

# Principios **de** electrónica

**MANUEL RAMOS ALVAREZ**

**Red Tercer Milenio**

# PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

# PRINCIPIOS DE ELECTRÓNICA

MANUEL RAMOS ALVAREZ

RED TERCER MILENIO



## AVISO LEGAL

---

**Derechos Reservados © 2012, por RED TERCER MILENIO S.C.**

Viveros de Asís 96, Col. Viveros de la Loma, Tlalnepantla, C.P. 54080, Estado de México.

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio, sin la autorización por escrito del titular de los derechos.

Datos para catalogación bibliográfica

Manuel Ramos Álvarez

*Principios de electrónica*

ISBN 978-607-733-049-3

**Primera edición: 2012**

## DIRECTORIO

---

**José Luis García Luna Martínez**  
*Director General*

**Jesús Andrés Carranza Castellanos**  
*Director Corporativo de Administración*

**Rafael Campos Hernández**  
*Director Académico Corporativo*

**Héctor Raúl Gutiérrez Zamora Ferreira**  
*Director Corporativo de Finanzas*

**Bárbara Jean Mair Rowberry**  
*Directora Corporativa de Operaciones*

**Alejandro Pérez Ruiz**  
*Director Corporativo de Expansión y Proyectos*

# ÍNDICE

Introducción	5
Mapa conceptual	7
Unidad 1: circuitos eléctricos	8
Mapa conceptual	9
Introducción	10
1.1 Ley de Ohm	11
1.2 Leyes de Kirchhoff	15
1.3 Potencias	25
1.4 Circuitos en serie y paralelo	27
Autoevaluación	38
Unidad 2: física de semiconductores	40
Mapa conceptual	41
Introducción	42
2.1 Modelos atómicos	43
2.2 Materiales conductores y aislantes	45
2.3 Materiales semiconductores	47
2.4 Redes cristalinas y bandas de energía	50
2.5 Método de purificación y crecimiento	53
2.6 Conductividad y movilidad	55
2.7 Nivel de Fermi	57
2.8 Bandas de energía de materiales intrínsecos y extrínsecos	58
Autoevaluación	62
Unidad 3: diodos	65
Mapa conceptual	66
Introducción	67
3.1 Técnicas de fabricación de diodos	68
3.2 Polarización	70

3.3 Unión PN	73
3.4 Diodo rectificador	75
3.5 Diodo zener	79
3.6 Diodo Schottky	86
3.7 Diodo túnel	87
3.8 Fotodiodo	88
Autoevaluación	90
Unidad 4: transistores BJT y JFET	93
Mapa conceptual	94
Introducción	95
4.1 Construcción del transistor BJT	97
4.2 Características del transistor BJT	98
4.3 Operaciones del transistor BJT	103
4.4 Polarización del transistor BJT	105
4.5 Polarización del transistor JFET	113
4.6 Descripción general del transistor JFET	120
4.7 Construcción y características del transistor MOSFET	124
4.8 Polarización del transistor MOSFET	129
Autoevaluación	132
Unidad 5: amplificadores operativos	134
Mapa conceptual	136
Introducción	137
5.1 Consideraciones básicas	138
5.2 Diagramas a bloques del op-amp	140
5.3 Análisis del op-amp diferencial básico	140
5.4 El op-amp ideal	143
5.5 Circuito comparador	146
5.6 Circuito inversor	147
5.7 Amplificador no inversor	149
5.8 Circuito sumador	153

5.9 Circuito restador	154
5.10 Circuito integrador	155
Autoevaluación	158
<i>Bibliografía</i>	162
<i>Glosario</i>	163

## INTRODUCCIÓN

La electrónica tiene como antecedente el descubrimiento de los tipos de cargas por el físico y matemático Hendrik Antoon Lorentz en 1895, a partir de ello, otros investigadores realizaron experimentos, como J.J. Thompson, quien descubrió las cargas enunciadas por Lorentz a las que se denominaron “electrones”. La experimentación con los electrones condujo al físico alemán Karl Ferdinand Braun en 1897 a diseñar una válvula de vacío llamada “tubo de rayos catódicos” que se aplicó bastante en los televisores y en equipos con pantallas electrónicas.

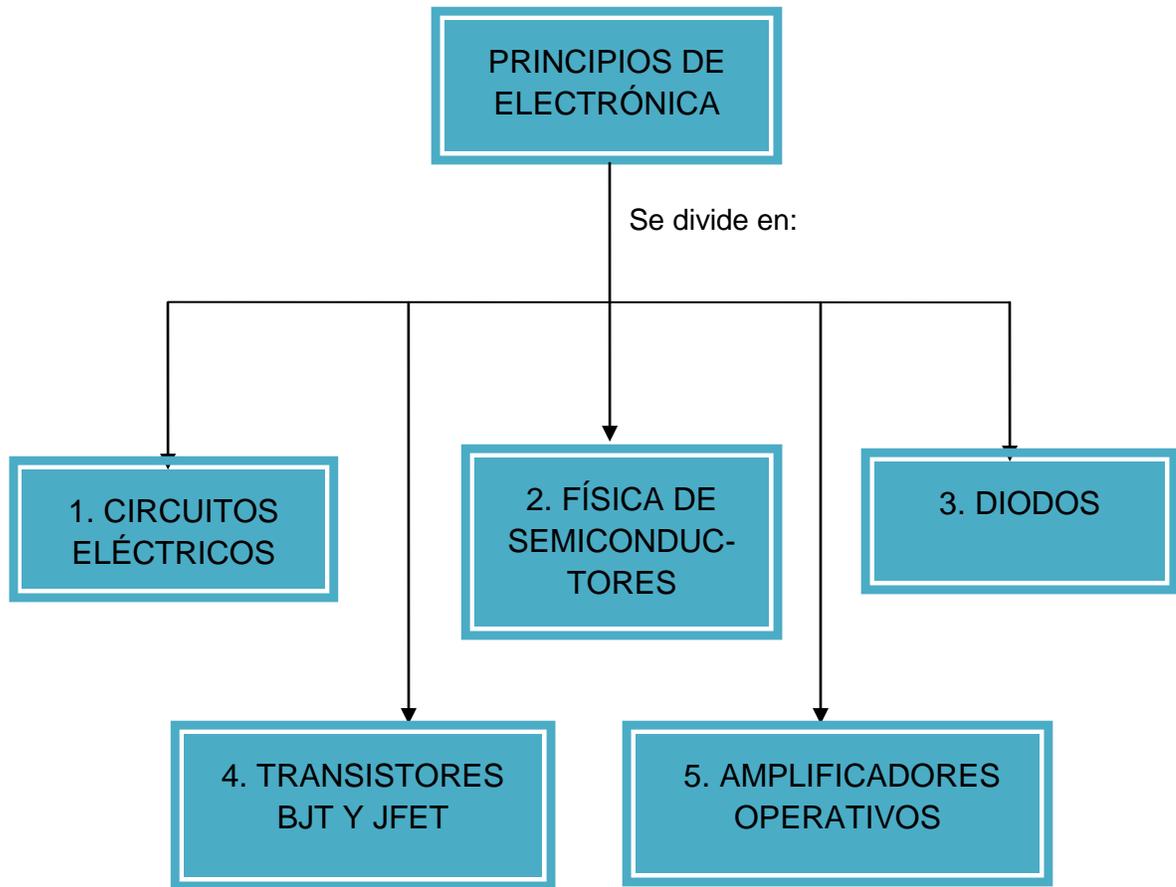
Posteriormente, otros investigadores multiplicaron la creación de las válvulas electrónicas, las cuales se construyeron de diversos tipos y aplicaciones, como diodos, triodos, tetrodos, pentodos, y otras válvulas que hacían diferentes funciones en un tubo, como un doble triodo o un triodo pentodo. Este tipo de dispositivos fueron los pioneros en la electrónica, se utilizaron en los receptores de radio, en los televisores, en la primera computadora creada por el hombre y en general, en todos los equipos electrónicos; funcionaban en vacío en una ampolla de vidrio, y tenían filamentos, cátodos, rejillas, y placas en diferentes arreglos. En estos dispositivos, la placa se conectaba al positivo de la fuente de alimentación y el cátodo al negativo, generalmente los filamentos se alimentaban con 6 volts.

Los semiconductores hicieron su aparición poco a poco, los primeros fueron los “diodos”, y cuando se aplicaron a la industria hicieron que los equipos electrónicos se transformaran en híbridos, pues se empleaban en los circuitos de audio, pero las válvulas electrónicas seguían funcionando. Después aparecieron los transistores, y a partir de ese momento los laboratorios de electrónica empezaron a descubrir nuevas aplicaciones hasta llegar a los dispositivos electrónicos inteligentes (chips) que hoy conocemos en las computadoras, en los teléfonos celulares y en diversos equipos electrónicos.

El contenido de este libro se divide en cinco unidades que se refieren al conocimiento de los principales elementos de la electrónica.

En la unidad uno se describirán las principales leyes que rigen al circuito eléctrico; en la unidad dos se conocerán los materiales que constituyen a la formación de diodos y transistores; en la unidad tres se analizará el funcionamiento de los diodos, así como los tipos de diodos más utilizados en la actualidad; en la unidad cuatro se establecerán las principales diferencias entre los transistores BJT y JFET; y finalmente, en la unidad cinco se identificará la importancia de los amplificadores operacionales (op-amp) y su aplicación.

# MAPA CONCEPTUAL



## UNIDAD 1

### CIRCUITOS ELÉCTRICOS

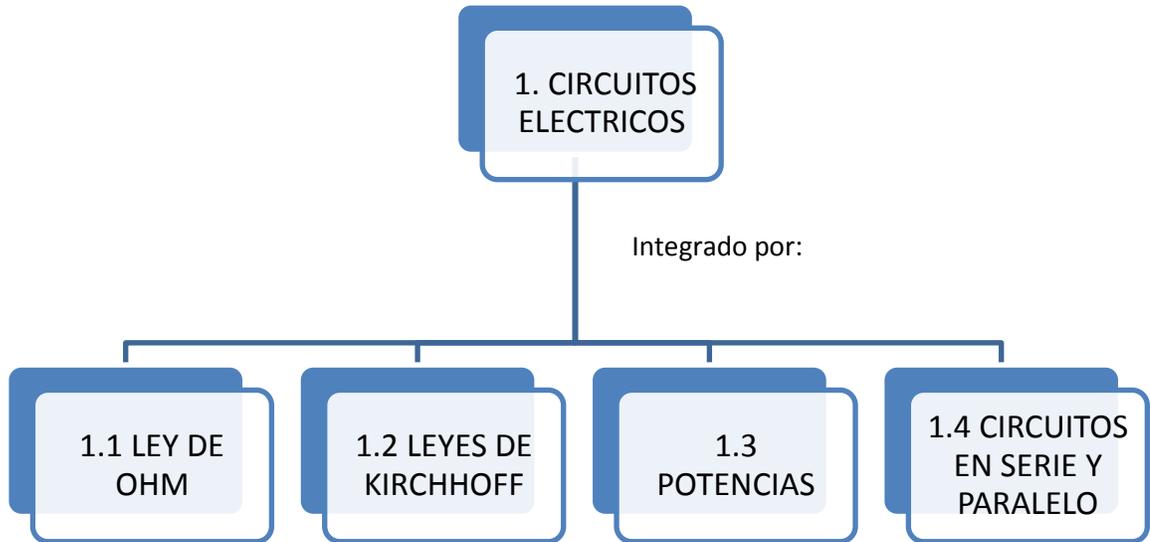
#### OBJETIVO

Conocer, enunciar y aplicar las principales leyes que rigen a los circuitos eléctricos.

#### TEMARIO

- 1.1 Ley de Ohm
- 1.2 Leyes de Kirchhoff
- 1.3 Potencias
- 1.4 Circuitos en serie y paralelo

# MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

Un circuito eléctrico es una serie de elementos o componentes eléctricos, como resistencias, inductancias, condensadores y fuentes, o electrónicos, conectados entre sí con el propósito de generar, transportar o modificar señales eléctricas. La ley de Ohm es una de las principales leyes en electrónica pues involucra los parámetros de resistencia, voltaje y corriente. Las leyes de Kirchhoff son muy útiles para el cálculo del voltaje y la corriente. La potencia nos indica el producto del voltaje por la corriente. Los circuitos en serie y paralelo determinan el comportamiento de los parámetros mencionados anteriormente.

Todo esto se abordará en la presente unidad.

## 1.1 LEY DE OHM

La ley de Ohm es fundamental para el inicio de la electrónica, esta ley se refiere al elemento pasivo más simple y se comenzará considerando el trabajo de George Simon Ohm, físico alemán que en 1827 publicó un artículo titulado “Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet”.<sup>1</sup> En ese artículo están contenidos los resultados de uno de los primeros esfuerzos realizados para medir corrientes y voltajes, y para describirlos y relacionarlos matemáticamente.

Uno de los resultados fue el enunciado de la relación fundamental que ahora se conoce como ley de Ohm, aun cuando se ha demostrado que esta ley fue descubierta 46 años antes en Inglaterra por Henry Cavendish, un brillante semirrecluso. Sin embargo, nadie, incluyendo a Ohm, sabía del trabajo hecho por Cavendish, porque esto se descubrió y publicó hasta mucho tiempo después que ambos murieran.

