corriente en el circuito de entrada también se controlará la corriente en circuito de salida, y se produce el efecto de una amplificación en la señal introducida en el circuito de entrada.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No. 5

El transistor bipolar

Materiales:

- Transistor BD 137 (NPN)
- Resistor de 2200 Ω
- Resistor de 180 K Ω
- Batería de 12 V
- Batería de 9 V
- Seis jumper con caimanes
- Multímetro digital

Instrucciones:

Con el material indicado, arma un circuito electrónico polarizando la base del transistor con el resistor de 180K Ω y el colector con el resistor de 2200 Ω .

- 1) Conecta el emisor al negativo de la batería de 12 V
- 2) Conecta el colector a la resistencia de 2200 Ω
- 3) Conecta la base a la resistencia de 180 K Ω
- 4) Conecta el amperímetro entre el positivo de la batería de 12 V y el otro extremo de la resistencia de 180K Ω
- 5) Anota la corriente que circula
- 6) Cambia la batería de 12 V por otra de 9 V
- 7) Mide la corriente que circula
- 8) Retira el amperímetro, cierra el circuito

- 9) Mide la diferencia de potencial entre la base y el emisor
- 10) Mide la diferencia de potencial entre la base y el colector
- 11) Cambia la batería por otra de 12V y efectúa las mismas mediciones
- 12) Compara las lecturas que obtuviste y concluye por qué funcionó el transistor en forma diferente.

4.4 POLARIZACIÓN DEL TRANSISTOR BJT

Polarizar un transistor se refiere a aplicarle una tensión con una cierta polaridad que puede ser negativa o positiva, es decir que a una terminal del transistor se puede conectar una batería de +9V, o +6V, o -3V, y con estos valores de voltaje, los electrones libres circularán con mucha intensidad, con poca intensidad, o no circularán. Estos estados se pueden aprovechar para utilizar al transistor de diferentes maneras, como se indicó en el apartado 4.3.

Al polarizar las terminales de un transistor de este tipo, se busca encontrar un punto en donde la respuesta sea lineal sobre la curva de respuesta del mismo, para lograr calcular con anticipación los resultados de las corrientes de base, de colector y de emisor, y de esta forma conocer el valor de los elementos de un circuito con esta polarización.

El punto que se busca debe tener ciertas características de corriente y tensión, que puede variar según el diseño final del circuito, ya que los valores de corriente de colector y de voltaje de colector-emisor pueden variar, pero siempre operando en el punto Q denominado “punto de trabajo”.

En la figura 4-8 se observa el circuito de un transistor tipo NPN polarizado por una fuente de voltaje continua, la cual sirve entre otras cosas para proporcionar las corrientes y los voltajes necesarios para que el transistor trabaje en la región lineal que seleccionamos, además proporciona energía al circuito, y una parte de esta energía se transformará en potencia al amplificar una señal de entrada.

En la figura 4-8b, se ubican las curvas características del funcionamiento de un transistor, las cuales se indican en un manual de

transistores, entonces lo que se debe efectuar es el cálculo del punto de trabajo Q. Cuando se tiene el punto de trabajo Q, lo que sigue es trazar una recta del eje Y, al eje X, considerando los valores de corriente y voltaje respectivamente indicados en los cortes de la recta con los ejes. A esta recta se le denomina “recta de carga estática”

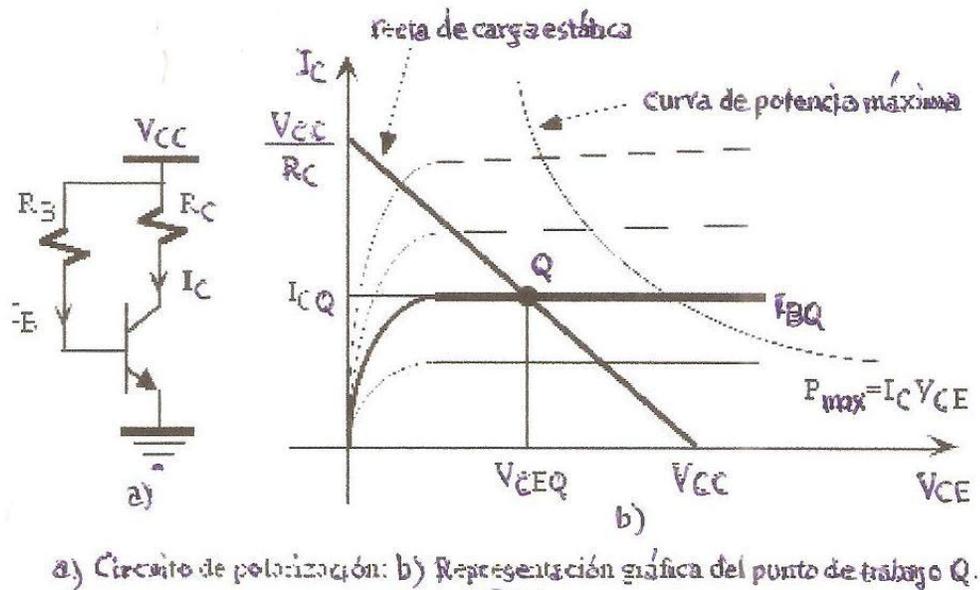


Figura 4-8 Punto de trabajo Q de un transistor bipolar

Circuito de polarización fija

“El circuito de polarización fija (figura 4-9) ofrece una introducción relativamente directa y simple al análisis de la polarización en corriente directa (DC) de transistores”.¹⁷ Aunque la red utilice un transistor *NPN*, las ecuaciones y los cálculos se pueden adaptar con facilidad a la configuración con transistor *PNP*, con sólo cambiar todas las direcciones de la corriente y los voltajes de polarización. Las direcciones de corriente de la figura 4-9 son las reales, y los voltajes están determinados por la notación estándar de doble subíndice.

Para el análisis en DC, la red debe aislarse de los niveles de corriente alterna (AC), reemplazando los capacitores puede separarse en dos fuentes (para finalidad de análisis solamente) como se muestra en la figura 4-10, para permitir una separación de los circuitos de entrada y de salida. También reduce

¹⁷ Boylestad, Robert, L. *Electrónica Teoría de circuitos*, p. 147.

la unión de las dos corrientes que fluyen hacia la base I_B . Como se analiza, la separación es válida, como indica la figura 4-10, donde V_{CC} está conectada directamente a R_B y R_C , justo como en la figura 4-9.

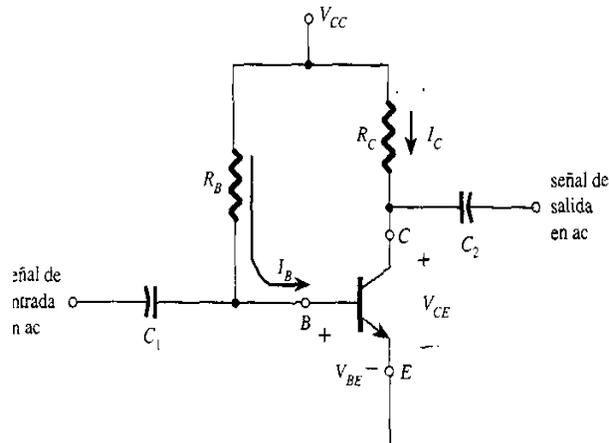


Figura 4-9 Circuito de polarización fija

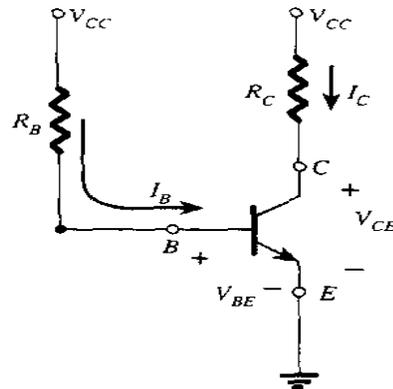


Figura 4-10 Equivalentes de DC

Polarización directa base-emisor

Considera primero la malla del circuito base-emisor de la figura 4-10. Al escribir la ecuación de voltaje de Kirchhoff en la dirección de las manecillas del reloj, se obtendrá:

$$+V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

Nota la polaridad de la caída de voltaje a través de R_B establecida por la dirección indicada de I_B . Cuando se resuelve la ecuación para la corriente I_B da por resultado lo siguiente:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (1)$$

La diferencia de potencial sobre la resistencia de base es la tensión de la fuente de V_{CC} disminuido del voltaje entre el circuito de entrada E-B, los cuales tienen valor constante, tocando a la resistencia de base R_B marcar el valor de la corriente de base I_B en este punto Q.

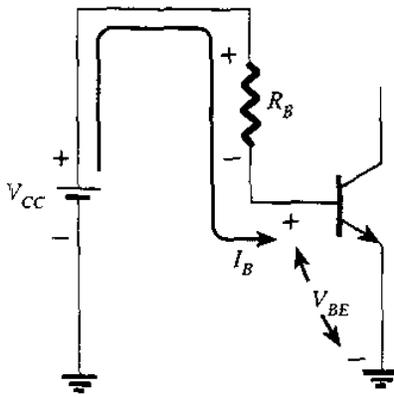


Figura 4-11 Malla base-emisor

Malla colector-emisor

La sección colector-emisor de la red aparece en la figura 4-12, con la dirección de i_C indicada y la polaridad resultante a través de R_C . La magnitud de la corriente del colector está directamente relacionada a I_B a través de la resistencia de polarización de base y la fuente de alimentación.

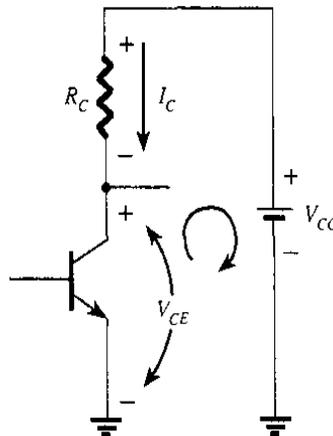


Figura 4-12 Malla colector-emisor

$$I_C = \beta I_B$$

(2)

Parámetros

En estos circuitos, para medir su eficiencia se emplean ecuaciones con los datos de la corriente de electrones que cruzan la base para llegar al colector, para ello se tienen dos parámetros que se representan con las letras griegas “alfa” (α) y “beta” (β).

- Alfa (α) representa la ganancia de corriente en un circuito de base a tierra, siendo sus valores comunes entre 0.98 y 0.998, los que para efecto de cálculos se cierran a la unidad.
- Beta (β) proporciona la ganancia en corriente, relacionando la corriente emisor-colector I_{CE} con la corriente base-emisor I_{BE} , es decir, comparamos la corriente en el circuito de salida con la corriente en el circuito de entrada, y como estamos relacionando corrientes, el resultado es adimensional.

Los valores más comunes para transistores bipolares pequeños, es del orden de 100 a 300.

Las ecuaciones que representan estos parámetros se muestran a continuación despejadas:

$$\alpha I_E = I_C \quad I_B \beta = I_C$$

Al continuar con el análisis del circuito de la figura 4-12, se puede observar que el valor de la corriente de colector no dependerá de su resistencia, ya que en la región activa del transistor, la resistencia de colector R_C no hará que cambien las corrientes de base y de colector.

Aplicando una de las leyes de Kirchhoff al circuito de la figura 4-12 dará por resultado lo siguiente:

$$V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C \quad (3)$$

De la que se deduce que la diferencia de potencia entre el colector y el emisor es igual al voltaje que proporciona la fuente, disminuido de la caída de tensión sobre la resistencia del colector, lo que se puede indicar en la ecuación (4).

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (4)$$

Aquí V_{CE} es la diferencia de potencial entre las terminales emisor y colector del transistor.

- V_C representa la tensión aplicada al colector.
- V_E representa la tensión aplicada al emisor.

Pero como en esta configuración el voltaje de emisor es nulo, la ecuación (4) se transforma, quedando como se indica en la ecuación (5).

$$V_{CE} = V_C \quad (5)$$

Además, ya que:

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (6)$$

Y que $V_E = 0$ V, entonces:

$$V_{BE} = V_B \quad (7)$$

Ejemplo 4-1

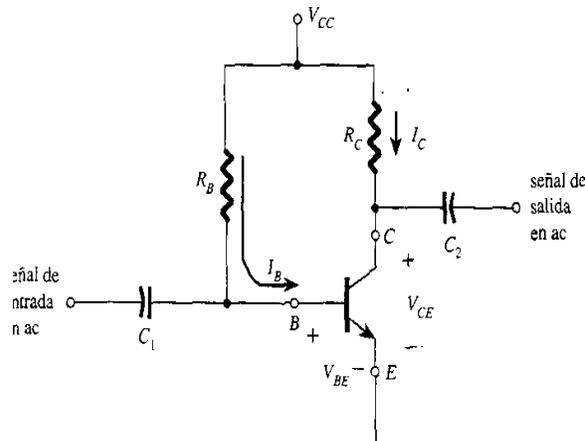


Figura 4-13

Para la configuración de polarización fija de la figura 4-13, determinar lo siguiente:

- a) I_{BQ} e I_{CQ}
- b) V_{CEQ}
- c) V_B y V_C
- d) V_{BC}

Solución:

$$\text{a) Ecuación : } I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{240 \text{ k}\Omega} = 47.08 \mu \text{ A}$$

$$\text{Ecuación: } I_{CQ} = \beta I_{BQ} = (50) (47.08 \mu \text{ A}) = 2.35 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Ecuación : } V_{CEQ} &= V_{CC} - I_{CQ} R_C \\ &= 12 \text{ V} - (2.35 \text{ mA}) (2.2 \text{ k}\Omega) \\ &= 6.83 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{c) } V_B &= V_{BE} = 0.7 \text{ V} \\ V_C &= V_{CE} = 6.83 \text{ V} \end{aligned}$$

d) La utilización de la notación del subíndice doble da por resultado:

$$\begin{aligned} V_{BC} &= V_B - V_C = 0.7 \text{ V} - 6.83 \text{ V} \\ &= -6.13 \text{ V} \end{aligned}$$

Y el signo negativo revela que la unión tiene polarización inversa, como debe ser para la amplificación lineal.

Polarización por divisor de voltaje

En las configuraciones de polarización, previas a la corriente de polarización I_{CQ} y el voltaje V_{CEQ} de polarización, eran una función de la ganancia en corriente (β) del transistor. Sin embargo, debido a que β es sensible a la temperatura, especialmente para los transistores de silicio, y de que el valor real de beta por lo general, no está bien definido, lo mejor sería desarrollar un circuito que fuera menos dependiente o, de hecho, independiente de la beta del transistor.

La red a la que nos referimos es configuración de divisor de voltaje de la figura 4-14. Si se analiza sobre una base exacta, la sensibilidad a los cambios

en beta, resulta ser muy pequeña. Si los parámetros del circuito se eligen adecuadamente, los niveles resultantes de I_{CQ} y de V_{CEQ} pueden ser casi totalmente independientes de beta. Recuerda que en análisis anteriores, el punto Q estaba definido por un nivel fijo de I_{CQ} y de V_{CEQ} , como se observa en la figura 4-15. El nivel del I_{BQ} cambiará con el cambio beta, pero el punto de operación definido sobre las características por I_{CQ} y de V_{CEQ} puede permanecer fijo si se utilizan los parámetros adecuados del circuito.

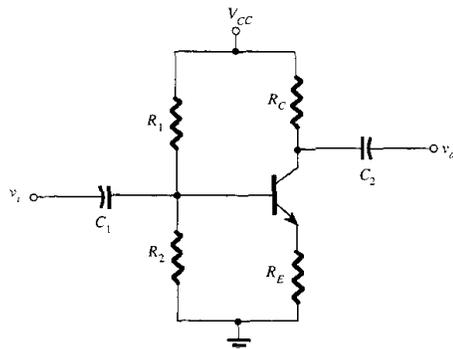


Fig. 4-14 Configuración de polarización por división de voltaje.

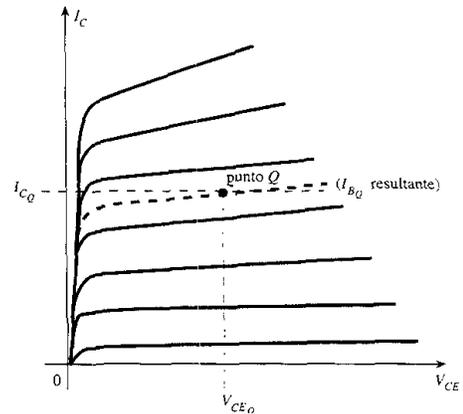


Fig. 4-15 Definición del punto Q para la configuración por divisor de voltaje.

Ejemplo 4-2

Determina el voltaje de polarización de DC V_{CE} y la corriente I_C para la siguiente configuración de divisor de voltaje de la figura 4-16:

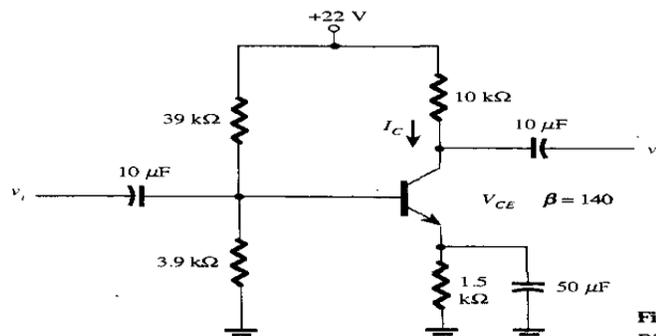


Figura 4-16 Circuito para beta estabilizada

Solución

$$R_{TH} = R_1 \parallel R_2$$

$$= \frac{(39 \text{ k}\Omega) (3.9 \text{ k}\Omega)}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 3.55 \text{ k}\Omega$$

$$E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$= \frac{(39 \text{ k}\Omega) (22 \text{ V})}{39 \text{ k}\Omega + 3.9 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

$$= \frac{2 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{3.5 \text{ k}\Omega + (141)(1.5 \text{ k}\Omega)} = \frac{1.3 \text{ V}}{3.55 \text{ K}\Omega + 211.5 \text{ k}\Omega}$$

$$= 6.05 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$= (140) (6.05 \mu\text{A})$$

$$= 0.85 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$= 22 \text{ V} - (0.85 \text{ mA}) (10 \text{ k}\Omega + 1.5 \text{ K}\Omega)$$

$$= 22 \text{ V} - 9.78 \text{ V}$$

$$= 12.22 \text{ V}$$

4.5 POLARIZACIÓN DEL TRANSISTOR JFET

Los transistores JFET, al igual que los transistores bipolares, se deben polarizar para que su operación sea congruente con los resultados deseados por el diseñador del circuito. Algunas de las formas de polarización de un JFET son las siguientes:

- Polarización fija o compuesta
- Autopolarización
- Polarización por división de voltaje
- Polarización por fuente corriente

Polarización fija

En estos transistores, como en los bipolares, el circuito de entrada es el que polariza al transistor JFET, siendo en este tipo la red de compuerta. En el diagrama del circuito de la figura 4-17, la tensión en la compuerta fija el valor de la corriente de equilibrio o de reposo.

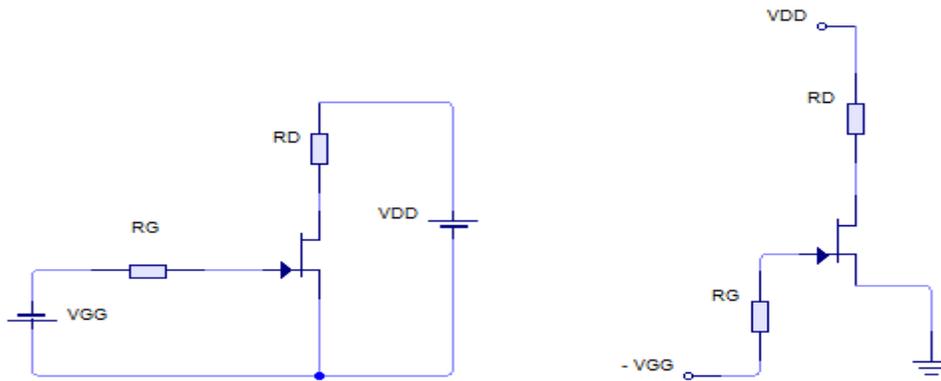


Figura 4.17. Polarización fija

Análisis del circuito de polarización fija de la figura 4-17

En un transistor JFET de canal N, la tensión en la compuerta (gate) será negativa con respecto a la terminal “source”, lo que permitirá formar la siguiente ecuación:

$$V_{GS} = V_G - V_S \dots\dots\dots(1)$$

En esta ecuación (1) el *gate* es positivo y el *source* es negativo.

Los posibles cambios en los parámetros del transistor JFET provocarán que el punto de operación sea muy inestable, por lo que este tipo de polarización no es muy recomendable.

Si hacemos $V_{RG} = 0$ ya que no hay corriente por la polarización inversa de la unión G-S (compuerta fuente).

$$V_{GS} = - V_{GG} \dots\dots\dots(2)$$

La ecuación (2) representa la recta de polarización.

Análisis del circuito del drenador o dren

Aplicando la ley de Kirchhoff al circuito, tenemos que:

$$-V_{DD} + V_{RD} + V_{DS} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

En términos de la corriente del drenador

$$V_{DD} = I_{DS} R_D + V_{DS} \dots\dots\dots(2)$$

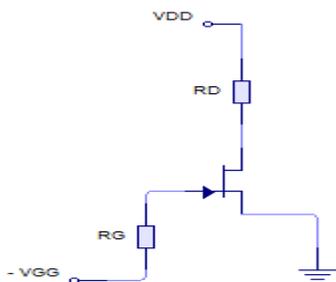
De la ecuación (2) despejamos la corriente de drenador-source y obtenemos:

$$I_{DS} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} \quad (3)$$

La ecuación (3) representa la recta de carga en C.C

Ejemplo 4-3

Encuentra la variación del punto de operación para el circuito mostrado:



FET 2N 5486 $\left\{ \begin{array}{l} I_{DSS} \text{ max} = 20 \text{ m} \\ I_{DSS} \text{ min} = 8 \text{ mA} \\ V_{Gsoff} \text{ max} = -6\text{V} \\ V_{Gsoff} \text{ min} = -2\text{V} \end{array} \right.$

Figura 4-18 Transistor FET

$$V_{DD} = 12 \text{ V}$$

$$V_{GG} = 1\text{V}$$

$$R_D = 470 \Omega$$

$$R_G = 1\text{M} \Omega$$

$$I_{DSQ \text{ max}} = 20 \text{ mA} \left[1 - \frac{-1}{-6} \right]^2 = 13.89 \text{ mA}$$

$$I_{DSQ \text{ min}} = 8 \text{ mA} \left[1 - \frac{-1}{-2} \right]^2 = 2 \text{ mA}$$

$$\Delta I_{DSQ} = 11.9 \text{ mA}$$

Polarización por divisor de voltaje

La figura 4-19 muestra el circuito de polarización más utilizado. Observa que el circuito de polarización de la compuerta tiene un divisor de voltaje (R_2 y R_1) y, por esa razón, el circuito se llama *polarización por división de una tensión*.

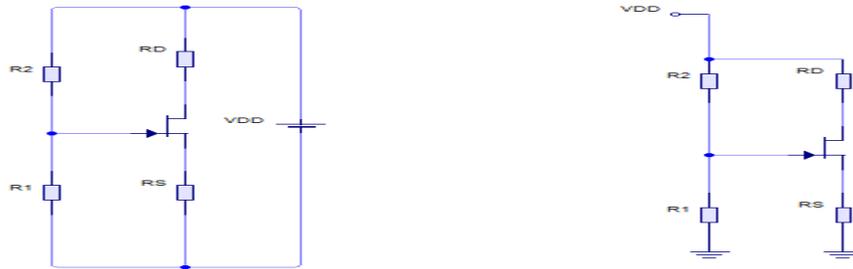


Figura 4-19 Polarizaciones por división de voltaje

Por el teorema de Thevenin equivalente a la malla de compuerta, se puede dibujar el diagrama del transistor en la figura 4.20.

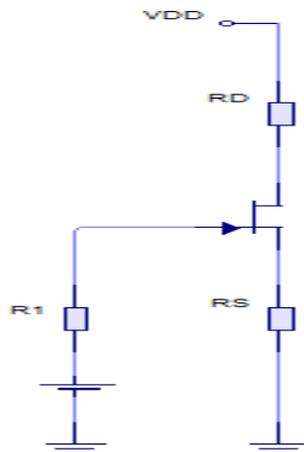


Figura 4-20 Equivalente de Thevenin

Donde:

$$V_{GG} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{DD}) \dots \dots \dots (1)$$

LVK en malla de compuerta

$$-V + V_{RG} + V_{GS} + V_{RS} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$-V_{GG} + V_{RG} + R_S i_{DS} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

$$V_{GG} = V_{GS} + R_S I_{DS} \dots\dots\dots(4)$$

Despejando la ecuación (4) obtenemos la ecuación de la recta de polarización, representada por la ecuación (5).

$$I_{DS} = \frac{V_{GG} - V_{GS}}{R_S} \dots\dots\dots(5)$$

Análisis en la malla de drain:

$$V_{DD} = V_{RD} + V_{DS} + V_{RS}$$

En términos de corriente tenemos que:

$$V_{DD} = I_{DS} (R_D + R_S) + V_{DS}$$

$$I_{DS} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_S + R_D}$$

Ejemplo 4-4

Empleando la división de tensión, polarizar un transistor JFET

Datos:

Tensión de la fuente de alimentación $V_{DD} = 12$ Volts

Punto de operación = 50% de la recta de carga

Punto de operación = A la mitad de la curva de transconductancia

Solución:

Al elegir arbitrariamente $V_{GG} = 2$ V se obtienen los siguientes valores:

$$I_{DSQ} = 0.3821 \quad I_{DSS} = 3.06 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = 0.382 \quad V_{GSoff} = -1.91 \text{ V}$$

De la ecuación siguiente:

$$I_{DSQ} = \frac{V_{GG} - V_{GSQ}}{R_S}$$

Despejamos R_S se obtiene:

$$R_S = \frac{V_{GG} - V_{GSQ}}{I_{DSQ}} =$$

Sustituyendo valores es:

$$\frac{3.91 \text{ V}}{3.06 \text{ mA}}$$

$$R_S = 1278 \Omega$$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DSQ} - V_{RS}}{I_{DSQ}}$$

Sustituyendo valores obtenemos:

$$\frac{12 - 6 - 3.9\text{V}}{3.06 \text{ mA}}$$

Finalmente:

$$R_D = 683 \text{ k}\Omega$$

El valor de R_1 lo calculamos con la ecuación siguiente:

$$R_1 = \frac{R_G}{1 - \frac{V_{GG}}{V_{DD}}}$$

Eligiendo $R_G = 1 \text{ M}\Omega$

Al sustituir datos queda:

$$\frac{(12\text{V}) (1\text{M}\Omega)}{(12-2)\text{V}}$$

$$(12-2)\text{V}$$

Finalmente:

$$R_1 = 1.2 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = \frac{V_{DD}}{V_{GG}} (R_G)$$

Sustituyendo datos se obtiene:

$$\frac{(12\text{V}) (1\text{M}\Omega)}{2\text{V}}$$

$$2\text{V}$$

Finalmente:

$$R_2 = 6 \text{ M}\Omega$$

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No. 6

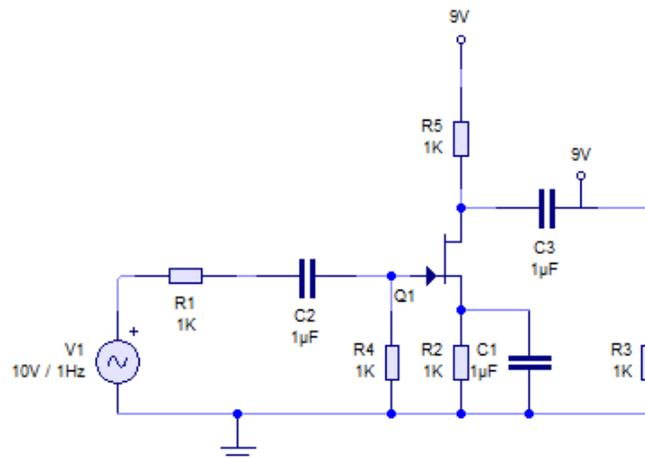
Punto de polarización y ganancia de un circuito con transistor JFET

Material:

- Cinco resistores de $1\text{K}\Omega$ $\frac{1}{4}$ W 5%
- Tres capacitores electrolíticos de $1\mu\text{F}$
- Una batería de 9 V
- Un transistor JFET K373
- Una batería de 6 V

Instrucciones:

- Construye un circuito como el que se muestra
- Mide el punto de polarización
- Cambia la fuente de alimentación
- Mide nuevamente el punto de polarización
- Inyecta una señal de 10V a 1KHz
- Mide la ganancia, la impedancia de entrada y la impedancia de salida del circuito.