El artículo de Ohm fue criticado y ridiculizado, sin merecerlo, durante varios años después de su publicación original, pero posteriormente fue aceptado y sirvió para remover la oscuridad asociada con su nombre.

La ley de Ohm establece que el voltaje entre los extremos de muchos tipos de materiales conductores es directamente proporcional a la corriente que fluye a través del material, es decir:

$$V=RI \quad (1)$$

En donde:

V: voltaje.

R: resistencia.

I: corriente eléctrica.

Donde la constante de proporcionalidad  $R$  recibe el nombre de *resistencia*. La unidad de resistencia es el ohm, el cual es igual a 1 V/A (volts/amperes) y generalmente se simboliza por una omega mayúscula,  $\Omega$ .

Cuando se hace una gráfica  $V$  contra  $I$  de esta ecuación, se obtiene una línea recta que pasa por el origen. La ecuación es lineal, y se considerará la definición de resistencia lineal, si el cociente del voltaje y la corriente asociados

---

<sup>1</sup> Hayt Jr., William H., *Análisis de circuitos en ingeniería*, p. 21.

con cualquier elemento simple de corriente es constante, entonces el elemento es un resistor lineal y el valor de resistencia es igual a la razón voltaje sobre corriente. Normalmente se considera que la resistencia es una cantidad positiva, aunque se pueden simular resistencias negativas por medio de circuitos especiales.

Cabe destacar que un resistor lineal es un elemento idealizado; es sólo un modelo matemático de un dispositivo físico. El voltaje sobre corriente de estos dispositivos es razonablemente constante sólo dentro de ciertos rangos de corriente, voltaje o potencia, y depende también de la temperatura y otros factores ambientales. Por lo general, a los resistores lineales se les llama simplemente resistores. Cualquier resistor que sea no lineal siempre será descrito como tal. Los resistores no lineales, no necesariamente deben considerarse como elementos no deseables, ya que, aunque es cierto que su presencia complica el análisis, el funcionamiento del dispositivo puede depender de la no linealidad o mejorar notablemente por ella. Estos elementos son los diodos Zener, los diodos túnel y los fusibles.

La figura 1-1 muestra el símbolo más utilizado para un resistor

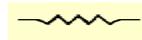


Figura 1.1 Símbolo de resistor

“Uno de los autores, quien prefiere no ser identificado”,<sup>2</sup> tuvo la desafortunada experiencia de conectar un resistor de carbón de 100Ω, 2 W (watts) entre las terminales de una fuente de 110 V. Las llamas, el humo y la fragmentación consiguientes fueron desconcertantes, demostrando claramente que un resistor práctico tiene límites definidos en su habilidad para comportarse como el modelo lineal ideal.

La razón de la corriente al voltaje es también una constante

$$\frac{I}{V} = \frac{1}{R} = G \quad (2)$$

---

<sup>2</sup> Hayt Jr, William H., *op.cit.*, p. 23.

Donde  $G$  es la conductancia. En el sistema internacional (SI), la unidad de conductancia es el siemens (s), igual a 1 A/V (amperes/volts). Una unidad no oficial más antigua de conductancia es el mho, la cual se representa por una omega mayúscula invertida. Para representar resistencias y conductancias se usa el mismo símbolo.

Así, una resistencia de  $2\Omega$  tiene una conductancia de  $\frac{1}{2}$  S y si una corriente de 5A está fluyendo a través de ella, se tiene un voltaje de 10 V entre sus terminales.

La resistencia se puede usar como base para definir dos términos de uso común: el cortocircuito y el circuito abierto. El corto circuito se define como una resistencia de cero ohm; entonces, como  $V= RI$ , el voltaje en un cortocircuito debe ser cero, independientemente del valor del voltaje entre las terminales del circuito abierto.

Cabe mencionar que la ley de Ohm presenta algunas limitaciones como son:

- 1) Se puede aplicar a los materiales metales pero no al carbón o a los materiales utilizados en los transistores.
- 2) Al utilizar esta ley debe recordarse que la resistencia cambia con la temperatura, pues todos los materiales se calientan por el paso de corriente.
- 3) Algunas aleaciones conducen mejor las cargas en una dirección que en otra.

La ley de Ohm revela claramente que para una resistencia fija, a mayor voltaje en un resistor, mayor es la corriente, y a mayor resistencia para el mismo voltaje, menor es la corriente. Esto es, la corriente es proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la resistencia.

$$I = \frac{E}{R} \quad (3)$$

Utilizando simples manejos matemáticos, el voltaje y la resistencia pueden encontrarse en términos de las otras dos cantidades:

$$V= IR \quad (4)$$

$$\text{y} \quad R= \frac{V}{I} \quad (5)$$

Ejemplo 1.1 Determine la corriente resultante de la aplicación de una batería de 9 V a una red de resistencia de 2.2  $\Omega$

Solución: *Ecuación (3)*:

$$I= \frac{V}{R} = \frac{9V}{2.2 \Omega} = 4.09 \text{ A}$$

Ejemplo 1.2 Calcule la resistencia de un foco de 60 W si una corriente de 500 mA resulta de un voltaje aplicado de 120 V

Solución: *Ecuación (5)*:

$$R= \frac{V}{I} = \frac{120V}{500 \times 10^{-3} \text{ A}} = 240 \Omega$$

## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Desarrollar y resolver problemas de la ley de Ohm.
  1. ¿Cuál es la corriente a través de un resistor de 6  $\Omega$  si la corriente que transporta es de 2.5 A?
  2. ¿Cuál es la corriente a través de un resistor de 72  $\Omega$  si la caída de voltaje en él es de 12 V?
  3. Si un refrigerador consume 2.2 A a 120V, ¿cuál es el valor de su resistencia?
  4. Si un reloj tiene una resistencia interna de 7.5 K $\Omega$ , encuentra la corriente que pasa por él cuando se enchufa a una toma de 120 V.
  5. Si la corriente a través de un resistor de 0.02 M $\Omega$  es de 3.6  $\mu$  A, ¿cuál es la caída de voltaje en el resistor?

## 1.2 LEYES DE KIRCHHOFF

Se pueden considerar las relaciones de corriente y voltaje en redes simples que resultan de la interconexión de dos o más elementos simples de un circuito. Los elementos se conectan entre sí por medio de conductores eléctricos, o alambres, los cuales tienen resistencias cero, o son conductores perfectos. Como la apariencia de la red es de cierto número de elementos simples y un conjunto de alambres que los conectan, recibe el nombre de red de elementos de parámetros concentrados.

Se conoce como nodo al punto en el cual dos o más elementos tienen una conexión común. La figura 1-2a muestra un circuito que contiene tres nodos. A veces las redes se dibujan para hacer creer a algún estudiante distraído que hay más nodos que los que realmente se tienen. Esto sucede cuando un nodo, como el nodo 1 en la figura 1-2a se muestra como dos uniones distintas conectadas por un conductor (de resistencia cero), como se observa en la figura 1-2b. Sin embargo, lo que se hizo fue convertir el punto común en una línea común de resistencia cero. Entonces necesariamente deben considerarse como parte del nodo todos los alambres perfectamente conductores, o las porciones de ellos conectadas a un nodo. Obsérvese también que cada elemento tiene un nodo en cada una de sus terminales.

Supóngase que el proceso empieza en uno de los nodos de una red y se mueve a través de un elemento simple al otro nodo terminal, luego, a partir de ese nodo continúa a través de un elemento diferente al nodo siguiente, y sigue de esta forma hasta recorrer tantos elementos como se desee.

Si no pasa a través de ningún nodo más de una vez, entonces se dice que el conjunto de nodos y elementos a través de los cuales pasa, forma una trayectoria. Si comienza y termina en el mismo nodo, la trayectoria se llama trayectoria cerrada o lazo.

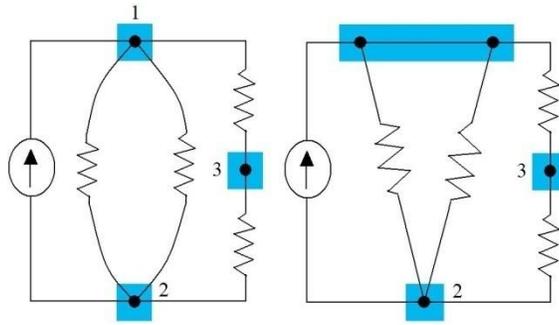


Figura 1-2 a). Circuito que contiene 3 nodos. b) el nodo 1 se redibujó para que parezca que son dos nodos, aunque sigue siendo duro.

Por ejemplo, si en la figura 1-2a, uno se mueve del nodo 2 al nodo 1 a través de la fuente de corriente, y luego por conducto del resistor superior derecho al nodo 3, se ha establecido una trayectoria; pero como no se llega al nodo 2 de nuevo, no se tiene una trayectoria cerrada o lazo. Al continuar del nodo 2 al nodo 1 por la fuente de corriente, luego al nodo 2 a través del resistor izquierdo, y luego hacia arriba de nuevo al nodo 1 a través del resistor central, no será una trayectoria, pues uno de los nodos (en realidad dos) fue atravesado más de una vez; tampoco será un lazo, porque un lazo debe ser de igual forma una trayectoria.

Otro término, cuyo uso es provechoso, es el de rama. Una rama se define como una trayectoria simple en una red, compuesta por un elemento simple y por los nodos ubicados en cada uno de sus extremos. Por lo tanto, una trayectoria es una colección determinada de ramas. El circuito que se muestra en las figuras 1-2a y 1-2b contiene cinco ramas.

Ahora se pueden presentar las dos famosas leyes que deben su nombre a Gustav Robert Kirchhoff, profesor universitario alemán quien nació por la época en que Ohm realizaba su trabajo experimental.

#### *Ley de los nodos o ley de corrientes*

Esta ley axiomática recibe el nombre de “Ley de corrientes de Kirchhoff” (o LCK, para abreviar), y establece que: *La suma algebraica de las corrientes que entran a cualquier nodo es cero.*

No se demostrará esta ley aquí. Sin embargo, representa simplemente el enunciado matemático del hecho de que la carga no puede acumularse en ningún nodo. Es decir, si tuviera una corriente neta hacia un nodo, entonces la razón a la que los *coulombs*<sup>3</sup> se estarían acumulando en el nodo no sería cero; pero un nodo no es un elemento de circuito, y no puede almacenar, destruir o generar carga. Entonces, la suma de las corrientes debe ser cero.

Considérese el nodo mostrado en la figura 1-3. La suma algebraica de las cuatro corrientes que entran al nodo debe ser cero:

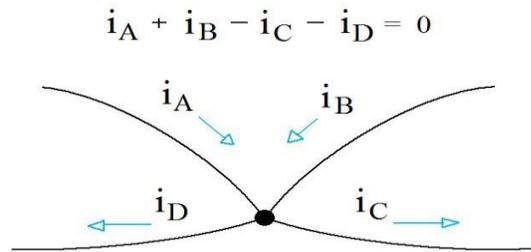


Figura 1-3

Es evidente que la ley se puede aplicar a la suma algebraica de las corrientes que salen de cualquier nodo:

$$- i_A + i_B + i_C + i_D = 0$$

También se puede igualar la suma de corrientes que tienen flechas apuntando hacia el nodo, a la suma de las corrientes dirigidas hacia fuera del nodo:

$$- i_A + i_B = i_C + i_D$$

Una expresión compacta para la ley de corrientes de Kirchhoff es:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (6)$$

Y esto no es más que una abreviatura de:

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_N = 0$$

<sup>3</sup> Entiéndase por coulomb a la unidad de carga eléctrica del sistema internacional, de símbolo C, que equivale a la cantidad de electricidad que transporta una corriente de intensidad de un amperio en un segundo.

Ya sea que se utilice la ecuación (6) o la (7), se entiende que las  $N$  flechas de corrientes apuntan todas hacia el nodo en cuestión, o bien todas se alejan de él.

Ejemplo 1.3 Determinése las corrientes  $I_3$  e  $I_5$ , de la figura 1-4 mediante aplicaciones de la ley de corrientes de Kirchhoff.

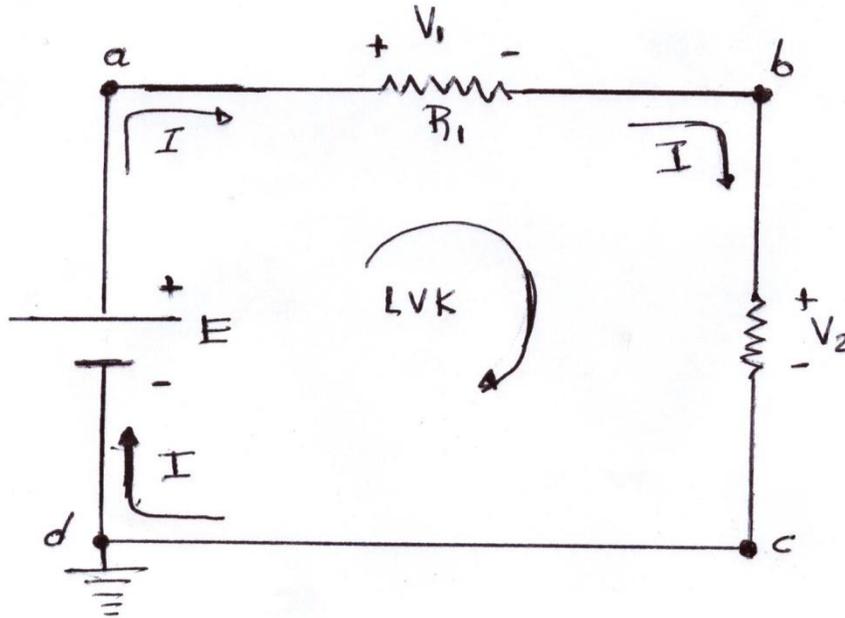


Figura 1-4

Solución:

Nótese que ya el nodo 2 tiene dos cantidades desconocidas y el nodo 1 tiene sólo una, primero debe aplicarse la ley de corrientes de Kirchhoff al nodo 1. El resultado puede aplicarse después al nodo 2.

(1)

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$2 + 3 = I_3$$

$$I_3 = 5A$$

(2)

$$I_3 = I_4 + I_5 \text{ o } I_5 = I_3 - I_4 = 5 - 1$$

$$I_5 = 4A$$

Ejemplo 1.4 Para el circuito de la figura 1-5.

- Determinése la conductancia y la resistencia totales
- Calcúlese la corriente  $I_T$ .
- Encuéntrese la corriente en cada derivación
- Compruébese la ley de corrientes de Kirchoff en el nodo a
- Encuéntrese la potencia disipada por cada resistor y obsérvese si la potencia de alimentación es igual a la disipada.

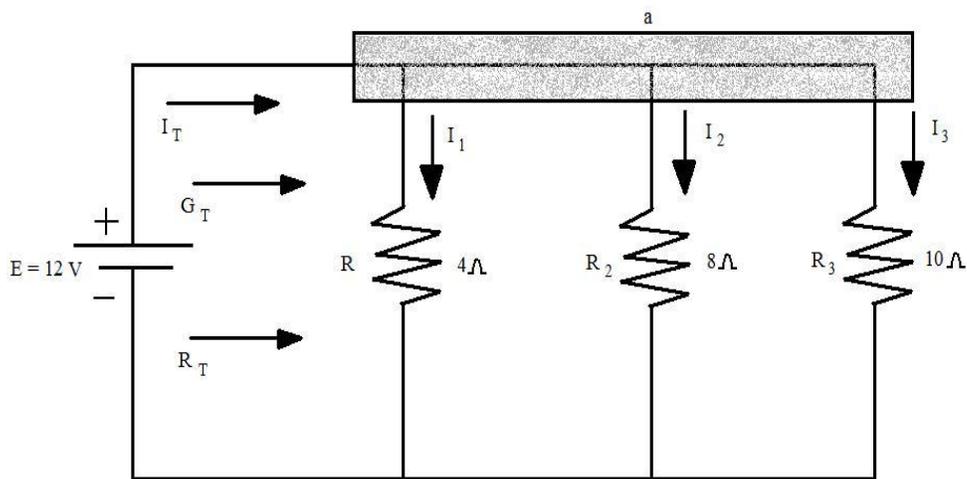


Figura 1-5

Soluciones:

$$\begin{aligned} \text{a) } G_T &= G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{10} \\ &= 0.250 + 0.125 + 0.100 \end{aligned}$$

$$G_T = 0.475 \text{ S}$$

$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{0.475} = 2.150 \text{ } \Omega$$

$$\text{b) } I_T = E G_T = (12)(0.475) = 5.70 \text{ A}$$

o

$$I_T = \frac{E}{R_T} = \frac{12}{2.105} = 5.70 \text{ A}$$

$$\text{c) } I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{E}{R_1} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{E}{R_2} = \frac{12}{8} = 1.5 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} = \frac{E}{R_3} = \frac{12}{10} = 1.2 \text{ A}$$

### *Ley de las mallas o ley de tensiones*

Ahora se verá la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) que establece lo siguiente:  
*La suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier trayectoria cerrada en un circuito es cero.*

Se debe aceptar esta ley como un axioma, aun cuando se desarrolla dentro de la teoría electromagnética básica.

Un lazo cerrado es cualquier trayectoria continua que sale de un punto en una dirección y regresa al mismo punto (figura 1-4), al seguir la corriente, es posible trazar una ruta continua que parte del punto *a* cruzando  $R_1$  y regresa a través de  $E$  sin abandonar el circuito. Por tanto, *abcd* es un lazo cerrado.

Para que podamos aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff, la suma de las elevaciones y caídas de potencial debe realizarse en una sola dirección alrededor del lazo cerrado.

Por cuestiones de uniformidad, se empleará la dirección en el sentido de las manecillas del reloj a lo largo de este libro para todas las aplicaciones de la ley de voltaje de Kirchhoff. Sin embargo, se debe tener presente que el mismo resultado se obtendrá si se elige la dirección contraria a las manecillas del reloj y se aplica la ley de forma correcta.

Se aplica un signo positivo para una elevación de potencial ( $-a+$ ), y un signo negativo para una caída de potencial ( $+a-$ ), en donde “*a*” hace referencia a un punto de unión del circuito de lazo cerrado que se observa en la figura 1.4.

Al seguir la corriente, la figura 1-4 desde el punto *a*, primero se encuentra una caída de potencial  $V_1$  ( $+a-$ ) a través de  $R_1$  se encuentra una caída  $V_2$  a través de  $R_2$ . Al continuar a través de la fuente de voltaje, se tiene una elevación de potencial  $E$  ( $-a+$ ) antes de regresar al punto *a*. En forma simbólica, donde  $\sum$  representa una sumatoria,  $c$  al lazo cerrado, y  $V$  las caídas y elevaciones de potencial, se tienen:

$$\sum_c V = 0 \text{ (ley de voltaje de Kirchhoff en forma simbólica) (8)}$$

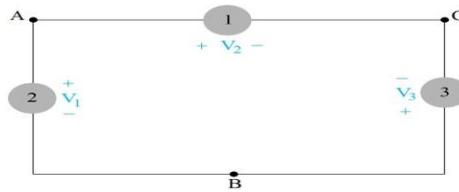


Figura 1-5 Leyes de voltaje

Ejemplo 1.5 Determinése los voltajes desconocidos para las redes de la figura 1-6

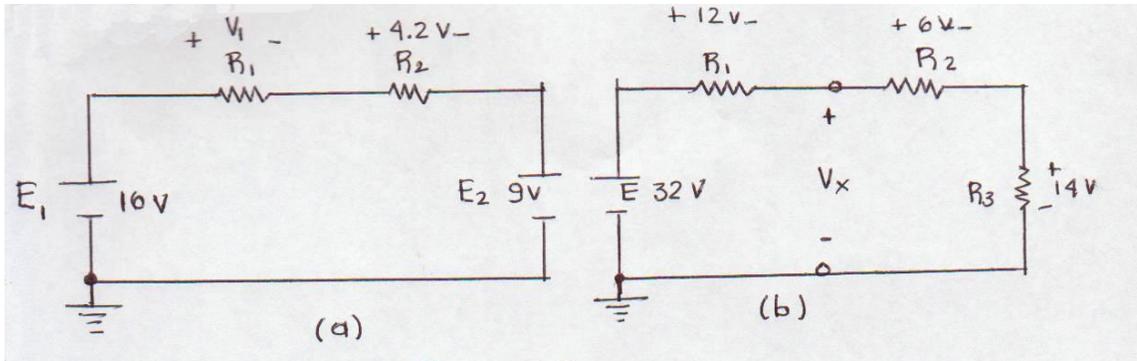


Figura 1-6

Solución:

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff, asegúrese de concentrarse en las polaridades de la caída o elevación de voltaje en lugar de hacerlo sobre el tipo de elementos.

En la figura 1-5 (a), por ejemplo si elegimos la dirección de las manecillas del reloj, veremos que existe una caída en los resistores  $R_1$  y  $R_2$  y una caída en la fuente  $E_2$ . Por tanto, todo tendrá un signo negativo cuando se aplique la ley de voltaje de Kirchhoff.

La aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de la figura 1-5 (a) en la dirección de las manecillas del reloj dará por resultado:

$$+E_1 - V_1 - V_2 - E_2 = 0$$

$$\text{y } V_1 = E_1 - V_2 - E_2 = 16 \text{ V} - 4.2 \text{ V} - 9 \text{ V}$$

$$= 2.8 \text{ V}$$

En la figura 1-5 (b) el voltaje desconocido no se encuentra en un elemento portador de corriente. Sin embargo, como se indicó en los párrafos

anteriores, la ley de voltaje de Kirchhoff no se encuentra limitada a los elementos portadores de corriente. En este caso, existen dos posibles trayectorias para encontrar la incógnita. Utilizando la trayectoria de las manecillas del reloj, que incluye la fuente del voltaje E, se obtendrá:

$$\begin{aligned}
 +E - V_1 - V_2 &= 0 \\
 \text{y } V_x &= E - V_1 = 32\text{V} - 12\text{V} \\
 &= 20\text{V}
 \end{aligned}$$

Al utilizar la dirección de las manecillas del reloj para el otro lazo que contiene a  $R_2$  y a  $R_3$  se obtendría el siguiente resultado:

$$\begin{aligned}
 +V_x - V_2 - V_3 &= 0 \\
 \text{y } V_x &= V_2 + V_3 = 6\text{V} + 14\text{V} \\
 &= 20\text{V}
 \end{aligned}$$

Lo que coincide con el resultado anterior.

Ejemplo 1.6 Calcular la resistencia equivalente,  $R_{eq}$ , entre los puntos A y B de la figura 1-7.

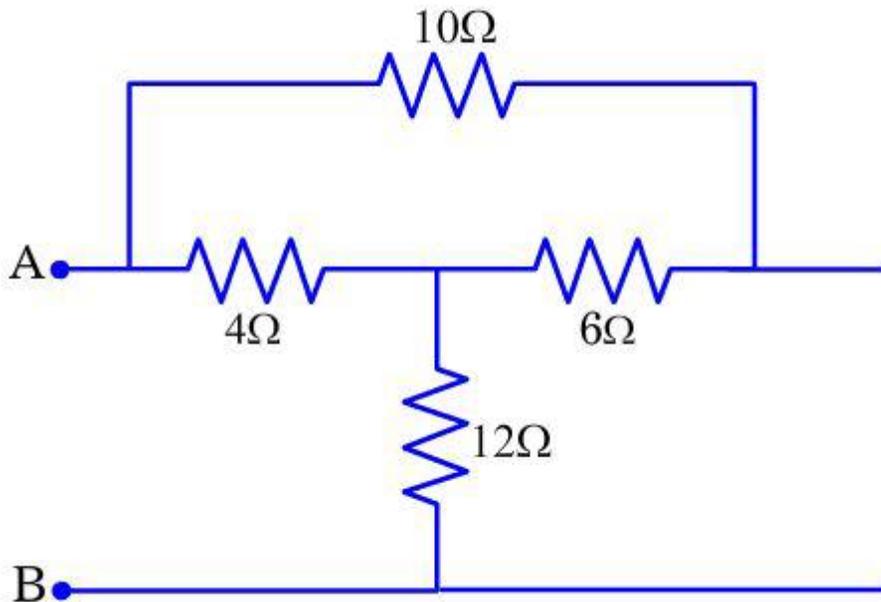


Figura 1-7

Solución:

Para hallar  $R_{eq}$  suponemos que entre los puntos A y B se coloca una fuente de voltaje  $V$ , se calcula la corriente total  $I$  que este voltaje produciría y luego hacemos  $I R_{eq} = V$

En el dibujo inferior introducimos las variables  $I$  e  $I_1$ , que son incógnitas.

Obsérvese que estamos implementando directamente la primera ley de Kirchhoff, que dice que en cada nodo la cantidad de corriente que entra es igual a la cantidad de corriente que sale. Ahora usaremos la segunda ley de Kirchhoff en la malla superior:

$$10\Omega (I_1) + 6\Omega (I_1) - 4\Omega (I - I_1) = 0, (1)$$

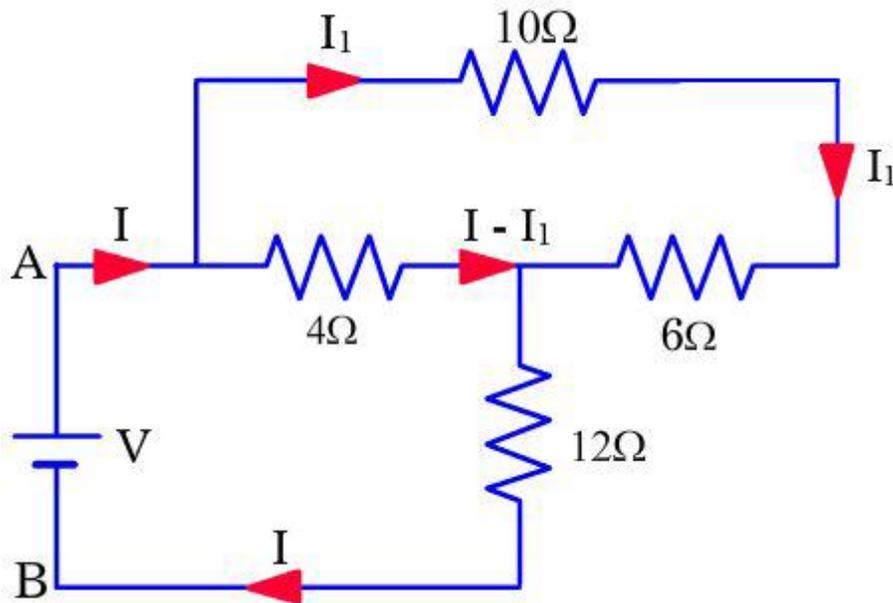
Y la misma segunda ley, aplicada a la malla inferior, da:

$$4\Omega (I - I_1) + 12\Omega I = V, (2)$$

En la ecuación (1) se despeja  $I_1$  y lo obtenido se introduce en (2) para llegar finalmente a:

$$I \frac{76\Omega}{5} = V$$

De donde  $R_{eq} = \frac{76\Omega}{5}$  entre los puntos A y B, obsérvese que la respuesta es independiente del valor que se supuso para el voltaje  $V$ .