4.6 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TRANSISTOR JFET

“El transistor bipolar basa su funcionamiento en dos tipos de carga: electrones y huecos”.¹⁸ Por este motivo se denomina bipolar: el prefijo *bi* significa “dos”. Sin embargo, en este apartado se hablará de otro tipo de transistor denominado transistor de efecto campo FET. Este tipo de dispositivos es unipolar ya que su funcionamiento depende sólo de un tipo de carga, ya sea en electrones libres o huecos. En otras palabras, el FET tiene portadores mayoritarios pero no minoritarios.

Para la mayoría de las aplicaciones lineales, el dispositivo más usado es el transistor bipolar. Pero hay algunas aplicaciones lineales en las cuales el FET es el más apropiado ya que tiene una alta impedancia de entrada y otras propiedades. Por otra parte, el FET es el dispositivo preferido para aplicaciones en las que funciona como interruptor, ya que no hay portadores minoritarios en un FET. Como resultado, puede cortar más rápidamente, ya que no existe carga almacenada que deba eliminar de la unión.

Hay dos tipos de transistores unipolares: JFET y MOSFET. Como se mencionó, se abordará el transistor de efecto campo de unión (JFET) y sus aplicaciones.

La figura 4-21a muestra una sección de semiconductor tipo n. El extremo inferior se denomina fuente (source) y el extremo superior drenador (drain). La fuente de alimentación V_{DD} obliga a los electrones libres a circular desde la fuente al drenador. Para producir un JFET, se difunden dos áreas de semiconductor tipo p en el semiconductor tipo n, como se observa en la figura 4-21b. Estas dos áreas p están conectadas internamente para tener una sola terminal de conexión externa denominada puerta (gate).

¹⁸ Malvino Paul, *Principios de electrónica*, p. 451.

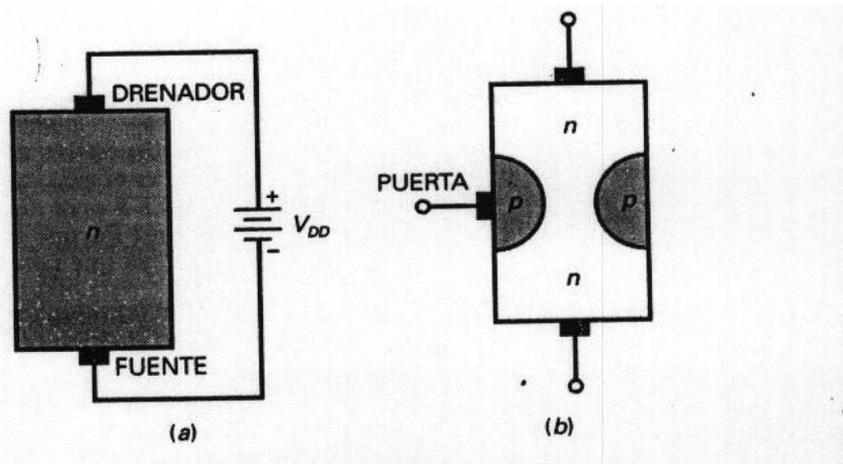


Figura 4-21 a) Parte del JFET; b) JFET de puerta única

Efecto de campo

Al polarizar un transistor JFET se conecta el positivo de la batería o fuente de alimentación al drenador, y la puerta o gate se conecta a la parte negativa de la fuente, con lo cual se produce un campo eléctrico que provoca la circulación de electrones que al combinarse con los huecos (agujeros o poros), originan las zonas de deplexión, estas zonas se pueden observar alrededor de las zonas positivas con color negro en la figura 4-21b.

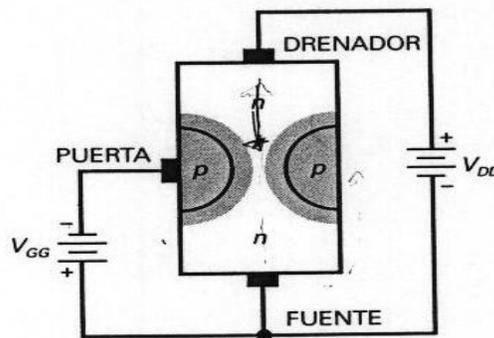


Figura 4-22 Polarización normal del JFET

Corriente de puerta

En la figura 4-22, la puerta tipo p y la fuente tipo n forman el diodo puerta-fuente. En un JFET siempre polarizamos en inversa el diodo puerta-fuente. Debido a la polarización inversa la corriente de puerta I_G es aproximadamente

cero, o lo que es equivalente, un JFET tiene una resistencia de entrada casi infinita.

Un JFET típico tiene una resistencia de entrada de cientos de megaohmios. Ésta es la gran ventaja que tiene un JFET sobre un transistor bipolar. Y es la razón de que los JFET sean excelentes en aplicaciones en donde se requiere una gran impedancia de entrada. Una de las aplicaciones más importantes del JFET es el *seguidor de fuente*, circuito análogo al seguidor de emisor, excepto en que su impedancia de entrada es del orden de cientos de megaohmios para frecuencias bajas.

La tensión de puerta controla las corrientes de drenador

Al analizar la figura 4-22 se puede observar que la corriente de fuente al drenador circula entre las dos zonas de depleción formadas alrededor de las terminales positivas con una intensidad alta debido a la polaridad de las zonas mencionadas.

Las zonas de depleción dependen de la polaridad de la “puerta”, y a su vez el canal por donde circula la corriente de electrones depende de las zonas de depleción. La corriente entre la fuente y el drenador será inversamente proporcional al voltaje negativo aplicado en la “puerta”.

El JFET actúa como un dispositivo controlado por tensión, ya que una tensión de entrada controla una corriente de salida. En un JFET, la tensión puerta-fuente V_{GS} determina cuánta corriente circula entre la fuente y el drenador. Cuando V_{GS} es cero, la corriente máxima del drenador circula a través del JFET. Por otra parte, si V_{GS} es suficientemente negativa, las capas de depleción entran en contacto y la corriente se corta.

Símbolo eléctrico

El JFET de la figura 4-22a se denomina JFET de canal n debido a que el canal entre la fuente y el drenador está hecho de semiconductor tipo n. La figura 4-22 muestra el símbolo eléctrico de un JFET de canal n. En muchas aplicaciones de

baja frecuencia, la fuente y el drenador son intercambiables debido a que se puede usar una de las terminales como fuente y la otra como drenador.

Las terminales de fuente y drenador no son intercambiables para frecuencias altas. Casi siempre, el fabricante minimiza la capacidad interna en el lado de drenador del JFET. Es decir, la capacidad entre la puerta y el drenador es menor que la capacidad entre la fuente y el drenador.

La figura 4-23 muestra un símbolo alternativo para un JFET de canal N. Este símbolo como puerta desplazada es preferido por la mayoría de los ingenieros y técnicos. La posición de la terminal de la puerta se desplaza al final del dispositivo, una ventaja definitiva en circuitos complicados con muchas etapas.

Existe también un JFET de canal P (figura 4-23c); el símbolo eléctrico de un JFET de canal P es similar al del JFET de canal N, excepto en que la flecha de la puerta apunta en sentido contrario, es decir, hacia afuera, lo que significa que todas las tensiones y corrientes están invertidas.

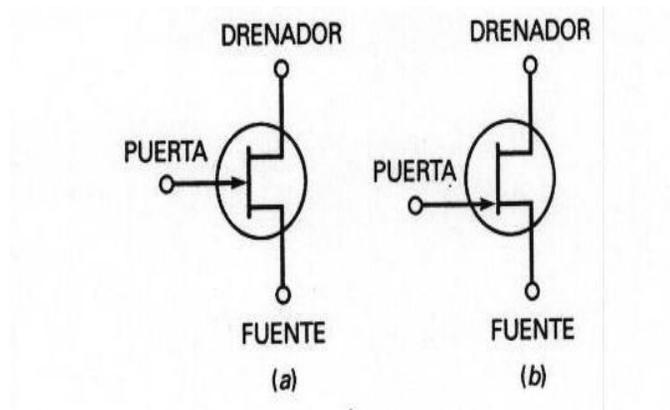


Figura 4-23 a) Símbolo eléctrico b) Símbolo con puerta desplazada

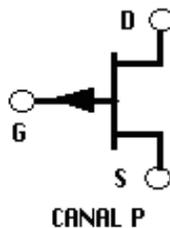


Figura 4-23c

4.7 CONSTRUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL TRANSISTOR MOSFET

El FET de semiconductor óxido-metal o MOSFET (del inglés Metal-Oxide Semiconductor FET) tiene una fuente, una puerta, un drenador y un sustrato. Sin embargo, a diferencia del JFET, la puerta está aislada eléctricamente del canal. Por esta causa, la corriente de puerta es incluso menor que en un FET. El MOSFET frecuentemente se denomina *IGFET*, es decir FET de puerta aislada.

Existen dos tipos de MOSFET: el de empobrecimiento y el de enriquecimiento. Aparte de algunas aplicaciones específicas, el MOSFET de empobrecimiento se usa muy poco.

“El MOSFET de enriquecimiento se usa mucho, tanto en circuitos discretos como integrados”.¹⁹ En circuitos discretos se usa como interruptor de potencia, que significa conectar y desconectar corrientes grandes. En circuitos integrados su uso principal es en conmutación digital, que es un proceso básico que fundamenta las computadoras modernas.

El MOSFET de empobrecimiento

En la figura 4-24 se muestra un transistor MOSFET de empobrecimiento, su funcionamiento es similar al descrito para la figura 4-22. Está integrado básicamente de una estructura de dos cristales semiconductores tipo N, y un semiconductor tipo P, sobre el cual se coloca de un lado el sustrato, que es una conexión más, y del otro lado de este cristal semiconductor tipo P, se coloca un material de óxido de silicio como dieléctrico, de tal manera que la puerta o gate quede aislada del canal causando que la corriente de puerta sea muy pequeña.

¹⁹ Malvino Paul, *op. cit.*, p. 503.

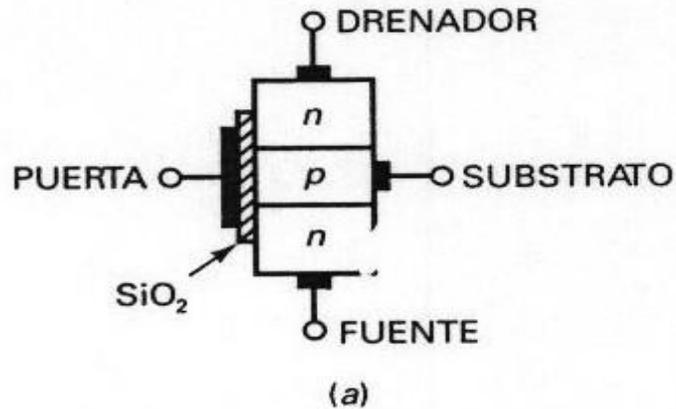


Figura 4-24 MOSFET de empobrecimiento.

En la figura 4-25a aparece un MOSFET de empobrecimiento con una tensión de puerta negativa. La circulación de los electrones es de la fuente o source, hacia el drenador. Como sucede en el transistor JFET, la tensión de puerta controla el ancho de canal. Cuanto más negativa sea la tensión de puerta la corriente de drenador se interrumpe. En consecuencia, el funcionamiento de un MOSFET es similar al de un transistor JFET cuando V_{GS} es negativa.

Al estar la puerta de un MOSFET aislada eléctricamente del canal, se puede aplicar una tensión positiva a la puerta, como se muestra en la figura 4-25b. La tensión positiva de puerta incrementa el número de electrones libres que circulan a través del canal. Cuanto más positiva sea la tensión de puerta, mayor será la conducción desde la fuente hacia el drenador.

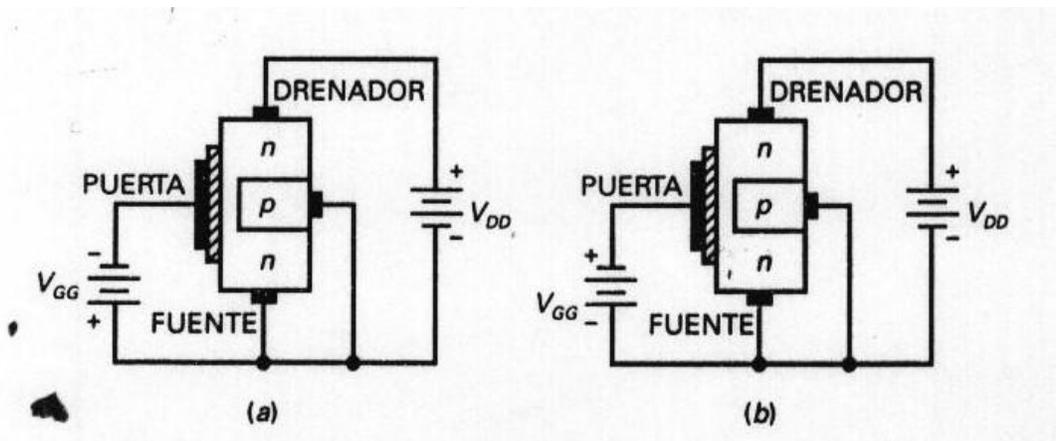


Figura 4-25a MOSFET de empobrecimiento con puerta negativa

El MOSFET de enriquecimiento

El MOSFET de empobrecimiento fue parte de la evolución hacia el MOSFET de enriquecimiento (también denominado MOSFET de acumulación). Gracias al MOSFET de enriquecimiento existen las computadoras personales.