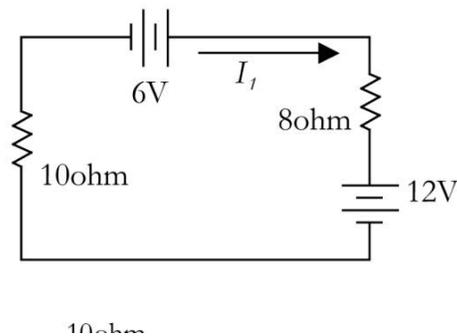


Solución:

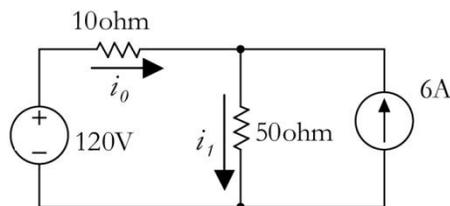
En el dibujo que sigue a continuación aparecen las variables algebraicas  $I$ ,  $I_1$  e  $I_2$ , que son incógnitas. En el dibujo estamos implementando directamente la primera ley de Kirchhoff, según la cual en cada nodo la cantidad de corriente que entre es igual a la cantidad de corriente que sale. Ahora usaremos la segunda ley de Kirchhoff para las mallas izquierda, derecha e inferior:

## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

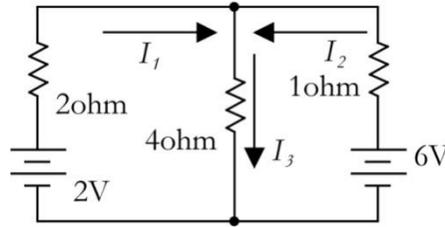
- Desarrollar y resolver problemas de las leyes de Kirchhoff.
  1. Empleando las leyes de Kirchhoff, encuentra la corriente  $I_1$ . ¿Cuál es la potencia disipada en cada resistencia? ¿Cuál es la potencia entregada/absorbida por las fuentes?



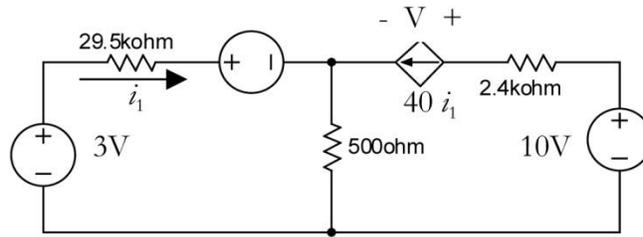
2. Utilizando las leyes de Kirchhoff, encuentra  $i_0$  e  $i_1$  y verifica la potencia total generada es igual a la potencia total disipada.



- 3.- Utilizando las leyes de Kirchhoff, encuentra las corrientes:  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$



4.-En el circuito que se muestra encuentra la corriente  $i_1$  y el voltaje  $V$  en la fuente de corriente dependiente. Utiliza las leyes de Kirchoff.



### 1.3 POTENCIAS

La potencia es una indicación de la cantidad de trabajo (la conversión de energía de una forma a otra) la cual se puede hacer en una cantidad específica de tiempo, o sea, un índice de realización de trabajo. Puesto que el trabajo mecánico se mide en Joules (J) y el tiempo en segundos, la potencia (P) se mide en Joules por segundo. La unidad eléctrica de medida de la potencia es el watt (W) que equivale a 1J/S. En forma de ecuación:

$$P = \frac{T \text{ (joules)}}{t \text{ (s)}} = \text{-- (watts)}$$

“La unidad de medida, el watt es derivada del apellido de James Watt, quien participó en el establecimiento de las normas para medir potencia”,<sup>4</sup> presentó el caballo de fuerza (hp) como medida de la potencia promedio de un fuerte caballo de tiro durante un día completo de trabajo. Esto es cerca de 50% más de lo que puede esperar un caballo promedio. Los caballos de fuerza y los watts se relacionan como sigue:

$$1 \text{ caballo de fuerza} = 746 \text{ watts}$$

<sup>4</sup> Boylestad, Robert L., *Introducción al análisis de circuitos*, p 103

La potencia entregada o absorbida por un sistema o un dispositivo eléctrico se puede determinar en términos de la corriente y tensión, de modo que:

$$\boxed{P = VI} \quad (\text{watts})$$

La magnitud de la potencia entregada o absorbida por una batería está dada por:

$$\boxed{P = EI} \quad (\text{watts}) \quad (9)$$

Donde  $E$  es la fuerza electromotriz en las terminales de la batería e  $I$  es la corriente a través de la fuente.

Mediante la sustitución directa de la ley de Ohm, la ecuación para la potencia se puede obtener en otras dos formas:

$$P = VI = V \left( \frac{V}{R} \right)$$

$$\text{y } \boxed{P = \frac{V^2}{R}} \quad (\text{watts}) \quad (10)$$

$$\text{o } P = VI = (IR) i$$

$$\text{y } \boxed{P = I^2 R} \quad (\text{watts}) \quad (11)$$

Ejemplo 1.7 ¿Cuál es la potencia que se disipa en un resistor de  $5 \Omega$ , si la corriente que pasa por ella es de  $4 \text{ A}$ ?

Solución:

$$P = I^2 R = (4)^2 (5) = 80 \text{ W}$$

Ejemplo 1.8 Una batería de automóvil de  $12 \text{ V}$  de fem (fuerza electromotriz) proporciona  $7.5 \text{ A}$  al encender las luces delanteras. Cuando el conductor opera

el motor de arranque con las luces encendidas, la corriente total llega a 40 A. Calcula la potencia eléctrica en ambos casos.

Solución:

$$P_1 = V \cdot I_1 = (12 \text{ V}) (7.5 \text{ A}) = 90 \text{ W}$$

$$P_2 = V \cdot I_2 = (12 \text{ V}) (40 \text{ A}) = 480 \text{ W}$$

Ejemplo 1.9 Una pila tiene tensión de 1.5 V y puede entregar 2 A durante 6 horas. Calcula:

- a) La potencia
- b) La energía

Solución: Considerando que las unidades de energía (E) son las mismas que las de trabajo mecánico, tenemos:

Como dato, una hora es igual a 3600 s y  $6\text{h} = 21600\text{s}$

- a)  $P = V \cdot I = (1.5\text{V}) (2\text{A}) = 3\text{W}$
- b)  $E = P \cdot t = (3\text{W}) (21600\text{s}) = 64800 \text{ J}$

## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Consultar en diversas fuentes la importancia de las potencias en circuitos eléctricos.

### 1.4 CIRCUITOS EN SERIE Y PARALELO

#### *Circuito en serie*

Un circuito consiste en cierto número de elementos unidos en puntos terminales aportando por lo menos una trayectoria cerrada por lo que puede fluir la carga.

“Dos elementos están en *serie* si tienen sólo un punto en común que no esté cerrado a un tercer elemento”.<sup>5</sup>

Los resistores  $R_1$  y  $R_2$  en la figura 1-8a están en serie, puesto que sólo tiene un punto  $b$  en común, sin que haya otras derivaciones conectadas a ese punto. No obstante en la figura 1-8b, los resistores  $R_1$  y  $R_2$  no se encuentran ya en serie, puesto que su punto común  $b$  es también la unión para una tercera derivación.

Un análisis más profundo revelará que  $R_2$ , en la figura 1-8a, está en serie con la fuente de tensión  $E$  (punto  $c$  en común) y que  $E$  se encuentra en serie con  $R_1$ . En conclusión, este circuito se denomina *circuito en serie*.

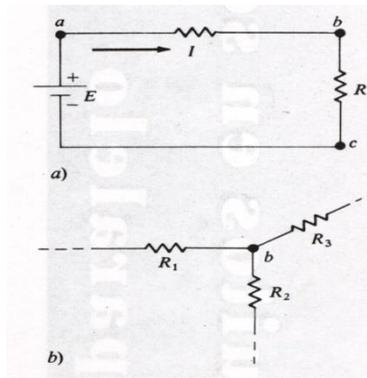


Figura 1-8  
a) circuito en serie  
b) circuito no en serie

Para encontrar la resistencia total de un circuito en serie, se agregan simplemente los valores de los diferentes resistores; por ejemplo, en la figura 1-8a, la resistencia total ( $R_T$ ) es igual a  $R_1 + R_2$ . Habitualmente para encontrar la resistencia total ofrecida por  $N$  resistores en serie, determínese simplemente la suma de los  $N$  resistores, o sea:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (12)$$

Ejemplo 1. 10 Determínese la resistencia total del circuito en serie de la figura 1-9.

<sup>5</sup> Boylestad, Robert, L., *op. cit.*, p. 130.

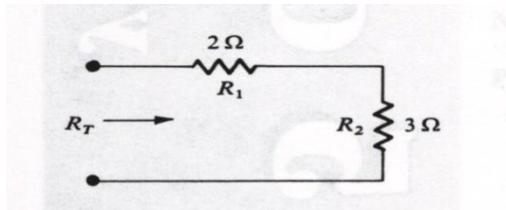


Figura 1-9

Solución:

$$R_T = R_1 + R_2 = 2 + 3 = 5 \Omega$$

Ejemplo 1.11 Determínese  $R_T$  para el circuito de la figura 1-10

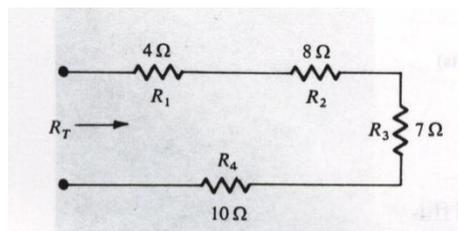


Figura 1-10

Solución:

$$\begin{aligned} R_T &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \\ &= 4 + 8 + 7 + 10 \\ &= 29 \Omega \end{aligned}$$

Para encontrar la resistencia total de  $N$  resistores del mismo valor en serie, simplemente se multiplica el valor de una resistencia por  $N$ .

$$R_T = N \cdot R$$

Ejemplo 1.12 Calcúlese  $R_T$  para el circuito en serie de la figura 1-11

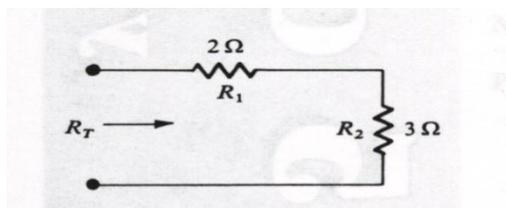


Figura 1-11

Solución:

$$\begin{aligned}R_T &= R_1 + R_2 + NR_2 \\ &= 1 + 9 + (3)(7) \\ &= 31 \Omega\end{aligned}$$

Ejemplo 1.13 Encontrar la resistencia total del siguiente circuito, figura 1-12

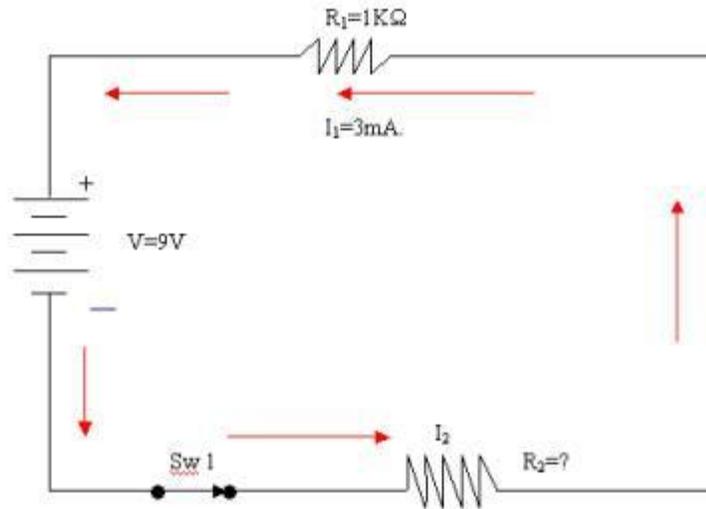


Figura 1-12

Solución:

El voltaje de la resistencia a  $R_1$  se encuentra directamente hallando la resistencia total del circuito:

$$V_1 = I R_1 = (3 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = (3 \times 10^{-3} \text{ mA})(1 \times 10^3 \Omega) = 3 \text{ V}$$

Por lo tanto, la resistencia  $R_2$  tiene un voltaje de 6V, como podemos ver:

$$V = V_1 + V_2 \rightarrow V_2 = V - V_1 = 9\text{V} - 3 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Se debe considerar que la corriente en un circuito en serie, como lo es este, es la misma para  $R_1$  y  $R_2$  y por tanto:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{6\text{V}}{3\text{mA}} = \frac{6\text{V}}{3 \times 10^{-3} \text{ A}} = 2 \times 10^3 \Omega = 2 \text{ k}\Omega$$

Por último, la resistencia total de la resistencia del circuito es:

$$R = R_1 + R_2 \rightarrow R = 1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega = 3 \text{ k}\Omega \quad R = 3 \text{ k}\Omega$$

### Circuitos en paralelo

Se dice que dos elementos o ramas están en paralelo cuando tienen dos puntos en común. En la figura 1-13, los elementos A y B están en paralelo entre sí y con el elemento C. Debido que cada elemento se encuentra en paralelo con todos los demás se dice que se trata de un *circuito paralelo*. En la figura 1-13 (a), A y B están en paralelo, pero el elemento C está en serie con los elementos en paralelo A y B. En la figura 1-13 (b), ni A ni B están en paralelo con C, pero la combinación en serie de A y B está con C.