La figura 4.26a representa un transistor MOSFET de enriquecimiento, en donde se puede observar que el substrato P se ubica en todo lo ancho hasta el dióxido de silicio de interfaz entre la puerta y el semiconductor P.

La figura 4-26b muestra tensiones de polarización normales. Cuando la diferencia de potencial en la puerta es cero, la intensidad de la corriente entre la fuente de alimentación y el drenador también se convierte en cero.

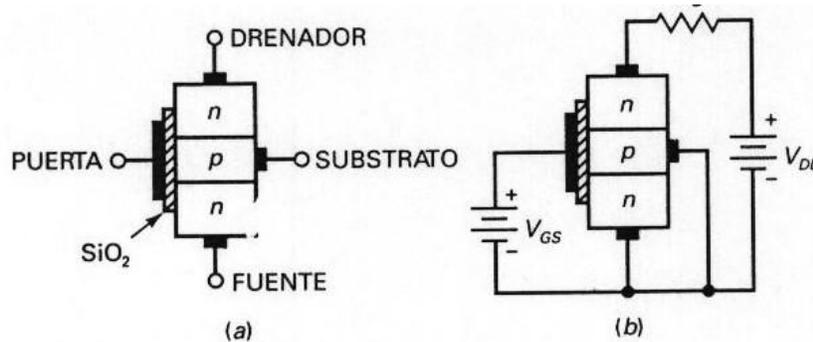


Figura 4.26 MOSFET de enriquecimiento a) No polarizado b) Polarizado

En los transistores MOSFET de enriquecimiento al principio no existe canal, como en los transistores JFET, por lo que debe ser inducido con un campo eléctrico que se origina al aplicar la diferencia de potencial V_{GS} , y dependiendo del valor de la tensión de V_{GS} se tendrá el proceso de creación del canal de conducción de corriente. En este proceso se pueden presentar tres situaciones, que se analizarán a continuación:

1. Cuando $V_{GS} = 0$

Cuando no existe una diferencia de potencial aplicada a la puerta, tampoco existe canal entre el drenador y la fuente de alimentación.

2. Cuando $V_{GS} > 0$

En este caso, los huecos son rechazados en la unión óxido-semiconductor lo que origina una región denominada “zona de depleción” entre la fuente de alimentación y el drenador, cuya anchura será directamente proporcional a la V_{GS} aplicada.

De este modo, se tendrá un valor de tensión V_{GS} , para la cual los electrones acumulados en la unión óxido-semiconductor crezcan de tal manera como el número de impurezas aceptadoras, con lo cual se inducirá un canal entre la fuente de alimentación y el drenador, esta diferencia de potencial se denomina “tensión umbral” y se simboliza por V_T .

3. Cuando $V_{GS} > V_T$ pero $V_T > 0$

Si se sigue aumentando la V_{GS} hasta lograr que sea mayor que la tensión umbral, se generará una concentración de electrones junto a la interfaz óxido-semiconductor, a la que se denomina “capa de inversión”.

El MOSFET de enriquecimiento así se clasifica porque su conductividad mejora cuando la tensión de puerta es mayor que la tensión umbral. El substrato crece hasta llegar a la capa dieléctrica de dióxido de silicio y bloquea la corriente al eliminar prácticamente el canal N. Para que exista una corriente eléctrica, la puerta debe ser positiva.

Características de salida

Una de las limitaciones de un MOSFET de enriquecimiento es que maneja potencias muy pequeñas, alcanzando 1 W como máximo. Para decidir el tipo de transistor MOSFET que se debe utilizar en un circuito, se deben analizar sus curvas características, las cuales proporcionan los fabricantes en manuales especiales.

Este tipo de transistores normalmente se trabajan en la zona activa, es decir, la parte recta de una de las curvas características. En la figura 4-27a se muestra un grupo de curvas características de un transistor MOSFET de enriquecimiento muy utilizado, en la cual se puede observar la parte recta de

cada curva, según la diferencia de potencial aplicado entre la puerta y la fuente, en este caso, se produce una corriente eléctrica desde el drenador que es controlada por medio del voltaje aplicado a la puerta.

Aquí también, la parte de la curva que va en ascenso corresponde a la zona de variación o crecimiento, la cual crece hasta alcanzar un valor en donde se mantiene la corriente más o menos constante, lo que permite diseñar un circuito electrónico al poder calcular todos los elementos requeridos para su funcionamiento adecuado como indica la curva seleccionada, de tal manera que el transistor pueda manejarse como una resistencia o también como si fuera una fuente de corriente, a esta parte recta se denomina “zona óhmica”.

En la figura 4-27b se presenta una curva típica en estos transistores, en la que no se tiene corriente del drenador hasta que la diferencia de potencial entre la puerta y la fuente sea mayor que la diferencia de potencial entre la puerta y la fuente en saturación. Al rebasar estos valores, el transistor queda polarizado en la parte recta de la curva causando que la corriente de drenador se mantenga constante aunque aumente la diferencia de potencial entre la puerta y la fuente.

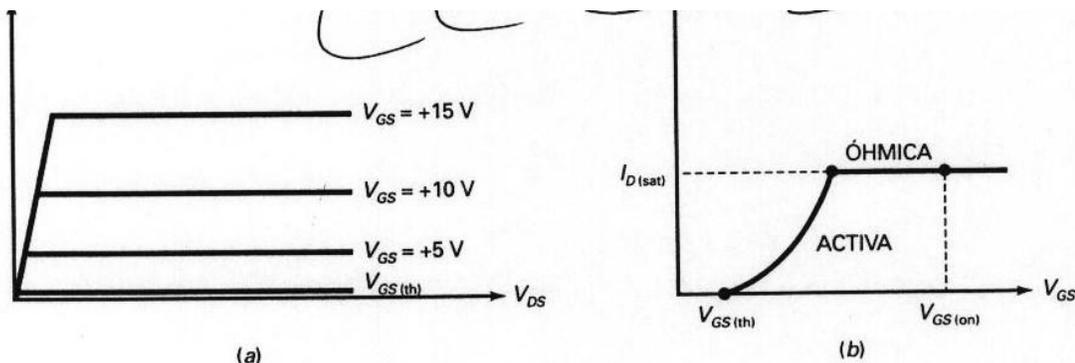


Figura 4-27 Gráfica de MOS de enriquecimiento a) Características de salida b) Características de transferencia

Símbolo eléctrico

El transistor MOSFET de enriquecimiento, al no tener una corriente eléctrica entre la fuente y el drenador debido a que no existe canal, se mantiene en corte. Simbólicamente se dibuja una línea de canal punteada indicando que el transistor está en estado de no conducción. Los transistores de canal N se

indican con una flecha del gate o puerta hacia adentro, y los transistores de canal P se indican con la flecha hacia afuera.

4.8 POLARIZACIÓN DEL TRANSISTOR MOSFET

En la figura 4-28a, la corriente de saturación de drenador en este circuito es:

$$I_{D(sat)} = \frac{V_{DD}}{R_D} \quad (4.1)$$

Y la tensión de corte de drenador es V_{DD} . La figura 4-28b muestra la recta de carga para continua entre una corriente de saturación de $I_{D(sat)}$ y una tensión de corte V_{DD} .

Cuando $V_{GS}=0$, el punto Q está en el extremo inferior de la recta de carga para continua. Cuando $V_{GS}=V_{GS(on)}$, el punto Q está en el extremo superior de la recta de carga. Cuando el punto Q está por debajo del punto Q_{test} , como se muestra en la figura 4-28b, el dispositivo está polarizado en la zona óhmica; es decir, un MOSFET de enriquecimiento está polarizado en la zona óhmica cuando se satisface esta condición:

$$I_{D(sat)} < I_{D(on)} \text{ cuando } V_{GS} = V_{GS(on)}$$

La ecuación 4.1 es importante, ya que nos indica si un MOSFET de enriquecimiento está funcionando en la zona activa óhmica. Dado un circuito con un MOSFET de enriquecimiento, podemos calcular la $I_{D(sat)}$. Si $I_{D(sat)}$ es menor que $I_{D(on)}$ cuando $V_{GS} = V_{GS(on)}$, sabremos que el dispositivo está polarizado en la zona óhmica y es equivalente a una pequeña resistencia.

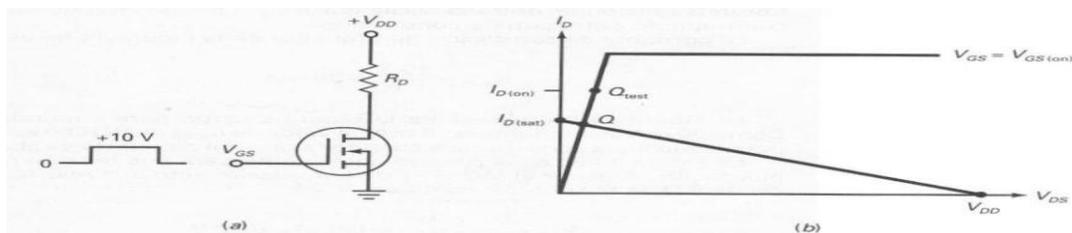


Figura 4-28 $I_{D(sat)}$ menor que $I_{D(on)}$

Ejemplo 4-5

¿Cuál es la tensión de salida en la figura 4-29a?

Solución:

$$V_{GS(on)} = 4,5 \text{ V}$$

$$I_{D(on)} = 75 \text{ mA}$$

$$R_{DS(on)} = 6 \Omega$$

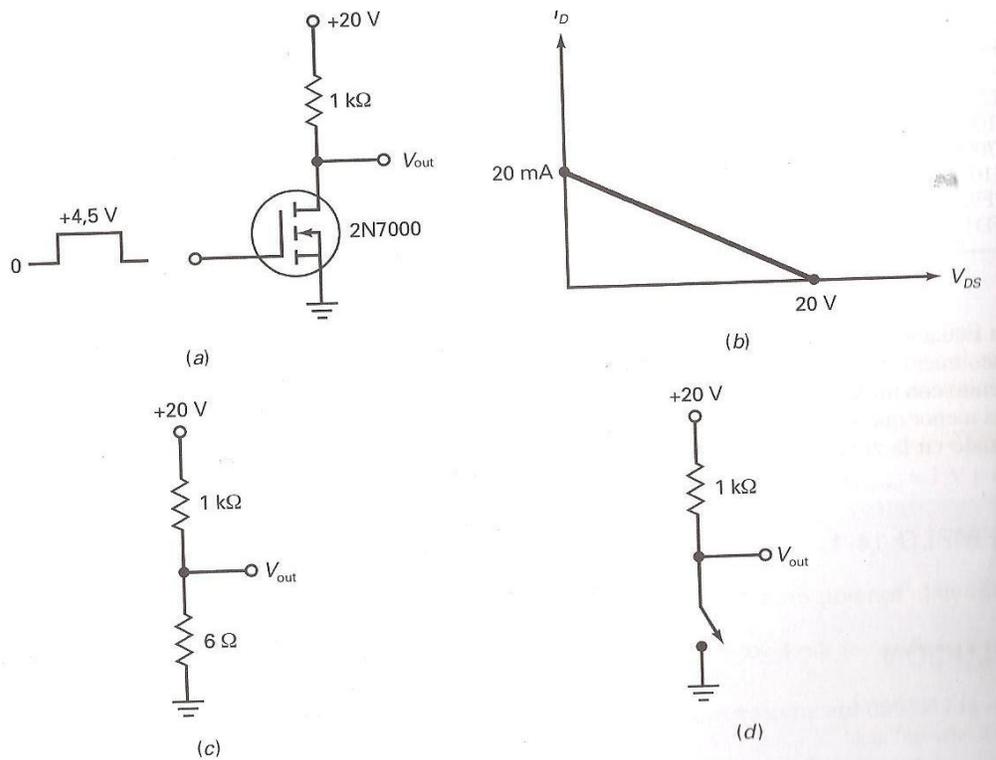


Figura 4-29a Conmutación entre corte y saturación

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No. 7

Funcionamiento de los transistores MOSFET

Materiales:

- Manual de transistores MOSFET

Instrucciones:

- 1) Traza en tu cuaderno las curvas de los siguientes transistores:
 - IR 2110
 - IRF 630
 - IRF 640
 - IRFP 140
 - IRFP250N
- 2) Busca en internet un programa de simulación del funcionamiento de transistores MOSFET, y en la función de *simulación*, selecciona *entrada lógica alta*, después elije la entrada lógica baja para un canal N, y luego para un transistor de canal P
- 3) Indica la polarización de las terminales D, S, G
- 4) Anota tus conclusiones.

AUTOEVALUACIÓN

Completa los siguientes enunciados:

1.- El _____ es un elemento de circuito de tres terminales que puede cumplir funciones de amplificador o llave.

2.- La región _____ del transistor bipolar es la zona que se utiliza para funcionar como amplificador.