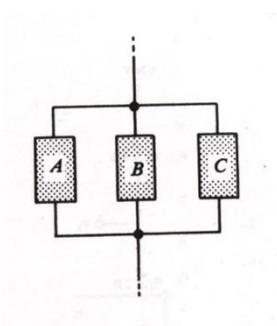


Figura 1-13 a

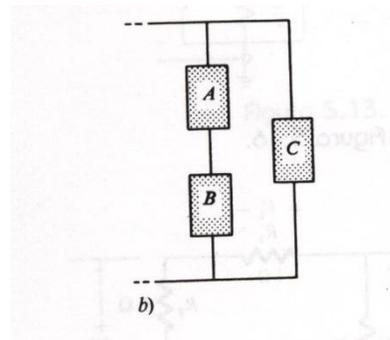


figura 1-13 b

Regresando a los elementos reales, los resistores  $R_1$  y  $R_2$  de la figura 1-14 están en paralelo puesto que tienen los puntos a y b en común. Por consiguiente, la tensión aplicada  $E$  está en paralelo con  $R_1$  y  $R_2$  y observamos que la tensión es siempre la misma en los elementos en paralelo. Al aplicar la ecuación de la conductancia ( $G = \frac{1}{R}$ ), se descubre que los resistores  $R_1$  y  $R_2$  tienen conductancias de  $G_1 = 1/R_1$  y  $G_2 = 1/R_2$ , respectivamente. La conductancia total  $G_T$ , de un circuito en paralelo se obtiene de modo similar al utilizarlo para calcular la resistencia total de un circuito en serie, o sea, es la suma de las conductancias. La conductancia total de la figura 1-14 es:

$$G_T = G_1 + G_2$$

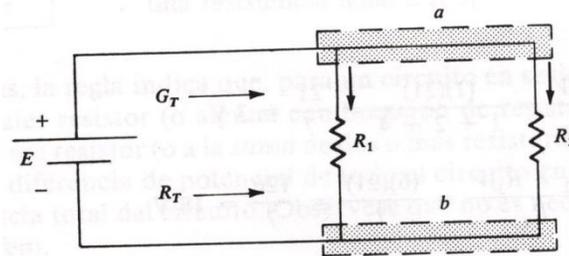


Figura 1-14

En general, la conductancia total de un circuito en paralelo es igual a la suma de las conductancias de las bifurcaciones individuales, o sea:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \dots + G_N \quad ( )$$

$$\text{o bien } \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Ejemplo 1.13 Calcúlese la conductancia y la resistencia total de la red en paralelo de la figura 1-15:

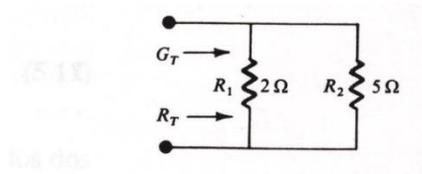


Figura 1-15

Solución:

$$G_T = G_1 + G_2$$

$$G_T = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2} = 0.5 \text{ S}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ S}$$

$$G_T = 0.5 + 0.2 = 0.7 \text{ S}$$

$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{0.7} = 1.429 \Omega$$

Ejemplo 1.14 Evalúense  $G_T$  y  $R_T$  para la red de la figura 1-16:

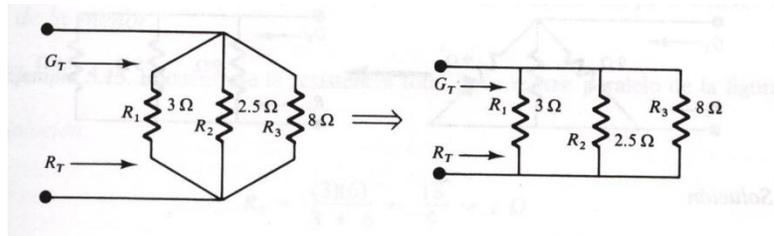


Figura 1-16

Solución:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3$$

$$G_T = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{3} = 0.333 \text{ S}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2.5} = 0.40 \text{ S}$$

$$G_T = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{8} = 0.125 \text{ S}$$

$$G_T = 0.333 + 0.4 + 0.125 = 0.858 \text{ S}$$

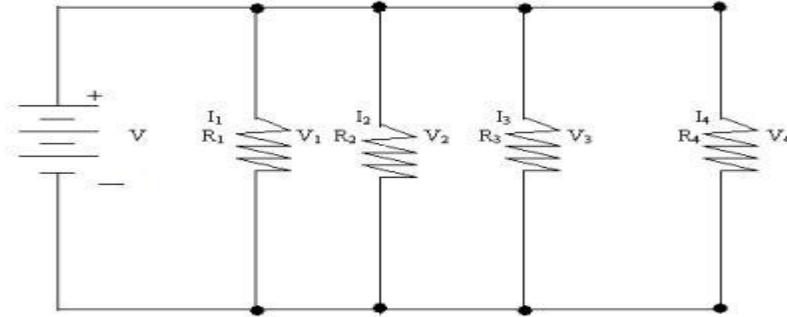
$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{0.858} = 1.165 \Omega$$

Ejemplo 1.15 Se tienen los siguientes datos para el circuito mostrado:

$$R_1 = 2K\Omega, R_2 = 470K\Omega, R_3 = 220K\Omega, R_4 = 100K\Omega$$

$$I_1 = 5mA$$

- a) Encontrar el voltaje de la fuente
- b) Encontrar la corriente administrada por la fuente



Solución:

a) El voltaje en cada una de las resistencias es igual al voltaje total, es decir el de la fuente. Por lo tanto, podemos calcular el voltaje total calculando el voltaje en una de las resistencias, en este caso, el que podemos calcular es el de la resistencia  $R_1$ :

$$V = V_1 = R_1 I_1 = (2K\Omega)(5mA) = (2 \times 10^3 \Omega)(5 \times 10^{-3} A) = 10 \text{Volts}$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 10 \text{Volts}$$

b) Podemos calcular la corriente de la fuente de dos formas:

*Primer método*

Para el caso de las corrientes en las otras resistencias tendremos:

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{10V}{470k\Omega} = 0.021mA$$

$$I_3 = \frac{V}{R_3} = \frac{10V}{220K\Omega} = 0.046mA$$

$$I_4 = \frac{V}{R_4} = \frac{10V}{100K\Omega} = 0.1mA$$

como la corriente total es la suma de las corrientes de cada una de las resistencias :

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 5mA + 0.021mA + 0.046mA + 0.1mA = 5.16mA$$

### Segundo método

Calculemos la resistencia total:

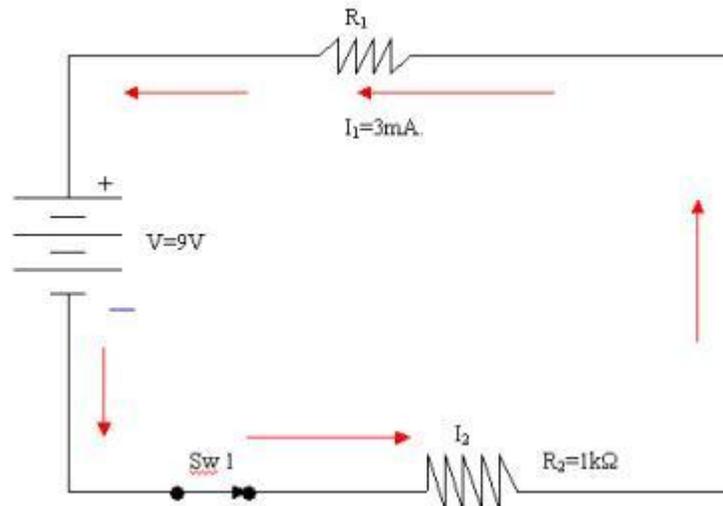
$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{2k\Omega} + \frac{1}{470k\Omega} + \frac{1}{220k\Omega} + \frac{1}{100k\Omega}} = 1.94K\Omega$$

la corriente total es igual a:  $I_4 = \frac{V}{R_4} = \frac{10V}{1.94K\Omega} \approx 5.16mA$

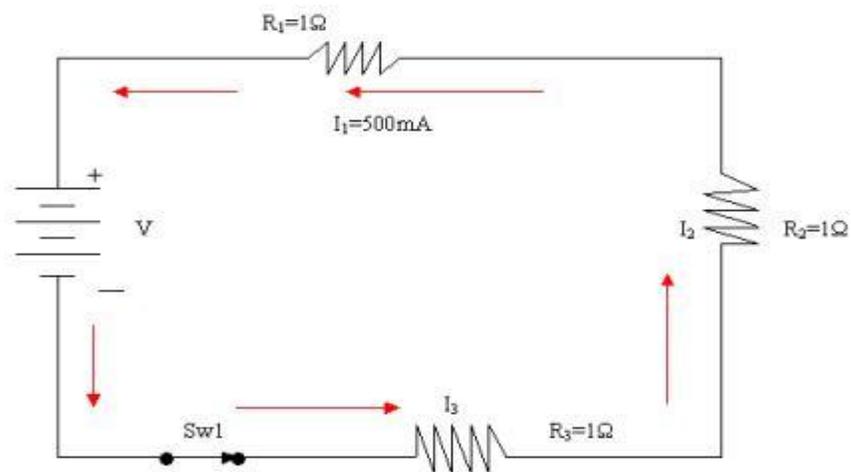
## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

➤ Solución de problemas haciendo uso de circuitos series y paralelos.

1. Encontrar el voltaje de la resistencia  $R_2$  del siguiente diagrama:



2. Encontrar el voltaje de la fuente del siguiente diagrama:



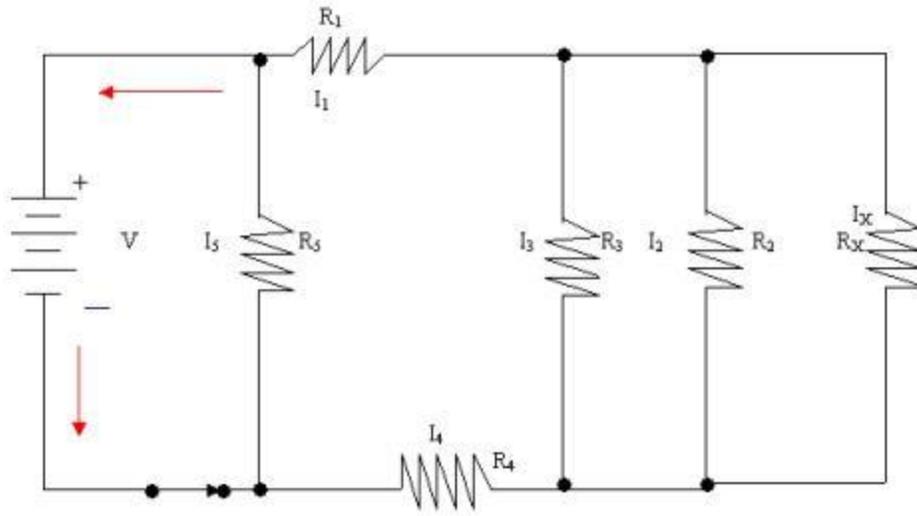
3.- Encuentra la resistencia  $R_x$  del circuito. Considera los siguientes datos:

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1K\Omega$$

$$R_1 = R_4 = 1\Omega$$

$$V_T = 24V$$

$$I_T = 300mA$$



## AUTOEVALUACIÓN

*Completa los siguientes enunciados:*

1.- Dos elementos están en \_\_\_\_\_ si tienen sólo un punto en común que no esté conectado a un tercer elemento.

2.- Se dice que dos elementos o ramas están en \_\_\_\_\_ cuando tienen dos puntos en común.

3.- Un \_\_\_\_\_ es cualquier trayectoria continua que sale de un punto en una dirección y regresa al mismo \_\_\_\_\_ desde otra dirección sin abandonar el circuito.

4.- La \_\_\_\_\_ establece que el voltaje entre los extremos de muchos tipos de materiales conductores es \_\_\_\_\_ proporcional a la corriente que fluye a través del material.

5.- La suma algebraica de las corrientes que entran a cualquier nodo es cero \_\_\_\_\_.

6.- La suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier trayectoria cerrada en circuito es cero \_\_\_\_\_.

7.- El \_\_\_\_\_ se define como una resistencia de cero ohm.

## RESPUESTAS

1. Serie
2. Paralelo
3. Lazo cerrado, punto
4. Ley de Ohm, directamente
5. Ley de corrientes de Kirchhoff
6. Ley de voltaje de Kirchhoff
7. Corto circuito

## UNIDAD 2

### FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

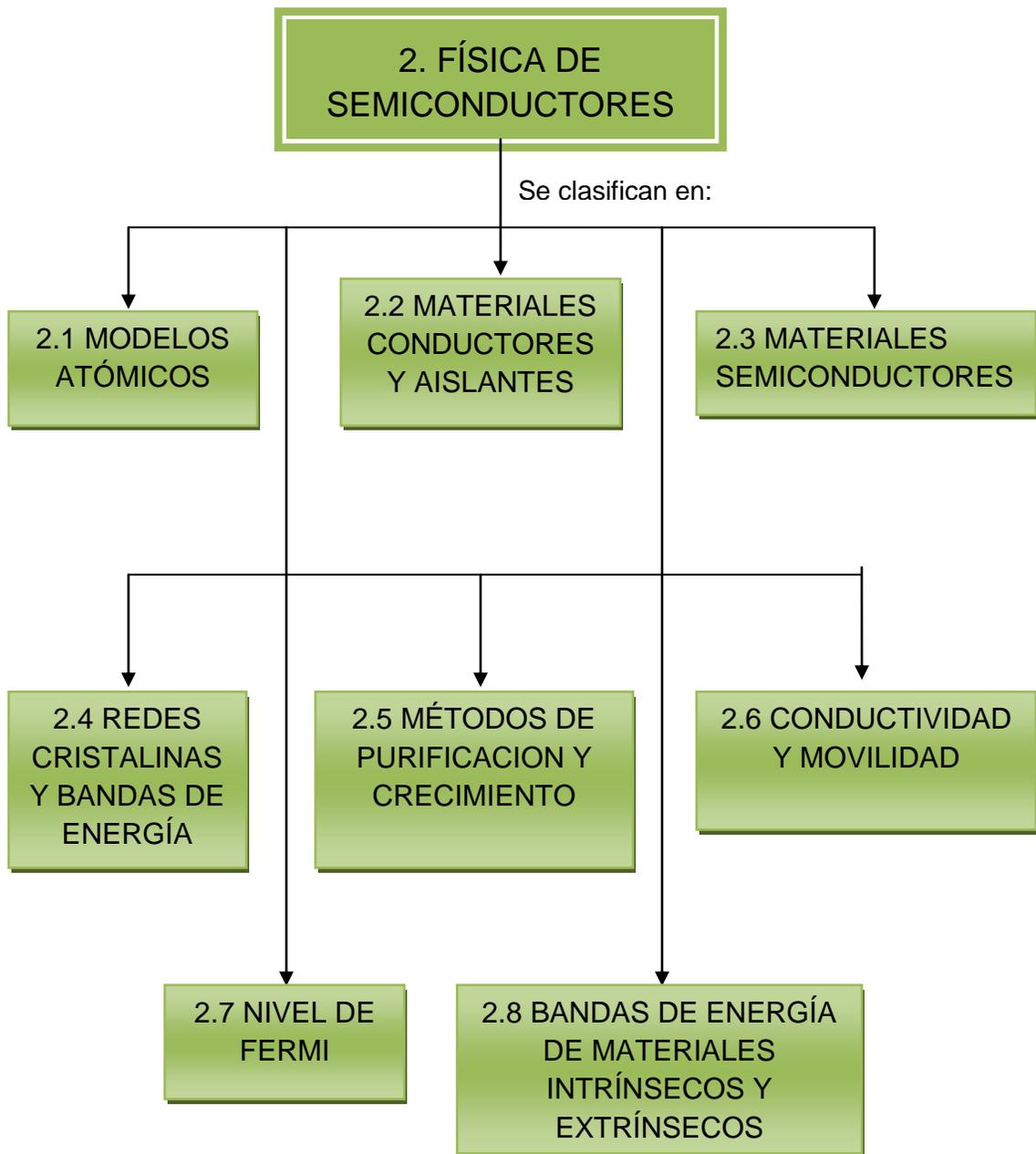
#### OBJETIVO

Describir y analizar los elementos que conforman a la física de semiconductores.

#### TEMARIO

- 2.1 Modelos atómicos
- 2.2 Materiales conductores y aislantes
- 2.3 Materiales semiconductores
- 2.4 Redes cristalinas y bandas de energía
- 2.5 Métodos de purificación y crecimiento
- 2.6 Conductividad y movilidad
- 2.7 Nivel de Fermi
- 2.8 Bandas de energía de materiales intrínsecos y extrínsecos

# MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

Los materiales pueden dividirse en tres grandes clases según la conducción de la corriente:

- 1) Aislantes: no permiten un buen flujo de corriente.
- 2) Conductores: pueden sustentar un flujo de corriente.
- 3) Semiconductores: son moderadamente buenos para el flujo de corriente.

Existen dos cualidades de los materiales para caracterizar según la conducción de corriente: la resistividad eléctrica y la conductividad eléctrica. Los aislantes son altamente resistivos y los conductores altamente conductivos. Los semiconductores se diferencian de los aislantes en la posibilidad de conducir corriente y de los conductores en el método de conducción de la corriente.

## 2.1 MODELOS ATÓMICOS

### *Modelo atómico de Dalton*

John Dalton nació en Inglaterra; impartió clases particulares de matemáticas y filosofía natural en Manchester. Posteriormente, se dedicó a la meteorología y realizó importantes descubrimientos como la *teoría de la circulación atmosférica*. Exploró el problema de la percepción de los colores, al que se conoce como *daltonismo*. Estudioso de la presión, el volumen y la temperatura en los gases, publica las “*leyes de los gases*”, para finalmente desembocar en su famosa *teoría atómica* que tiene su nombre.

Dalton formuló postulados que le han valido el título de “padre de la teoría atómica-molecular”; buscó explicación a las leyes ponderales que experimentalmente había comprobado con otros colegas.

Para Dalton, debía cumplirse, ante todo, que los átomos de cada elemento debían tener la misma masa.

En 1808, Dalton publicó su *teoría atómica*, la cual indica que:

- Todos los átomos son idénticos en un mismo elemento.
- Los átomos de un elemento difieren en todo a los átomos de otro elemento.
- Los compuestos se forman al combinarse átomos de elementos diferentes.
- Los elementos químicos están constituidos por átomos.
- Los átomos no pueden dividirse en fracciones más pequeñas.

De este modo, los cuerpos compuestos están integrados por átomos diferentes; las propiedades del compuesto dependen del número y de la clase de átomo que tenga.

La teoría de Dalton impulsó los conocimientos químicos durante un siglo. A pesar de sus intentos, Dalton no logró medir la masa absoluta de los átomos, pues sabemos que es extremadamente pequeña, por lo que trató de calcular la masa de los átomos con relación al hidrógeno, al que dio el valor unidad.

Para efecto de valor referente en la masa de los elementos, se fijó al oxígeno el valor de 16, así se originó la definición conceptual de unidad de masa atómica como la dieciseisava parte de la masa del oxígeno.

### *Modelo atómico de Thomson*

Este físico británico estudió las propiedades eléctricas de la materia, especialmente de los gases.

La medida directa del cociente carga-masa ( $e/m$ ) de los electrones, por J.J. Thomson en 1897, puede considerarse como el principio para la comprensión actual de la estructura atómica.

El átomo puede dividirse en las denominadas partículas fundamentales:

- a) Electrones con carga eléctrica negativa.
- b) Protones con carga eléctrica positiva.
- c) Neutrones, sin carga eléctrica y con una masa mucho mayor que las de los electrones y protones.

Thomson considera al átomo como una gran esfera con carga eléctrica positiva, en la cual se distribuyen los electrones como pequeños granitos (de forma similar a las semillas en una sandía) como se observa en la figura 2-1.

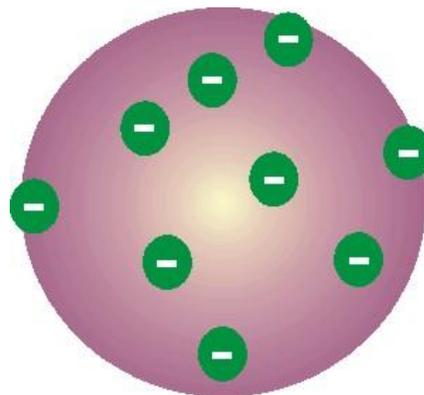


Figura 2-1 Modelo atómico de Thomson

### *Modelo atómico de Rutherford*

Ernest Rutherford, físico neozelandés, descubrió por medio de experimentos de laboratorio, que al bombardear algunas láminas de oro con partículas alfa, en lugar de pasar de un lado a otro, éstas giraban alrededor del centro, este fenómeno dio origen a la teoría de la existencia de un núcleo en el que residían las cargas positivas (protones) y las neutras (neutrones), obligando a las cargas negativas (electrones) a girar a su alrededor, como hacen los planetas con el sol, es decir, como un pequeño sistema planetario.

El hecho de que sólo algunas radiaciones sufrieran desviaciones hizo suponer que las cargas positivas que las desviaban estaban concentradas dentro de los átomos, ocupando un espacio muy pequeño, esta parte del átomo con electricidad positiva se denominó núcleo.

## 2.2 MATERIALES CONDUCTORES Y AISLANTES

### *Conductores*

Son materiales que dejan pasar la corriente eléctrica a través de ellos, de manera fácil y sin oponer resistencia; entre los mejores conductores se encuentran el platino, el oro, la plata, el cobre, el aluminio, el latón, el fierro y algunos más; todos tienen una estructura atómica parecida. Por ejemplo, el cobre es un buen conductor, esto se debe a su estructura atómica, como se observa en la figura 2-2. El núcleo o centro del átomo contiene 29 protones (cargas positivas). Cuando un átomo de cobre tiene una carga neutra, 29 electrones (cargas negativas) se disponen alrededor del núcleo. “Los electrones viajan en distintas orbitales (también llamadas capas). Hay 2 electrones en el primer orbital, 8 electrones en el segundo, 18 en el tercero y 1 en el orbital exterior”.<sup>6</sup>

El núcleo atómico atrae a los electrones orbitales (figura 2-2). Éstos no caen hacia el núcleo debido a la fuerza centrífuga (hacia afuera), la cual es creada por su movimiento orbital. Cuando un electrón se encuentra en un orbital estable, la fuerza centrífuga equilibra exactamente la atracción eléctrica ejercida

---

<sup>6</sup> Malvino Paul, *Principios de electrónica*, p. 33.

similar a un satélite en órbita alrededor de la Tierra, que a la velocidad y altura adecuadas, puede permanecer en un orbital estable sobre la Tierra.

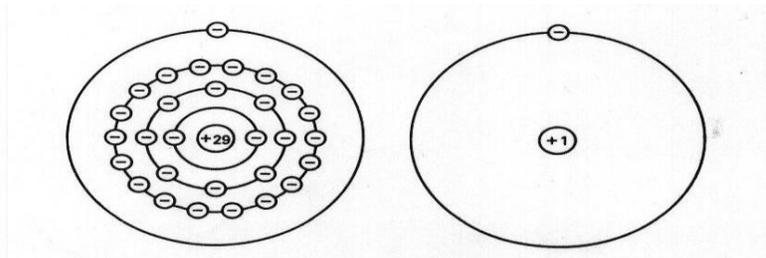


Figura 2-2 Átomo de cobre

Figura 2-3 Diagrama de la parte interna (átomo de cobre)

Cuanto más lejana es la órbita de un electrón menor es la atracción del núcleo. Los electrones de los orbitales más alejados del centro se mueven a menor velocidad, produciendo menor fuerza centrífuga. El electrón más externo (figura 2-2) viaja muy lentamente y prácticamente no se siente atraído hacia el núcleo. En electrónica, lo único que importa es el orbital exterior, el cual determina las propiedades eléctricas del átomo. Para subrayar la importancia del orbital de valencia, se define la parte interna de un átomo como el núcleo, más todos los orbitales internos. Para un átomo de cobre, la parte interna es el núcleo (+29) y los tres primeros orbitales (-28).

Es importante mencionar que la parte interna de un átomo de cobre tiene una carga resultante de +1, porque tiene 29 protones y 28 electrones internos. La figura 2-3 permite visualizar la parte interna, y tiene una carga resultante de +1.

### *Aislantes*

Los aislantes son materiales que resisten el flujo de la electricidad, por lo que ésta no pasa fácilmente. Ejemplos de estos materiales son el plástico, la madera, el caucho, la tela, el aire y el vidrio. Algunos materiales son mejores aislantes de electricidad que otros.