Subraya la respuesta correcta:

1.- En esta configuración, la terminal de la base es común a los lados de entrada y salida, y usualmente se conecta a un potencial de tierra:

- a) Configuración de base común
- b) Configuración de emisor común
- c) Configuración de colector común

2.- En esta configuración, la fuente V_{BB} polariza directamente la unión B-E y controla la corriente de base:

- a) Configuración de base común
- b) Configuración de emisor común
- c) Configuración de colector común

3.- La característica de esta operación en el transistor es que ambas uniones, colector-base y base-emisor, se encuentran polarizados inversamente:

- a) Zona de corte
- b) Zona de saturación
- c) Zona activa

4.- En esta zona, circula una gran cantidad de corriente desde el colector al emisor, y hay sólo una pequeña caída de voltaje entre estas terminales:

- a) Zona de corte
- b) Zona de saturación
- c) Zona activa

RESPUESTAS

1. Transistor bipolar
2. Activa

Opción múltiple:

1. a
2. b
3. a
4. c

UNIDAD 5

AMPLIFICADORES OPERATIVOS

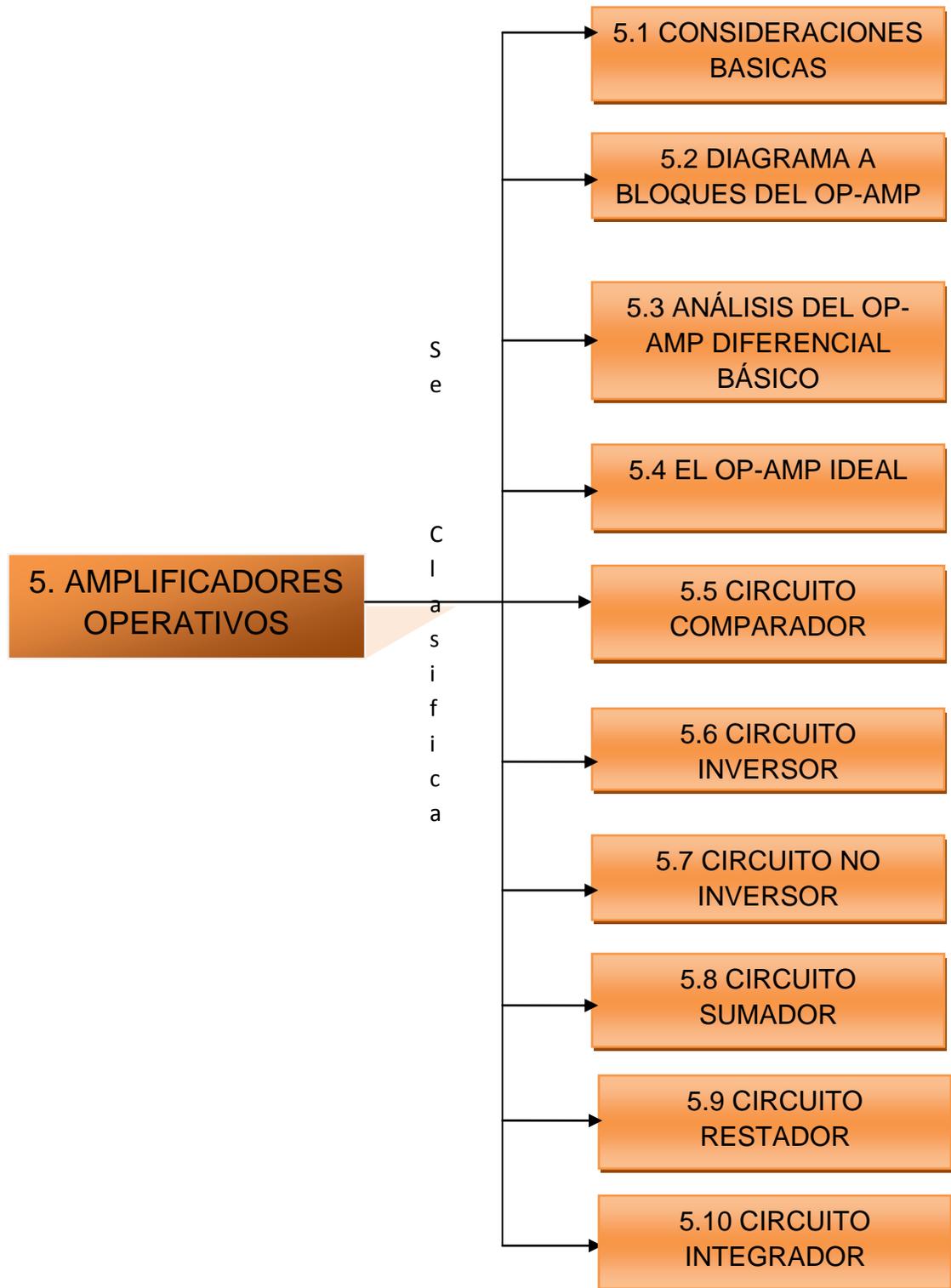
OBJETIVO

Descubrir y aplicar las principales configuraciones básicas de un op-amp.

TEMARIO

- 5.1 Consideraciones básicas
- 5.2 Diagrama a bloques del op-amp
- 5.3 Análisis del op-amp diferencial básico
- 5.4 El op-amp ideal
- 5.5 Circuito comparador
- 5.6 Circuito inversor
- 5.7 Amplificador no inversor
- 5.8 Circuito sumador
- 5.9 Circuito restador
- 5.10 Circuito integrador

MAPA CONCEPTUAL



INTRODUCCIÓN

Uno de los dispositivos electrónicos más versátiles y de mayor uso en aplicaciones lineales es el amplificador operacional, al que comúnmente se le denomina *op-amp* en inglés, y en español se conoce como A.O.

El término “operacional” de estos amplificadores originalmente se refería a operaciones matemáticas. Los primeros amplificadores operacionales se usaban en circuitos para sumar, restar y multiplicar.

Un amplificador operacional representa la forma común de un amplificador de muy alta ganancia, acoplado a C.D. con dos entradas, una inversora y la otra no inversora, dos alimentaciones de voltaje, una positiva y otra negativa, y una sola salida.

En esta unidad se detallarán las principales características de este amplificador y se describirá el amplificador ideal; se expondrá su uso realizando funciones aritméticas, y su empleo como comparador, inversor y no inversor, además se analizará el op-amp diferencial básico y se presentará un diagrama a bloques para comprender su funcionamiento.

5.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

Uno de los primeros usos de los amplificadores operacionales fue en instrumentos de medición, principalmente en la instrumentación electrónica a la cual le dio un gran impulso debido a sus características de operación, empleándose en fuentes de alimentación, generadores, moduladores, etc.

A continuación se enlistan las características que presenta un amplificador operacional ideal:

- Resistencia de entrada infinita
- Resistencia de salida nula (cero)
- Ganancia de tensión infinita
- Ancho de banda infinito
- Balance perfecto
- Intensidad de la corriente de entrada nula (cero)
- Factor de rechazo en modo común infinito
- Mantiene sus características a cualquier temperatura

En la figura 5-1a, se representa el circuito de un amplificador operacional con sus dos entradas y su única salida, en la figura 5.1b se muestra en su presentación en el mercado.

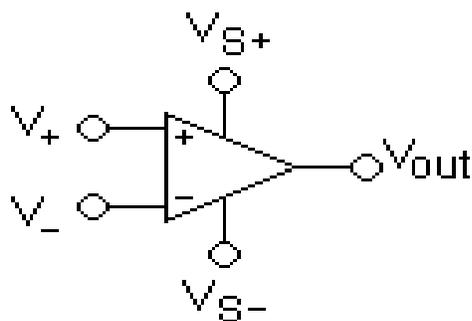


Figura 5-1a. Diagrama eléctrico del amplificador operacional.

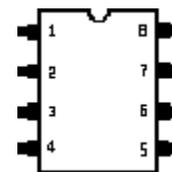


Figura 5.1b

El comportamiento de este dispositivo en corriente directa es de dos tipos:

1. *Lazo abierto*: La resultante a la salida será la diferencia de las dos entradas multiplicadas por un factor, siempre que no exista retroalimentación.
2. *Lazo cerrado*: Recibe este nombre cuando el circuito está retroalimentado; si tiene una retroalimentación negativa, siempre se optimizarán las características de operación aumentando la impedancia de entrada y disminuyendo la impedancia a su salida, y cuando la retroalimentación es positiva entonces producirá el efecto de un circuito oscilador.

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No.8

Conociendo el op-amp

Materiales:

- Manual de amplificadores operacionales
- Cuaderno de notas

Instrucciones:

- 1) Identifica las terminales soldables de los amplificadores operacionales.
- 2) Obtén las principales características indicadas por el fabricante de los diferentes tipos de amplificadores operacionales, con el objetivo de que te relaciones con el lenguaje técnico.
- 3) Efectúa una tabla comparativa con los datos obtenidos.
- 4) Reconoce los tipos de circuitos electrónicos que se pueden realizar con estos amplificadores operacionales.

5.2 DIAGRAMA A BLOQUES DEL OP-AMP

En la figura 5-2 se muestra el diagrama a cuadros o bloques de un amplificador operacional, en donde se pueden observar las dos entradas V_1 y V_2 y la única salida V_0 .

El primer bloque es la representación de un amplificador diferencial con salida balanceada, el segundo cuadro es un amplificador diferencial con salida desbalanceada, el tercer bloque es un amplificador que provee una salida con impedancia baja, y el cuarto bloque es un circuito restaurador de nivel que proporciona un voltaje de salida cercano a cero volts cuando no hay señal. El uso de los amplificadores diferenciales es para obtener un factor elevado de rechazo en modo común.

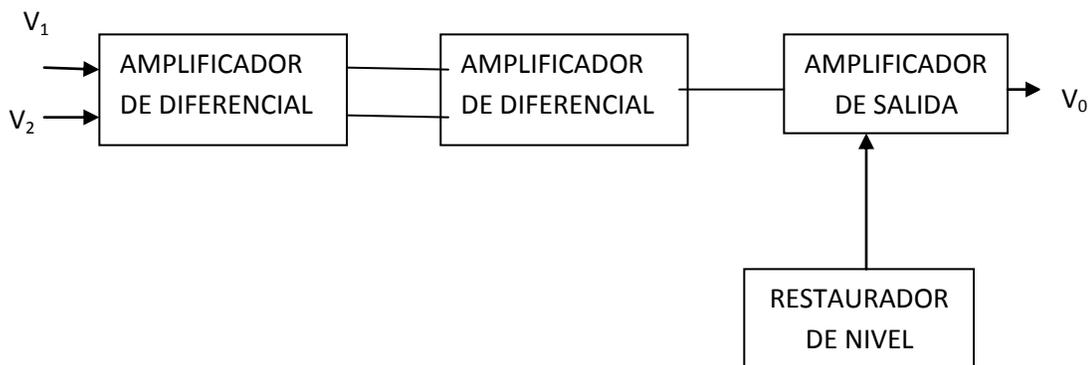


Figura 5-2 Diagrama a bloques de un amplificador operacional

5.3 ANÁLISIS DEL OP-AMP DIFERENCIAL BÁSICO

La empresa Fairchild Semiconductor introdujo por primera vez el amplificador operacional y obtuvo gran popularidad, por ello todas las empresas del mismo contexto crearon un modelo parecido al original $\mu A702$, el cual se popularizó con los dígitos finales 741.

Un estándar industrial

El 741 se ha convertido en un estándar industrial. Por su gran importancia, se utilizará el 741 como dispositivo básico en las siguientes explicaciones.

Los diferentes modelos del amplificador operacional, como se indicó con anterioridad, terminan con los dígitos 741, y para diferenciarlos según sus características de ganancia de tensión, rango de temperatura, nivel de ruido y otras características, se pueden encontrar en diferentes versiones (741, 741C, 741N, 741E). El 741C (la C indica nivel comercial) es el más económico y el más utilizado. Tiene una impedancia de entrada de $2M\Omega$, una ganancia de tensión de 100,000 y una impedancia de salida de $75\ \Omega$.

El amplificador diferencial de entrada

En la figura 5-3 se muestra el circuito interno simplificado del 741. Este circuito es equivalente al del 741 y de otros amplificadores operacionales posteriores. No es necesario entender en detalle el diseño, pero debe tenerse una idea general de cómo funciona. Teniendo esto en cuenta, su funcionamiento es el que se explica a continuación:

La etapa de entrada es un amplificador diferencial utilizando transistores *pnp* (Q_1 y Q_2). La resistencia de polarización actúa como una fuente de corriente. En el 741, Q_{14} es una fuente de corriente que reemplaza a la resistencia de polarización. R_2 y Q_{13} controlan la polarización de Q_{14} , que produce la corriente de amplificador diferencial utilizando una carga activa como resistencia del amplificador diferencial. Esta carga activa Q_{14} , actúa como una fuente de corriente con una impedancia extremadamente alta. Por ello, la ganancia de tensión del amplificador diferencial es mucho mayor que antes.

La señal incrementada del amplificador diferencial excita la base de Q_5 , que es un seguidor de emisor. Esta etapa incrementa el nivel de impedancia para no cargar el amplificador diferencial. La señal que sale de Q_5 se aplica a Q_6 . Los diodos Q_7 y Q_8 forman parte de la polarización de la etapa final. Q_{11} es

la carga activa de Q_6 . Por consiguiente, Q_6 y Q_{11} son como una etapa de EC con una muy alta ganancia de tensión.

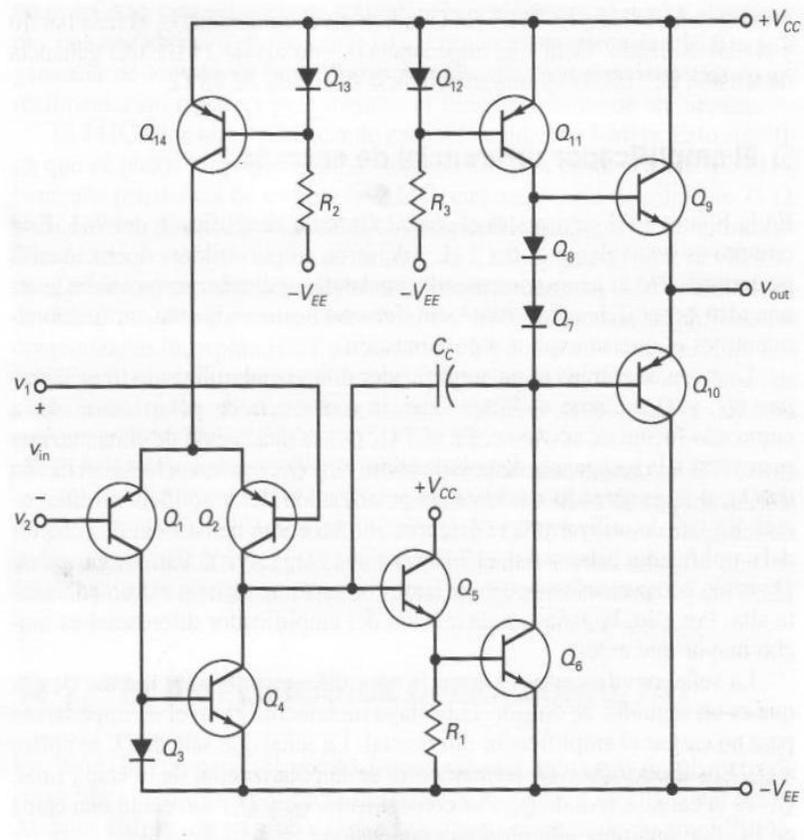


Figura 5-3 Circuito interno simplificado de un 741

La etapa final

La señal amplificada que sale de la etapa en EC va a la etapa final, que es un seguidor de emisor en contrafase clase B (Q_9 y Q_{10}). Debido a la alimentación simétrica (igual tensión positiva y negativa), la tensión de salida es idealmente 0V cuando la tensión de entrada es 0. Cualquier desviación de ésta se denomina tensión de *offset de salida*. Cuando existe una tensión de entrada de V_{in} , con la polaridad mostrada, la tensión de salida V_{out} , es positiva. Si V_{in} tiene una polaridad opuesta a la mostrada en la figura 5-3, V_{out} es negativa. Idealmente, V_{out} puede alcanzar $+V_{CC}$ o $-V_{EE}$ sin que la señal se recorte. Como una segunda aproximación, la excursión de salida es 1 0 2 V menor que cada

tensión de alimentación debido a la caída de tensión dentro del 741. Sus características son las siguientes:

- Impedancia de entrada 1 M Ω
- Impedancia de salida: 150
- Ganancia de tensión de lazo abierto: 110,000
- Ancho de banda: 1 MHz

Otras características de los operacionales reales son las siguientes, también aplican para el caso del 741:

- Corriente de polarización: 200nA
- Tensión de alimentación máxima: ± 18 V
- Tensión máxima de entrada: ± 13 V
- Tensión máxima de salida: ± 14 V
- Relación de rechazo de modo común RRMC: 90 dB

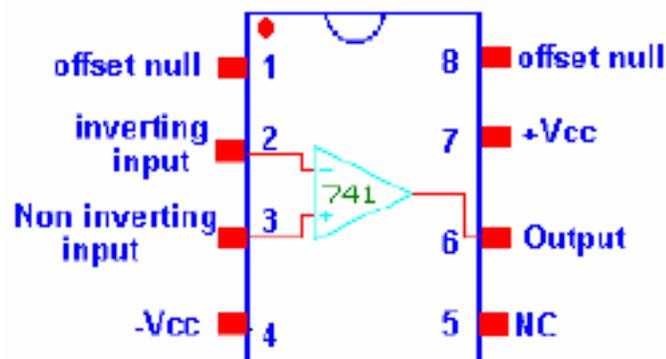


Figura 5-4 Presentación comercial de un amplificador operacional 741

5.4 EL OP-AMP IDEAL

Con la finalidad de tener una referencia del amplificador operacional, a continuación se enlistan las características que muestra un circuito amplificador operacional ideal. A partir de estos valores se podrán medir otros dispositivos

de este tipo no ideales, para las diferentes aplicaciones en circuitos electrónicos.

- Debido a su alta impedancia, en las entradas no circula corriente
- Debido a la alta ganancia, para obtener un valor de tensión finita, las tensiones en sus entradas es de cero volts
- Los efectos por cargas son nulos
- No hay limitaciones en la frecuencia de operación
- La resistencia de entrada es infinita
- La resistencia de salida es cero
- La tensión off set a la entrada vale cero
- El ancho de banda vale cero

Características

Antes de presentar las aplicaciones de los amplificadores, que es una tarea de selección complicada por las enormes posibilidades de los mismos, se estudiarán algunos puntos claves en la comprensión de estos amplificadores, como son:

- Relación de rechazo de modo común (RRMC)
- Tensión de offset
- Compensación de las corrientes de polarización
- Concepto de tierra virtual

Relación de rechazo de modo común (RRMC)

La relación de rechazo de modo común (RRMC) indica la capacidad del circuito para no trabajar con señales presentes en sus dos entradas de modo común, esto es un indicador de la calidad del amplificador operacional en uso.

Como se indico, la característica más importante de los operacionales es amplificar la diferencia entre entradas, entonces, ¿qué sucede si se aplica a las dos entradas el mismo potencial? En este caso, como no hay diferencia de

potencial su respuesta es nula, pero realmente no sucede de esta manera, por lo que para conocer la calidad del amplificador operacional se deberá efectuar el cociente de su ganancia diferencial entre su ganancia en modo común, y en forma directa se podrá verificar que a mayor cociente, mejor será el amplificador operacional. Esta intensidad de señales de radiofrecuencia se mide en decibeles, por tanto el resultado estará dado en esta medida.

En los op-amp existen dos ganancias:

- La ganancia diferencial (AD).
- La ganancia de modo común (AC).

Tensión de offset

Es la diferencia de potencial DC que existe en la salida cuando la entrada diferencial es cero. Esto sería un error de diseño, ya que no debe suceder, por ello los fabricantes evitan esta falla en los amplificadores operacionales dotándolos de un voltaje de offset para compensar este error.

Polarización del amplificador operacional

Debido a que la señal a los amplificadores operacionales, ingresa por las bases de los transistores del amplificador diferencial, se necesita una señal con poco nivel para hacerlos funcionar; esta poca cantidad de señal se toma de la señal de entrada que es la que se amplificará, por medio de resistencias que provocan la caída de tensión necesaria para su funcionamiento.

Tierra virtual

Se considera una tierra virtual a la diferencia de potencial de cero volts, y se considera que ambas entradas del amplificador operacional también están a cero volts, de esta manera se emplea el concepto de tierra virtual como si en verdad fuera una tierra real, sin serlo.

5.5 CIRCUITO COMPARADOR

Estos circuitos tienen valores determinados en su salida, los cuales dependen de la señal de entrada que es comparada con otra señal de referencia arbitraria. Por ejemplo, si la señal de entrada tiene un valor mayor que el de la señal de referencia, la tensión de salida tendrá un valor bajo; cuando la señal de entrada tiene un valor mayor que el de la señal de referencia, en la salida se tendrá un valor alto de tensión. Aunque también existe otra posibilidad, y es cuando el valor de la señal de referencia es cero, en este caso el circuito comparador se denomina “detector de cruce por cero”, cuando la señal de referencia es diferente de cero recibe el nombre de “comparador”. En la figura 5-5 se muestra el detector de cruce por cero.

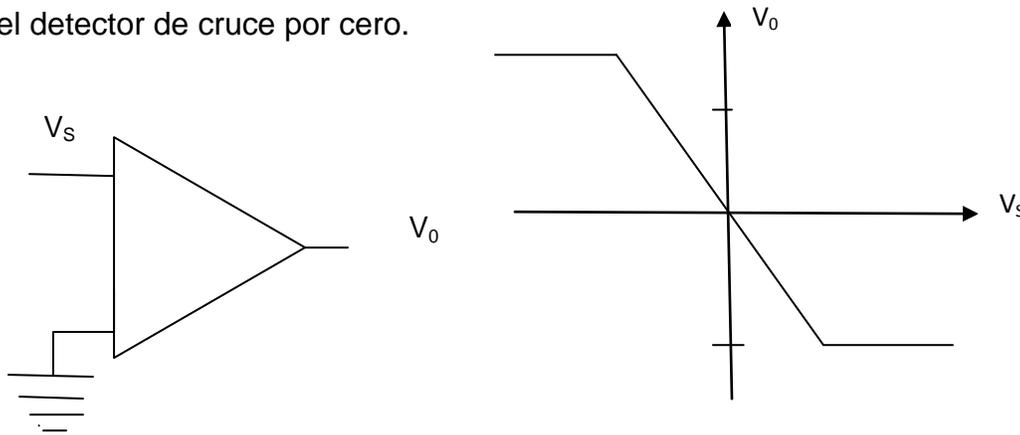


Figura 5-5 a) Diagrama del detector de cruce por cero

5.5)b Gráfica.

Un dispositivo de este tipo es el comparador 311. Tanto el amplificador operacional de propósito general, como el comparador, no funcionan adecuadamente si hay ruido en cualquier entrada. Para resolver este problema se mostrará que, agregando una retroalimentación positiva, se resuelve el problema del ruido. La retroalimentación positiva no elimina el ruido, sino que logra que el amplificador operacional responda menos a él. Estos circuitos mostrarán como obtener mejores detectores de nivel de voltaje y también nos permitirán comprender cómo funcionan los generadores de onda cuadrada (multivibradores), así como los generadores de pulso único (multivibradores monoestables).²⁰

²⁰ Coughlin, Robert F., *Amplificadores operacionales*, p. 87.

En la figura 5-6 se presenta un comparador de voltaje con referencia positiva.

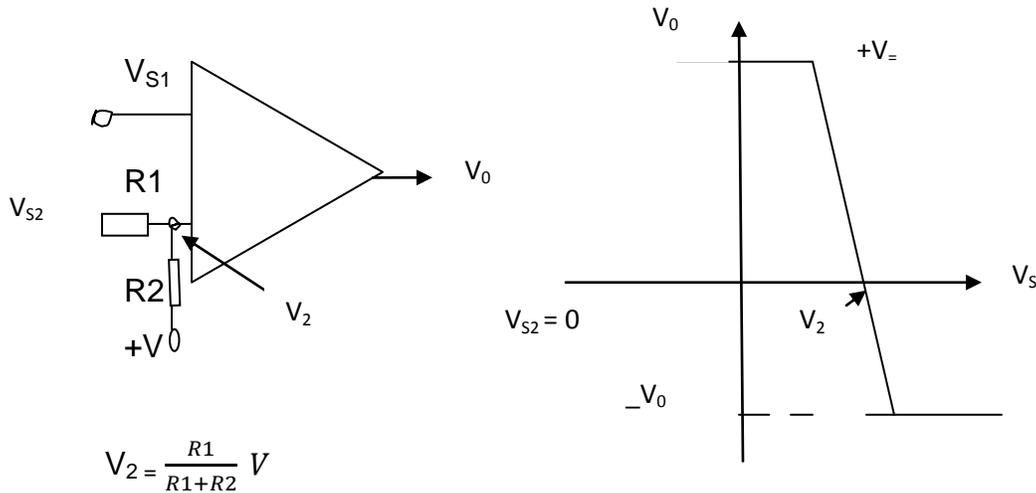


Figura 5-6 a) Diagrama de un comparador de voltaje con referencia positiva.

5.6 b) Gráfica.

5.6 CIRCUITO INVERSOR

Este circuito se denomina inversor debido a la función que realiza con la señal de entrada, ya que la invierte una fase de 180° eléctricos, es decir que cuando la señal de entrada va de la línea de referencia hacia arriba, la señal de salida va de la línea de referencia hacia abajo. En estos circuitos no hay corriente de entrada en ninguna de las entradas.

En la figura 5-7 se muestra un amplificador operacional inversor, el cual funciona de la siguiente manera: Al no existir corriente en las terminales 2 y 3, tampoco habrá corriente sobre el resistor R1, en este caso el voltaje en la entrada positiva (3) es de cero. Ahora, del punto (1) se toma una muestra y se retroalimenta la entrada número (2) a través del resistor R2 con un voltaje negativo igual al voltaje positivo de la entrada (3). De esta manera, el voltaje de entrada aparecerá sobre el resistor R3 a la terminal (2).

Análisis matemático:

$$V_{in} = (I_1) (R_3) \dots \dots \dots (1)$$

Despejando I_1 de la ecuación (1) se obtiene:

$$I1 = \frac{V_{in}}{R3} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Pero: } I1 = I2 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Tambi3n: } \frac{-V_{out}}{R2} = \frac{V_{in}}{R3} \dots \dots (4)$$

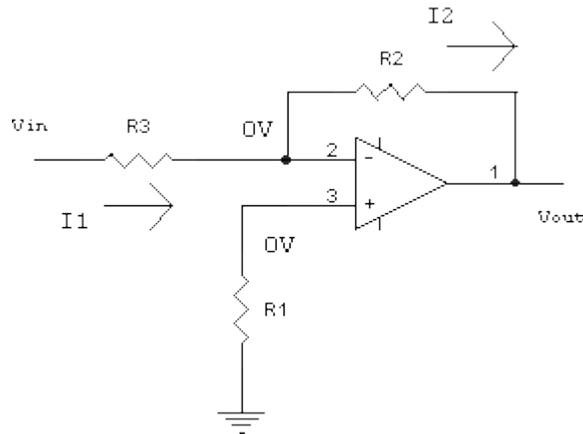


Figura 5-7 Circuito inversor

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Pr3ctica No. 9

Amplificador inversor

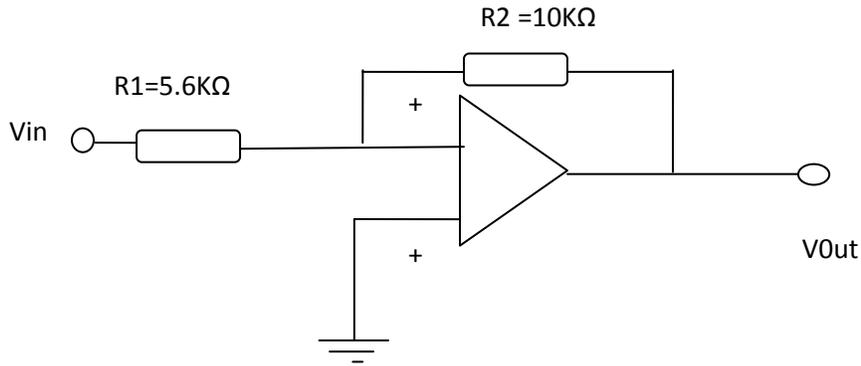
Material es:

- Amplificador operacional LM741
- Fuente de alimentaci3n sim3trica variable.
- Mult3metro digital
- Oscilador de audiofrecuencia
- Un resistor de 5.6KΩ 1/4W 5%
- Un resistor de 10KΩ 1/4W 5%
- Seis jumper con caim3n

Instrucciones:

Realiza el circuito mostrado en la figura:

- 1) Alimenta el dispositivo con +12VDC y -12VDC
- 2) A la entrada del circuito, inyecta una señal de 5KHz con 1V, 2V, 3V, 4V, 5V
- 3) Calcula el voltaje a la salida del circuito con lápiz y papel
- 4) Comprueba los voltajes calculados empleando el multímetro digital



5.7 AMPLIFICADOR NO INVERSOR

El amplificador no inversor es otro circuito básico de amplificador operacional. Utiliza realimentación negativa para estabilizar la ganancia total de tensión. Con este tipo de amplificadores, la realimentación negativa también provoca el incremento de la impedancia de entrada y la disminución de la impedancia de salida.