En ese sentido, Boylestad afirma lo siguiente:

Los aislantes son aquellos materiales que tienen pocos electrones y necesitan de la aplicación de un mayor potencial (voltaje) para establecer un nivel de corriente que se pueda medir.

Una aplicación común del material aislante es el recubrimiento del alambre que transporta corriente, el cual, si se dejara sin aislar, podría ocasionar peligrosos efectos secundarios. Las personas que reparan las líneas de alimentación eléctrica utilizan guantes de caucho y permanecen de pie sobre tapetes de hule como medida de seguridad cuando trabajan con líneas de transmisión de alto voltaje.<sup>7</sup>

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

- Consulta en diversas fuentes y elabora un cuadro comparativo, identificando las principales diferencias entre conductores y aislantes.

### 2.3 MATERIALES SEMICONDUCTORES

Los elementos semiconductores son aquellos elementos que se ubican en el grupo IV de la tabla periódica de los elementos, es decir, el germanio, el silicio, el plomo y el estaño. Estos elementos son cristales de alta pureza, se caracterizan por tener cuatro electrones en su órbita de valencia, esto los distingue de todos los demás elementos. En este sentido, los mejores conductores (plata, cobre y oro) tienen un electrón de valencia, mientras que los mejores aislantes poseen ocho electrones de valencia. Un semiconductor tiene propiedades eléctricas entre las de un conductor y las de un aislante, por lo tanto, tiene cuatro electrones de valencia.

Los diodos y los transistores están hechos de germanio y de silicio, los cuales son los mejores elementos semiconductores, por ello a continuación se detallarán.

Por cierto, se deben entender como electrones de valencia a los que se encuentran en los mayores niveles de energía del átomo, y son los responsables de la interacción entre átomos de distintas especies.

---

<sup>7</sup> Boylestad, Robert L., *Introducción al análisis de circuitos*, p.47.

### *Germanio*

Este elemento es un ejemplo de semiconductor. Tiene cuatro electrones en su orbital de valencia. Hace varios años, el germanio era el único material adecuado para la fabricación de dispositivos semiconductores, sin embargo, estos dispositivos tenían un grave inconveniente que no pudo ser resuelto por los ingenieros: su excesiva corriente inversa. Esto propició que otro semiconductor, el *silicio*, se hiciera más práctico, dejando obsoleto al germanio en la mayoría de las aplicaciones electrónicas.

### *Silicio*

“Después del oxígeno, el silicio es el elemento más abundante de la Tierra”.<sup>8</sup> Pero, existieron algunos problemas que impidieron su uso en los primeros días de los semiconductores. Una vez resueltos, las ventajas del silicio lo convirtieron inmediatamente en el semiconductor a elegir.

Un átomo de silicio aislado tiene 14 protones y 14 electrones. En la figura 2-4 se observa que el primer orbital tiene 2 electrones y el segundo 8. Los 4 electrones restantes están en el orbital de valencia. En la figura 2-4a, la parte interna tiene una carga resultante de +4 porque tiene 14 protones en el núcleo y 10 electrones en los dos primeros orbitales. La figura 2-4b muestra la parte interna de un átomo de silicio. Los 4 electrones de valencia nos indican que el silicio es un semiconductor.

---

<sup>8</sup> Malvino, Paul, *op. cit.*, p. 35.

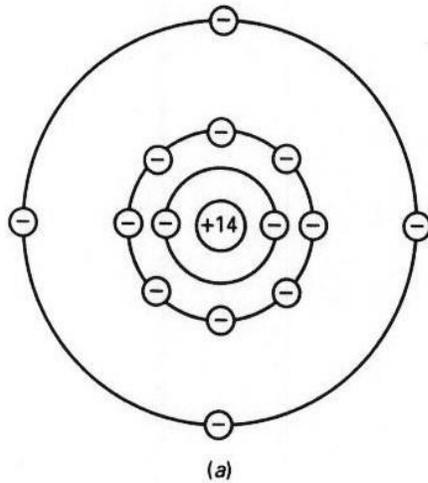


Figura 2-4a Átomo de silicio

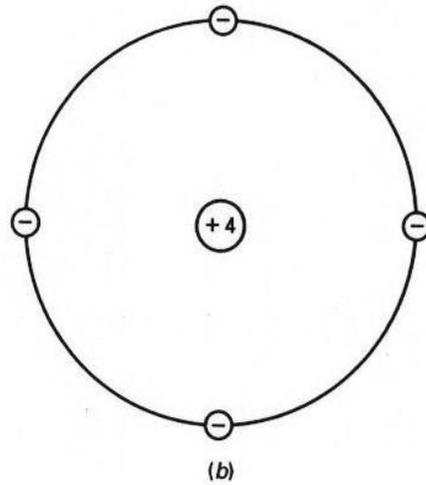


Figura 2-4b Diagrama de la parte interna

Como se mencionó, los cristales de silicio tienen cuatro electrones y al combinarse con otro átomo de silicio, tendrán ocho electrones en la última capa y opondrán gran resistencia a ser desplazados, esa es una característica de los semiconductores, son malos conductores de la corriente eléctrica.

### ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

- Consulta en diversas fuentes, y elabora un esquema indicando las ventajas más importantes de los principales semiconductores.

## 2.4 REDES CRISTALINAS Y BANDAS DE ENERGÍA

Primero, definiremos lo que es un cristal: en química, los cristales poseen ciertas formas, como por ejemplo, los diamantes; una característica particular es que sus átomos o moléculas se ubican en el espacio de tres dimensiones, y desde cualquier punto se puede trazar una recta a otro átomo y tendrán la misma distancia. Esto indica que los cristales son simétricos y que tienen varios ejes de simetría, que en bastantes casos se observan como pequeños cubos con puntos en las aristas.

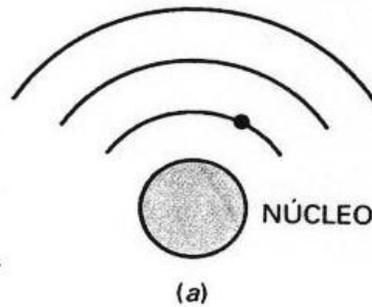
Los cristales están formados por átomos, iones y moléculas, y se pueden clasificar en cuatro tipos de acuerdo a la clase de partículas que forman al cristal y a las fuerzas que mantienen juntas a estas partículas:

1. Cristales iónicos: Conducen la corriente eléctrica cuando están fundidos o en solución, como ejemplos están: NaCl, KNO<sub>2</sub>.
2. Cristales moleculares: No conducen la corriente eléctrica encontrándose en estado líquido o sólido, por ejemplo: H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>
3. Redes covalentes: No conducen la corriente eléctrica, algunos ejemplos son: SiO<sub>2</sub>, y los diamantes.
4. Cristales metálicos: Son excelentes conductores de la corriente eléctrica, por ejemplo: Ag, Au, Fe, Al.

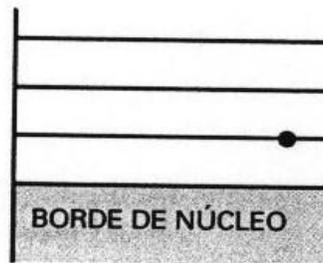
Los sólidos cristalinos mantienen sus iones prácticamente en contacto mutuo, lo que explica que sean incompresibles. Además, estos iones no pueden moverse libremente, sino que se encuentran dispuestos en posiciones fijas distribuidas de manera desordenada en el espacio, formando retículas cristalinas o redes espaciales.

Cuando un átomo de silicio está aislado, la orbital de un electrón sólo se ve influida por las cargas del átomo aislado. Lo que provoca que los niveles de energía sean lo que se representan por las líneas de la figura 2-5. Pero, cuando los átomos de silicio están en un cristal, la orbital de cada electrón también se ve influenciada por las cargas de muchos otros átomos de silicio.

Como cada electrón tiene una posición única dentro de la red cristalina, no hay dos electrones que tengan exactamente el mismo patrón de cargas alrededor. Ésta es la razón de que la orbital de cada electrón sea diferente; o dicho de otro modo, los niveles de energía de cada electrón son distintos.



(a)



(b)

Figura 2-5a Orbitales

Figura 2-5b Niveles de energía

La figura 2-6 muestra lo que sucede a los niveles de energía. Todos los electrones en el primer orbital tienen niveles de energía ligeramente diferentes porque no hay dos electrones que tengan exactamente el mismo nivel de carga. Como hay miles de millones de electrones en la primera orbital, estas ligeras diferencias de niveles de energía forman un grupo o banda de energía. De manera similar, los miles de millones de electrones de la segunda orbital forman la segunda banda de energía y así sucesivamente para el resto de las bandas.

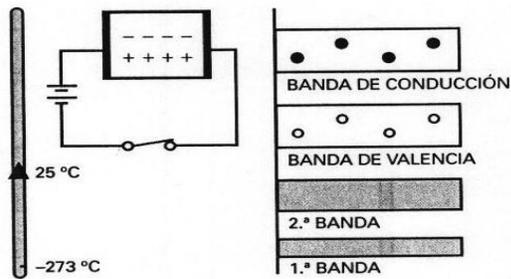


Figura 2-6 Semiconductor intrínseco y sus bandas de energía

Los huecos permanecen en la banda de valencia, pero los electrones libres se mueven a la banda de energía inmediatamente superior, la cual se denomina *banda de conducción* con algunos electrones libres y una banda de valencia con algunos huecos. Cuando se cierra el interruptor, existe una pequeña corriente en el semiconductor puro.

Los electrones libres se desplazan a través de la banda de conducción y los huecos lo hacen a través de la banda de valencia.

En un sólido cristalino existe una distribución regular de átomos en el espacio que constituye la denominada red cristalina.

### *Bandas de energía tipo "n"*

La figura 2-7 presenta las bandas de energía para un semiconductor tipo "n". Los portadores mayoritarios son los electrones libres en la banda de conducción y los minoritarios son los huecos en la banda de valencia. Cuando el interruptor está cerrado en la figura 2-7, los portadores mayoritarios circulan hacia la izquierda y los minoritarios hacia la derecha.

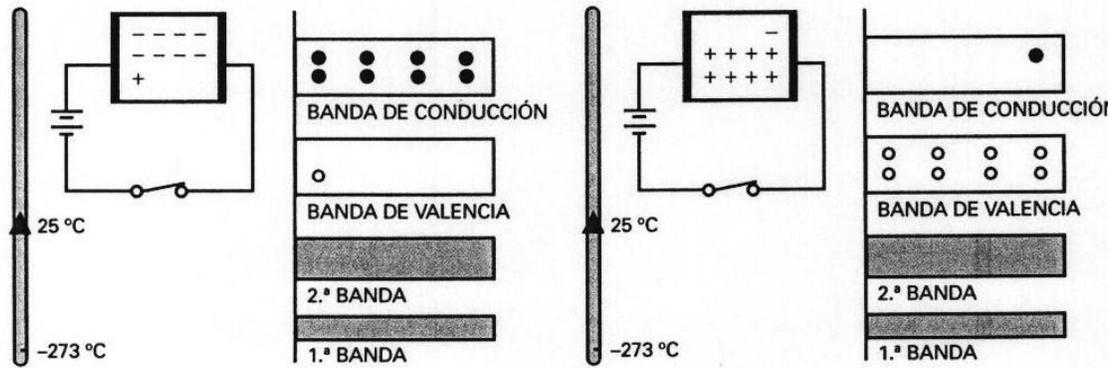


Figura 2-7 Semiconductor tipo “n” y sus bandas de energía. Figura 2-8 semiconductor tipo “p” y sus bandas de energía.

### *Banda de energía tipo “p”*

La figura 2-8 muestra las bandas de energía para un semiconductor tipo “p”. En la cual se observa una inversión de papeles de los portadores. Ahora, los portadores mayoritarios son los huecos en la banda de valencia, y los minoritarios son los electrones de la banda de conducción. “Como el interruptor está cerrado, los portadores mayoritarios circulan hacia la derecha y los minoritarios hacia la izquierda”.<sup>9</sup>

## 2.5 MÉTODO DE PURIFICACIÓN Y CRECIMIENTO

El método de purificación de los cristales semiconductores se realiza en hornos especiales, de tal manera que su configuración final es de una pureza asombrosa.

El crecimiento de estos materiales semiconductores como el silicio, se logra utilizando el método de czochralski, el cual consiste en fundir el material para formar lingotes con una determinada orientación cristalina. El crecimiento puede ser en volumen o epitaxial (este término indica *sobre orden*, y se refiere a un proceso de crecimiento orientado de una película sobre un sustrato, que puede ser del mismo o de diferente material).

A los procesos de cristalización de películas sobre la superficie de un sustrato se les conoce como métodos de crecimiento epitaxial de cristales.

<sup>9</sup> Malvino, Paul, *Principios de electrónica*, p.37

Como ya se mencionó, los materiales semiconductores tienen cuatro electrones en su última capa, además son cristales muy puros, esto los hace malos conductores de la corriente eléctrica, y para utilizarlos en trabajos de electrónica, es necesario alterar este número de electrones en el laboratorio, esto puede ser con un elemento del grupo cinco de la tabla periódica de los elementos, los cuales tienen cinco electrones en su última capa de valencia, que al combinarse con los cuatro electrones del cristal semiconductor, dejan un electrón sin pareja, y multiplicando este proceso, se obtiene un cristal con exceso de electrones denominado tipo N.