Circuito básico

La figura 5-8 muestra un circuito no inversor en donde se observa que el voltaje de entrada en la terminal positiva V_1 no inversora la hace funcionar de tal manera que la señal en la terminal de salida V_{out} estará en la misma fase que la señal de entrada, pero con un nivel amplificado. Parte de esta tensión se realimenta hacia la entrada a través de un divisor de tensión. La tensión a través de R_1 es la tensión de realimentación que se aplica a la entrada inversora, y es casi igual a la entrada no inversora. Debido al gran valor de ganancia de tensión en lazo abierto, la diferencia de tensión entre v_1 y v_2 es muy pequeña y como la tensión de realimentación se opone a la tensión de entrada, la realimentación es negativa.

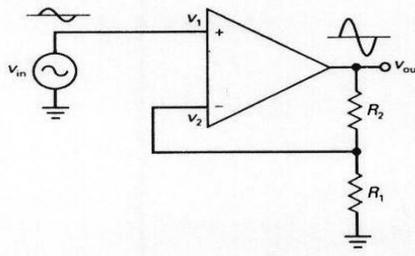


Figura 5-8 Amplificador no inversor

Ésta es la explicación de cómo la realimentación negativa estabiliza la ganancia total de tensión: si la ganancia de tensión en lazo abierto, A_{OL} crece por alguna razón, la tensión de salida aumentará y realimentará más tensión de entrada neta $v_1 - v_2$. Por tanto, incluso aunque A_{OL} se incremente, $v_1 - v_2$ disminuye, y la salida final crece mucho menos de lo que haría sin realimentación negativa. El resultado global es sólo un ligero incremento en la tensión de salida.

Corto circuito virtual

Cuando se conecta un segmento de cable entre dos puntos de un circuito, la tensión de ambos puntos con respecto a masa es idéntica. Además, el cable proporciona un camino para que la corriente circule entre ambos puntos. Un cortocircuito mecánico (un cable entre dos puntos) es un corto tanto para tensión como para corriente.

Un corto circuito virtual es diferente. Este tipo de cortos se pueden usar para analizar rápidamente amplificadores no inversores y circuitos relacionados. El cortocircuito virtual utiliza estas dos propiedades de un amplificador operacional ideal:

- 1) Como R_{in} es infinita, ambas corrientes de entrada son cero.
- 2) Como A_{OL} es infinita, $v_1 - v_2$ es cero.

La figura 5-9 muestra un circuito virtual entre las dos terminales de entrada del amplificador operacional. El cortocircuito virtual es un corto para

tensión pero un circuito abierto para corriente. Como recordatorio, la línea a trazos significa que la corriente no puede fluir a través de ella. Aunque el cortocircuito virtual es una aproximación ideal, proporciona respuestas muy precisas cuando se utiliza con realimentaciones fuertes.

Así es como se empleará el cortocircuito virtual: siempre que se analice un amplificador no inversor o un circuito similar, se puede imaginar un cortocircuito virtual entre las terminales de entrada del amplificador operacional. Si el dispositivo se mantiene funcionando en la parte lineal de la curva de operación, su ganancia de voltaje en lazo abierto es casi infinita presentando un cortocircuito virtual en las dos terminales de entrada de dicho dispositivo.

Una indicación más: debido al cortocircuito virtual, la tensión de entrada inversora sigue a la no inversora. Si la tensión de entrada no inversora crece o decrece, la tensión de entrada inversora crece o decrece inmediatamente al mismo valor. Esta acción de seguimiento se denomina autoevaluación. La entrada no inversora tira de la entrada inversora hacia arriba o hacia abajo hasta el mismo valor.

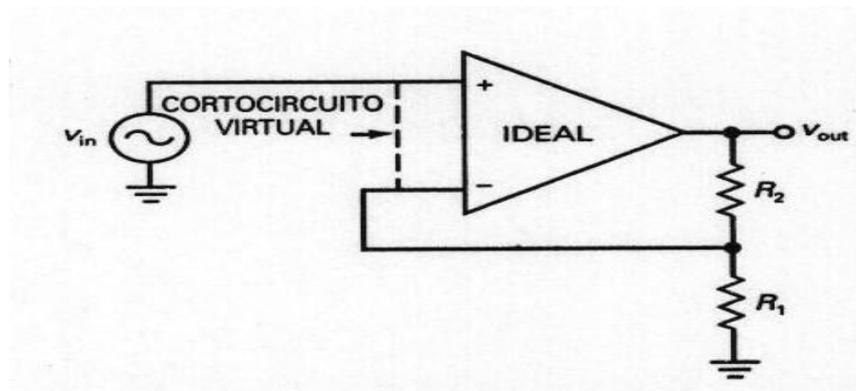


Figura 5-9 Cortocircuito virtual

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No. 10

Amplificador no inversor

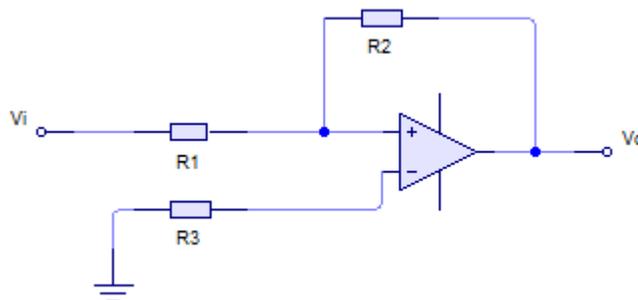
Materiales:

- Amplificador operacional $\mu A741$
- Fuente de alimentación simétrica variable
- Dos resistores de $1K\Omega$ 1/4W 5%
- Un resistor de $12K\Omega$ 1/4W 5%
- Multímetro digital
- Seis jumpers con caimán

Instrucciones:

Realiza el circuito electrónico de la siguiente figura:

- 1) Alimenta la entrada V+ con 15 VDC
- 2) Alimenta la entrada V- con -15 VDC
- 3) Inyecta una señal a la entrada del circuito de 10KHz a 0.2VAC
- 4) Inyecta la misma señal a 0.4VAC
- 5) Inyecta la misma señal a 0.6 VAC
- 6) Calcula la ganancia para los pasos 3,4 y 5.



5.8 CIRCUITO SUMADOR

Las aplicaciones de los amplificadores operacionales son tan amplias y variadas que es imposible exponerlas detalladamente. Además es necesario entender la realimentación negativa antes de estudiar alguna de las aplicaciones más avanzadas. Por ahora se expondrán dos circuitos prácticos:

El amplificador sumador

Siempre que se necesite combinar dos o más señales analógicas en una sola salida, es natural utilizar un amplificador sumador como el de la figura 5-10. Por simplicidad, el circuito muestra sólo dos entradas, pero se pueden tener tantas entradas como se necesite para la aplicación.

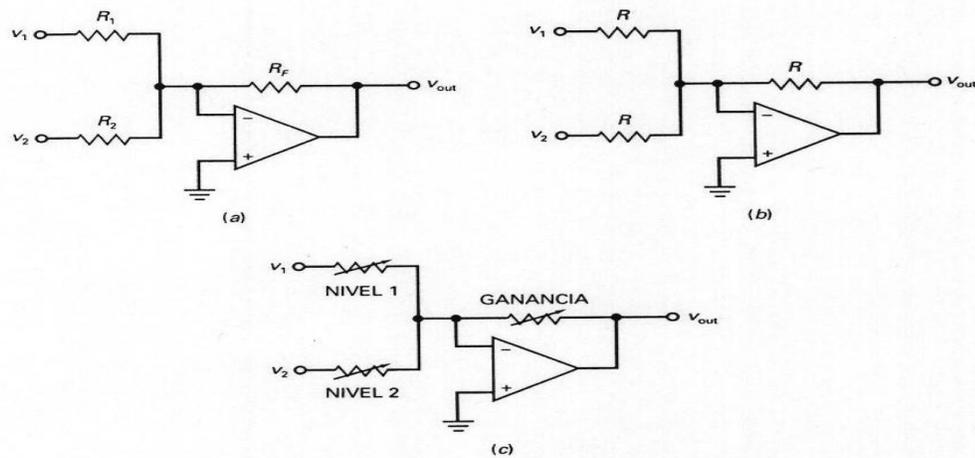


Figura 5-10 Amplificador sumador

Un circuito como éste amplifica cada señal de entrada. La ganancia para cada canal de entrada viene dada por el cociente entre la resistencia de alimentación y la resistencia de entrada apropiada. Por ejemplo, las ganancias de tensión en lazo cerrado de la figura 5-10a son:

$$A_{CL1} = \frac{R_F}{R_1} \text{ y } A_{CL2} = \frac{R_F}{R_2}$$

El circuito sumador combina todas las señales de entrada amplificadas en una sola salida, dada por:

$$V_{out} = A_{CL1} v_1 + A_{CL2} v_2$$

Es fácil probar la ecuación. Como la entrada inversora es una masa virtual, la corriente de entrada total es:

$$i_{in} = i_1 + i_2 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}$$

Ejemplo 1

Tres señales de audio excitan al amplificador sumador de la figura 5-11, ¿cuál es la tensión alterna de salida?

Solución:

Los canales tienen ganancias de tensión en lazo cerrado de:

$$A_{CL1} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} = 5$$

$$A_{CL2} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 10$$

$$A_{CL3} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} = 2$$

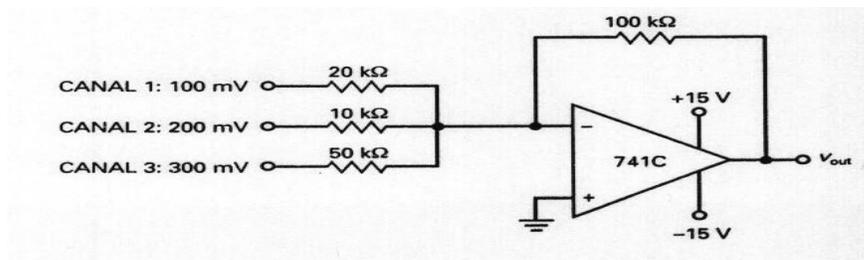


Figura 5-11

5.9 CIRCUITO RESTADOR

El proceso que realiza un amplificador operacional restador es tomar la diferencia entre la tensión de dos señales, una de entrada y otra de salida, para después amplificarla. Esta operación tiene diversas aplicaciones, ya sea en matemáticas, en medicina, en electrónica y en muchos casos más. Se toma la diferencia de tensión entre dos puntos de un proceso para determinados fines.

En el circuito de la figura 5-12, la tensión V1 se conecta a tierra, y por lo mismo la tensión V2 indicará un diseño inversor. Para tener un diseño no

inversor, se deberá conectar a tierra por medio de un divisor de tensión integrado por resistores; en el circuito se muestran ambas posibilidades.

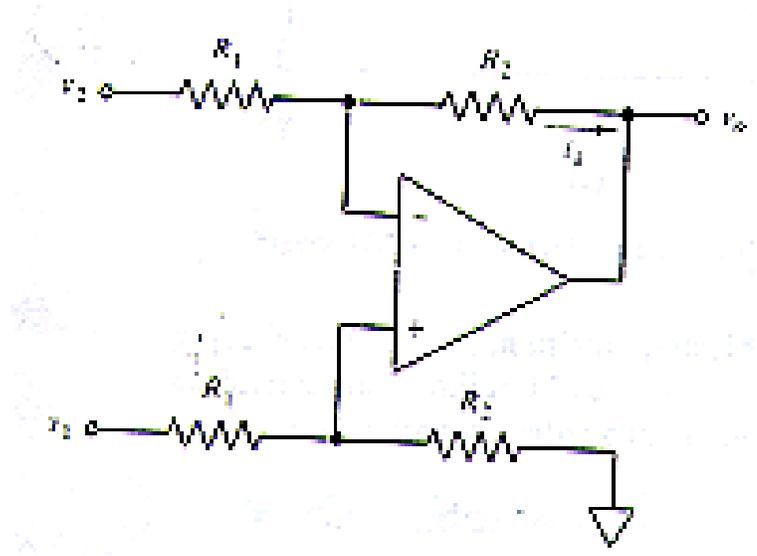


Figura 5-12 Circuito amplificador operacional restador (inversor y no inversor)

5.10 CIRCUITO INTEGRADOR

Emplear y probar el op-amp, como circuito integrador, es una de las más interesantes operaciones aritméticas de este circuito integrado.

Como se observa en la figura 5-13, la retroalimentación se realiza a través de un capacitor S_0 , de este modo se tendrá a la salida del dispositivo un voltaje amplificado con una diferencia en fase que es proporcional a la de la señal de entrada, dependiendo del valor del capacitor, ya que éste introduce un retardo en tiempo que se calcula con la ecuación matemática:

$t = RC$, en donde:

T = tiempo (en segundos)

R= valor de la resistencia R1 en ohms

C= valor del capacitor en microfaradios

(En el dominio de la frecuencia)

$$V_0(s) = -\frac{1}{sRC} V_i(s)$$

$$V_0(s) = -\frac{1}{RSC} V_i(s)$$

(En el dominio del tiempo)

$$V_0(t) = -\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t V_i(t) dt$$

$$V_0(t) = -\frac{1}{RC} \left[\int_{-\infty}^0 V_i(t) dt + \int_0^t V_i(t) dt \right]$$

La primera integral se hace cero ya que supone condiciones nulas, por tanto:

$$V_0(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i(t) dt$$

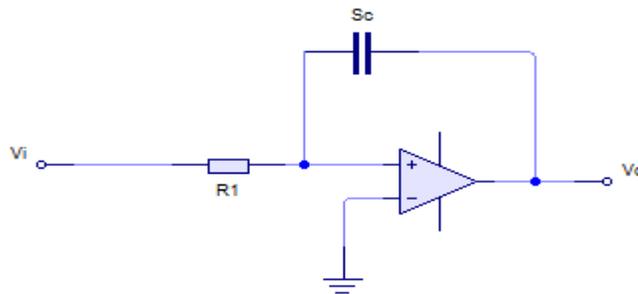


Figura 5-13 Circuito integrador

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No. 11

Circuito sumador

Materiales:

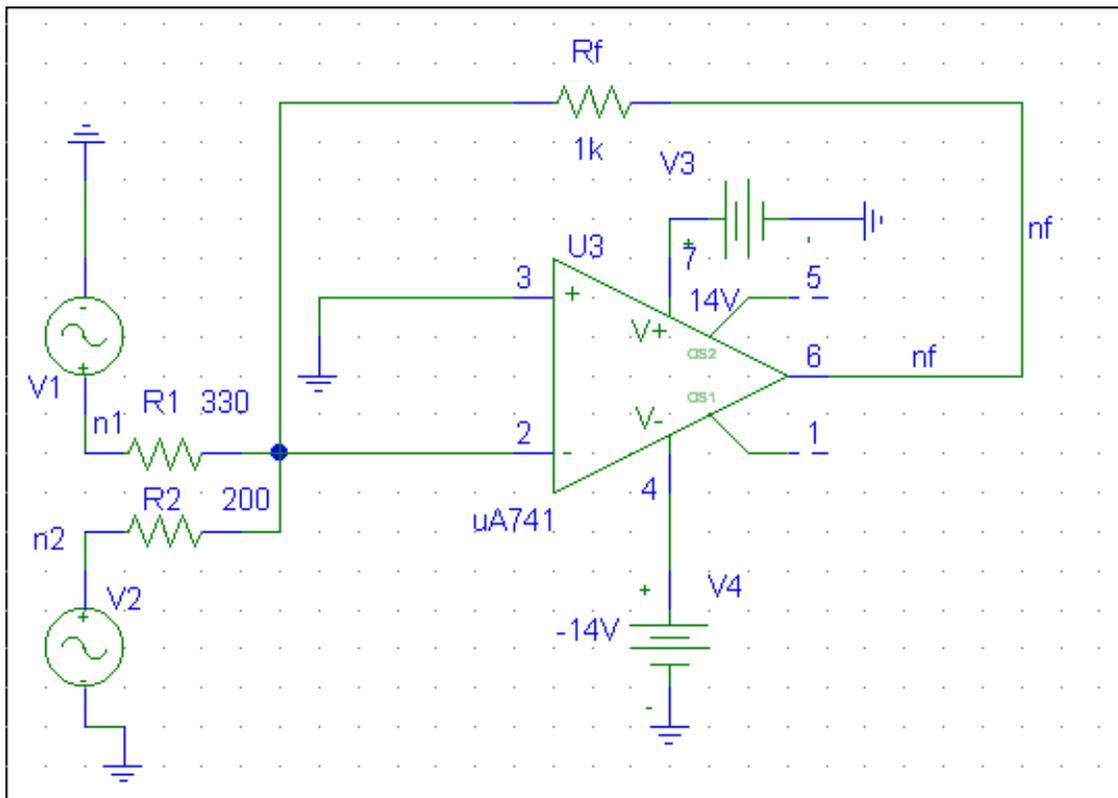
- Dos osciladores de audiofrecuencia
- Un multímetro digital
- Una fuente de alimentación de DC variable, simétrica.
- Un amplificador operacional LM741
- Un resistor de 330Ω 1/4W 5%
- Un resistor de 200Ω 1/4W 5%

- Un resistor de $1K\Omega$ 1/4W 5%

Instrucciones:

Construye el circuito electrónico de la figura mostrada:

- 1) Inyecta una señal sinusoidal de 3KHz a 1Vpp
- 2) Mide la señal a la salida
- 3) Calcula las ganancias individuales
- 4) Con el osciloscopio, verifica la fase de las señales de entrada y la señal sumada a la salida.



AUTOEVALUACIÓN

Completa los siguientes enunciados:

- 1.- En un _____, la salida deliberadamente se intenta saturar.
2. El op-amp está _____ cuando la salida alcanza un nivel de tensión determinado a partir del cual la señal de salida no puede variar su amplitud.
- 3.- _____ implica que a pesar de que el voltaje sea aproximado a cero, no existirá corriente a través de la entrada del amplificador hacia tierra.
- 4.- Un _____ moderno es un circuito integrado de transistores con una ganancia de voltaje del lazo abierto muy grande y una resistencia de entrada muy alta.
- 5.- _____ es el circuito de ganancia constante más usado. La tensión de salida se obtiene al multiplicar la entrada por una ganancia fija constante, establecida por la relación entre _____ y _____ resultando invertida esta señal respecto a la entrada.

Subraya la respuesta correcta:

1. Un amplificador sumador puede tener:
 - a) Dos o más señales de entrada
 - b) No más de dos señales de entrada
 - c) Impedancia de entrada cerrando igual a infinito
 - d) Un valor fijo de ganancia

2. El 741c tiene una frecuencia de ganancia de unidad de:
 - a) 10 Hz
 - b) 1MHZ
 - c) 15 MHz
 - d) 100 MHz

3. Permite entrada tanto por la puerta inversora como por la no inversora:
 - a) Modo inversor
 - b) Modo no inversor
 - c) Modo diferencial
 - d) Modo amplificador

4. Tiene una impedancia de entrada de $2\text{ M}\Omega$, una ganancia de tensión de 100,000 y una impedancia de salida de $7\text{ s}\Omega$:
 - a) LM124
 - b) LM348
 - c) LM741C
 - d) LF517A

5. La tensión de salida es proporcional a la derivada de la señal de entrada V_i y a la constante de tiempo, la cual generalmente se hace igual a la unidad:
 - a) Amplificador sumador
 - b) Amplificador restador

- c) Amplificador derivado
- d) Amplificador integral

RESPUESTAS

1. Comparador de voltaje
2. Saturado
3. Tierra virtual
4. Op-amp
5. Modo inversor, R_f y R

Opción múltiple:

1. a
2. b
3. c
4. c
5. c

BIBLIOGRAFÍA

Boylestad, Robert L., *Electrónica: Teoría de circuitos*, México, Prentice Hall, 1997.

Boylestad, Robert L., *Introducción al análisis de circuitos*, México, Prentice Hall, 2003.

Coughlin, Robert F., *Amplificadores operacionales*, México, Prentice Hall, 1998.

Dorf, Richard C., *Circuitos eléctricos: introducción al análisis y diseño*, México, Alfaomega, 2000.

Hayt, William H. Jr. y Durbin, Steven M., *Análisis de circuitos en ingeniería*, México, McGraw-Hill, 1993.

Malvino, Albert P., *Principios de electrónica*, México, McGraw-Hill, 1993.

GLOSARIO

Amplificador: Es un circuito con dispositivos electrónicos que aumentan la forma de una señal senoidal que circula por él. Puede ser amplificador de voltaje, de corriente o de potencia.

Amplificador diferencial: Circuito con dos transistores cuya salida es una versión amplificada de la señal de entrada diferencial entre las dos bases.

Amplificador operacional: Es un dispositivo electrónico capaz de amplificar corriente de alta ganancia de tensión que se utiliza para frecuencias de unos cuantos Hertz hasta poco más de 2 MHz.

Ancho de banda: Es la diferencia entre la frecuencia de corte superior y la frecuencia de corte inferior. Cuando el amplificador no tiene frecuencia de corte inferior, el ancho de banda será el mismo que la frecuencia de corte superior.

Ánodo: Elemento de los dispositivos electrónicos que recibe el flujo de corriente de los electrones.

Base común: Configuración de amplificador en donde la señal de entrada alimenta la terminal del emisor y la señal de salida sale por la terminal del colector.

Cátodo: Elemento de los dispositivos electrónicos que proporciona el flujo de corriente de los electrones.

Circuito en emisor común: Es un circuito a base de transistores bipolares en el cual el emisor se conecta directamente a tierra o masa del circuito.

Diodo rectificador: Dispositivo electrónico que consta de dos cristales semiconductores dopados y unidos, uno tipo N y el otro tipo P.

Diodo zener: Diodo diseñado para funcionar en inversa en la zona de ruptura con una tensión de ruptura muy estable.

Efecto zener: Se refiere a la extracción de electrones de valencia en un diodo semiconductor polarizado en sentido inverso, debido a la intensidad de un campo eléctrico muy fuerte.

Electrón libre: Son aquellos electrones que no logra sujetar el átomo, los cuales pueden circular fácilmente al aplicarles un voltaje.

Enlace covalente: Son los pares de electrones formados con los electrones de diferentes átomos de un material como los cristales de silicio o de germanio.

Entrada inversora: Es el efecto que produce un amplificador diferencial o un amplificador operacional al invertir la señal de entrada.

Entrada no inversora: Es el efecto que produce un amplificador diferencial o un amplificador operacional a una señal de entrada, a la que no modifica su fase.

Fotodiodo: Es un diodo semiconductor cuya corriente que circula a través de él, depende de la intensidad de la luz que incide sobre su superficie.

Germanio: Es un elemento del grupo IV A de la tabla periódica de los elementos, se encuentra en forma de cristal, en cuyo estado no conduce electricidad, por ello es necesario doparlo para que la conduzca. De igual forma funciona el silicio que es el más utilizado por encontrarse en grandes cantidades en la naturaleza.

Hueco, agujero o poro: Es la falta de un electrón cuando se forman los pares covalentes entre un elemento del grupo III A de la tabla periódica, los cuales tienen tres elementos en su última órbita, con el silicio o el germanio que tienen cuatro electrones en su última órbita. Esta falta de electrón se comporta como ion positivo.

Intrínseco: Se refiere a un semiconductor puro. Un cristal que contiene solamente átomos de silicio puro o intrínseco.

Extrínseco: Es el material semiconductor dopado o impuro.

MOSFET: Es un transistor dopado de efecto de campo con dióxido de silicio en su estructura. Dependiendo del dopado se clasifica en nMOS o pMOS. Su característica es que su terminal “puerta” o “gate”, está formada por una unión metal-óxido-semiconductor. Los hay de canal N y de canal P.

Polarización directa: Se refiere a la aplicación de una diferencia de potencial para producir una corriente interna que supere la barrera de potencial.

Polarización inversa: Es la aplicación de una diferencia de potencial a un semiconductor para ensanchar su barrera de potencial evitando circulación de corriente.

Polarización por divisor de tensión: Circuito de polarización en el que el circuito de la base incluye un divisor de tensión que aparece fijo en la resistencia de entrada de la base.

Portador: Es el electrón o los agujeros que quedan libres al formarse los enlaces covalentes con otros átomos.

Puerta: Terminal de un transistor de efecto campo que controla la corriente de drenador. Terminal del tiristor que se utiliza para poner en activo el dispositivo.

Realimentación: Es el uso de una parte de la señal de salida de un circuito para inyectarla de nuevo al proceso. Esta señal está defasada 180° eléctricos con respecto a la señal original.

Rectificador de media onda: Es el circuito que rectifica únicamente la mitad del ciclo, utiliza un diodo semiconductor.

Rectificador de onda completa: Es un circuito que rectifica los dos ciclos de una onda senoidal de entrada. Utiliza dos diodos con el secundario de un transformador con centro, o cuatro diodos con el secundario del transformador sin centro.

Semiconductor: Amplia categoría de materiales con cuatro electrones de valencia y propiedades electrónicas entre los materiales conductores y los aislantes.

Semiconductor FET de metal-óxido (MOSFET): Comúnmente usado en aplicaciones en conmutación de amplificadores; este transistor ofrece una disipación de potencia extremadamente baja incluso por altas corrientes.

Semiconductor tipo N: Es aquel cristal dopado con impurezas tomadas del grupo V de la tabla periódica de los elementos.

Semiconductor tipo P: Es aquel cristal dopado con impurezas tomadas del grupo IIIA de la tabla periódica de los elementos.

Tensión de ruptura: Tensión inversa máxima que un diodo puede soportar antes de que se produzca la avalancha o el efecto zener.

Tensión zener: Tensión de ruptura en un diodo zener. Ésta es la tensión de salida aproximada de un regulador de tensión zener.

Transistor bipolar: La estructura de este dispositivo está integrada de dos cristales semiconductores tipo N y uno tipo P, o dos semiconductores tipo P y uno tipo N. Por ello se conocen como transistores NPN o PNP.

Transistor de efecto de campo: Es un dispositivo amplificador de tres terminales como el transistor bipolar, pero cada una de sus terminales recibe un nombre diferente: surtidor (source), puerta (gate) y drenador (drain). Funciona con un campo eléctrico.

Zona activa: Es la parte recta o lineal de la curva de un transistor, la cual se utiliza para el diseño y operación del transistor.

Zona de corte: Es la región en donde la I_B se anula. En esta zona, los diodos formados por base-emisor y base colector no conducen debido a su polarización, únicamente circula la corriente de fuga del transistor.

Zona de ruptura: En esta zona la corriente aumenta de valor destruyendo el dispositivo, también se conoce como “efecto zener”.

Zona de saturación: Es la región de la curva de salida de un transistor desde el inicio en el eje X, hasta el doblez donde comienza la parte recta o lineal de un transistor (zona activa).