Al combinar el cristal semiconductor con un elemento del grupo tres de la tabla periódica, en el proceso quedará con un electrón menos, lo cual producirá un poro, un agujero o un hueco, que se desplazará hacia el polo negativo, ya que esta ausencia de electrón se comporta como carga positiva; a estos cristales se les conoce como tipo P. A este proceso también se le denomina dopado, y transforma a los cristales puros o intrínsecos, en impuros o extrínsecos; en el laboratorio se realiza de varias formas, dependiendo la tecnología que se utilice:

- a) *Método de oxidación-reducción:* En este método, una película de melanina se oxida con yodo o con bromo, o se reduce mediante un material alcalino.
- b) *Método electroquímico:* Consiste en introducir dos electrodos en una solución electrolítica, un electrodo se cubre con un polímero y se conectan ambos cerrando el circuito con una batería que genera una diferencia de potencial entre ellos, haciendo que las cargas o electrones entren en el polímero que aumenta su potencial negativo, a esto se le conoce como dopaje tipo N, si invertimos la batería ahora las cargas salen del polímero, a esto se le conoce como dopaje tipo P.
- c) *Transmutación neutrónica:* Este método consiste en utilizar la interacción nuclear de los neutrones térmicos con los isótopos presentes en la red de un cristal semiconductor.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

- Investiga los métodos y técnicas que se emplean para crear los distintos tipos de diodos rectificadores, así como las pruebas que deben superar antes de salir al mercado.

### 2.6 CONDUCTIVIDAD Y MOVILIDAD

La conductividad es la facilidad que presenta un material para que los electrones de su última órbita sean dislocados sin demasiado esfuerzo. Si se aplica una diferencia de potencial a los extremos de un material semiconductor, ya sea tipo P o tipo N, los portadores libres de carga, los electrones en la banda de conducción y los huecos en la banda de valencia, admitirán una aceleración debido a la fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre ellos ganando velocidad hasta que choquen con la red, y se frenen, pero inmediatamente son acelerados hasta el siguiente choque. Este proceso da como resultado que los portadores se muevan con una velocidad promedio,  $V_n$  los electrones y  $V_p$  los huecos, tal que se cumple:

$$V_n = m_n E \quad \text{y} \quad V_p = m_p E \quad (1)$$

Donde  $m_n$  es la movilidad de los electrones y  $m_p$  es la movilidad de los huecos, es decir, su vibración debido a la temperatura. Por tanto, si las concentraciones de portadores libres de carga en el material semiconductor son  $n$  electrones por  $\text{cm}^3$  y  $p$  huecos por  $\text{cm}^3$ , la densidad de corriente será:

$$J = qnV_n + qpV_p = q(nm_n + pm_p) E = SE \quad (2)$$

Donde  $q$  es la carga de un electrón y  $S$  es la conductividad del material,  $s$  es la inversa de la resistencia  $r$  ( $s = 1/r$ ).

La movilidad es independiente del campo electrónico para valores de éste, menores de  $10^3 \text{ Vcm}^{-1}$ , varía con el  $E^{-1/2}$  para  $10^3 \text{ Vcm}^{-1} < E < 10^4 \text{ Vcm}^{-1}$ , y para valores de  $E$  superiores, empieza a variar inversamente con el campo

eléctrico alcanzando los electrones una velocidad máxima de saturación del orden de  $10^7 \text{ cms}^{-1}$ .

La movilidad lógicamente disminuye con la temperatura, a mayor temperatura mayor vibración en la red y mayor probabilidad de choques, en una relación de  $T^{-m}$  donde, para el SI,  $m$  vale 2,5 para los electrones y 2,7 para los huecos.

La conductividad en un material semiconductor intrínseco aumenta con la temperatura, ya que el aumento en función de la temperatura ( $n_i$ ) es mayor que la disminución de las movilidades. Para un semiconductor extrínseco, en un entorno amplio de la temperatura ambiente, como la concentración de portadores mayoritarios no varía apreciablemente, la conductividad disminuye con la movilidad.

Es muy importante considerar que se producen dos corrientes, una denominada de arrastre, la cual se debe a un campo eléctrico, y otra denominada de difusión, producida por la diferencia de concentración de portadores. De esto se origina una de las propiedades que distingue a los semiconductores: *número de portadores como producto de la temperatura*.

Este dato permite clasificar a los semiconductores de acuerdo a la cantidad de huecos en la banda de valencia en relación a la cantidad de electrones de la banda de conducción, de este modo, los semiconductores intrínsecos tienen igual número de huecos en la banda de valencia como electrones en la banda de conducción, y en los semiconductores extrínsecos esta relación es diferente, es decir pueden existir más electrones en la banda de conducción que huecos en la banda de valencia.

En resumen, los semiconductores intrínsecos son los cristales puros como el silicio, y los semiconductores extrínsecos son los cristales con impurezas, o también denominados “dopados”.

## ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Investiga las características de la corriente de arrastre y la corriente de difusión.

## 2.7 NIVEL DE FERMI

La energía de Fermi es la energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico (salto que experimenta la energía de un corpúsculo cuando absorbe o emite radiación) a temperatura cero ( $0\text{K}$ ). Se denota por  $E_F$  y recibe su nombre por el físico Enrico Fermi.

La energía de Fermi es un concepto que se aplica en la teoría del orbital, en el comportamiento de los semiconductores y en la física del estado sólido en general.

La comprensión de los aislantes, conductores y semiconductores se facilita con la energía de Fermi.

Por definición, los materiales conductores tienen cargas eléctricas libres, los electrones de su última órbita se sueltan y se mueven, y al moverse aumenta la temperatura del material, y adquieren mayor energía, esto permite que los electrones libres se desplacen por todo el material ocupando nuevos estados.

1. En los conductores, el nivel de Fermi se sitúa en la banda de conducción, estando ocupados todos los niveles por debajo del nivel de Fermi y no habiendo electrones con energía superior a energía de Fermi.
2. En los semiconductores, el nivel de Fermi estará forzosamente en la banda prohibida, entre la banda de conducción y la de valencia.

El nivel de Fermi se encuentra en la banda de conducción. Si extrapolamos al cero absoluto, todos los niveles comprendidos entre energía cinética (debido al movimiento de las cargas eléctricas) y energía de Fermi estarán ocupados, por lo que para calcular cuántos electrones de la banda de conducción hay por unidad de volumen bastará integrar la función entre energía cinética y de Fermi.

## 2.8 BANDAS DE ENERGÍA DE MATERIALES INTRÍNSECOS Y EXTRÍNSECOS

En la estructura atómica de los materiales semiconductores, existen dos capas de energía denominadas banda de valencia y banda de conducción, y entre ellas hay una banda de energía denominada prohibida. A medida que los materiales se calientan, los electrones adquieren energía que los ayuda a saltar de la banda de valencia a la banda de conducción, al producirse este fenómeno se establecen dos corrientes, una que producen los electrones al llegar a la banda de conducción, y otra producida por los agujeros que los electrones dejan.

Claro que, lo ancho de la banda prohibida no permite el paso de los electrones de una banda de energía a otra; para que esto suceda los electrones deben adquirir una energía mayor a 0.78eV en el caso del germanio, y de 1.21eV en el caso del silicio, (un eV es la energía que adquiere un electrón al estar sometido a la acción de un campo eléctrico en un punto cuya diferencia de potencial es de un volt).

### *Semiconductor intrínseco*

Un semiconductor intrínseco es un semiconductor puro. “Un cristal de silicio es un semiconductor intrínseco si cada átomo del cristal es un átomo de silicio”.<sup>10</sup> A temperatura ambiente, un cristal de silicio se comporta más o menos como un aislante, ya que tiene solamente unos cuantos electrones libres y sus huecos correspondientes producidos por la energía térmica que posee dicho cristal.

La figura 2-9 muestra parte de un cristal de silicio situado entre dos placas metálicas cargadas. Supóngase que la energía térmica ha producido un electrón libre y un hueco. El electrón libre se encuentra en un orbital de mayor energía en el extremo derecho de cristal. Debido a que el electrón está cerca de la placa cargada negativamente, es rechazado por ésta, de forma que se mueve hacia la izquierda de un átomo a otro hasta que alcanza la placa positiva.

---

<sup>10</sup> *Ibidem*, p. 39.

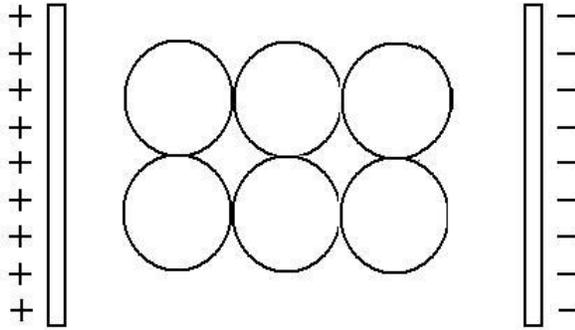


Figura 2-9 Flujo de un hueco a través de un semiconductor.

### *Semiconductores extrínsecos*

Un semiconductor se puede dopar<sup>11</sup> para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos. Debido a ello existen dos tipos de semiconductores dopados:

#### *Semiconductores tipo $n$*

El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se denomina semiconductor tipo  $n$ , donde  $n$  hace referencia a negativo.

En la figura 2-10 se observa un semiconductor tipo  $n$ . Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo  $n$ , reciben el nombre de portadores mayoritarios, mientras que a los huecos se les denomina portadores minoritarios.

Al aplicarse una tensión, los electrones libres dentro del semiconductor se desplazan hacia la izquierda y los huecos lo hacen hacia la derecha. Cuando un hueco llega al extremo derecho del cristal, uno de los electrones del circuito externo entra al semiconductor y se recombina con el hueco.

<sup>11</sup> Dopar es la acción de añadir impurezas a un mono cristal.

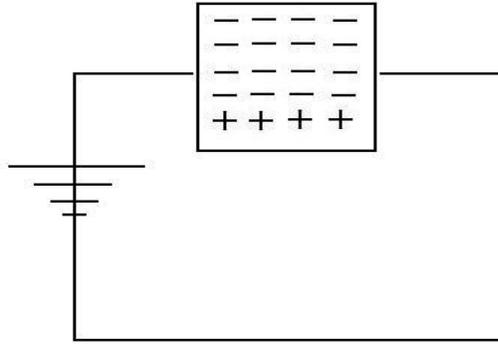


Figura 2-10 El semiconductor tipo *n* tiene muchos electrones libres

Los electrones libres mostrados en la figura 2-10 circulan hacia el extremo izquierdo del cristal, donde entran al conductor para circular hacia la terminal positiva de la batería.

### *Semiconductor tipo p*

El silicio que ha sido dopado con impurezas trivalentes se denomina semiconductor tipo *p*, donde *p* hace referencia a lo positivo.

La figura 2-11 muestra un semiconductor tipo *p*. Como el número de huecos supera al número de electrones libres, son los minoritarios. Al aplicarse una tensión, los electrones libres se desplazan hacia la izquierda y los huecos lo hacen a la derecha. En la figura 2-11, los huecos que llegan al extremo derecho del cristal se recombinan con los electrones libres del circuito externo.

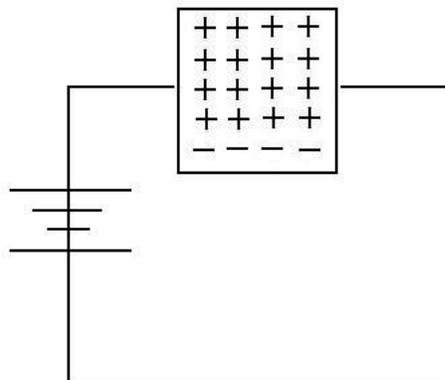


Figura 2-11 El semiconductor tipo *p* tiene muchos huecos

En el diagrama de la figura 2-11, hay también un flujo de portadores minoritarios. Los electrones libres dentro del semiconductor circulan de derecha a izquierda. Como existen muy pocos portadores minoritarios, por tanto su efecto es casi despreciable en este circuito.

### ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Desarrolla e implementa en el laboratorio elementos conductores y semiconductores.
- Realiza una lista con materiales conductores, indicando cuántos electrones tienen en su última órbita.
- Realiza una lista con materiales semiconductores, indicando cuántos electrones tienen en su última órbita.

## AUTOEVALUACIÓN

*Completa los siguientes enunciados:*

1.- Un material semiconductor que haya sido sujeto al proceso de dopado se denomina \_\_\_\_\_.

2.- Un semiconductor se puede \_\_\_\_\_ para que tenga un exceso de electrones libres o un exceso de huecos.

3.- Los electrones libres se desplazan a través de la banda de \_\_\_\_\_ y los huecos lo hacen a través de la banda de \_\_\_\_\_.

4.- El silicio que ha sido dopado con una impureza pentavalente se denomina \_\_\_\_\_.

5.- Los elementos están formados por partículas muy pequeñas, llamadas \_\_\_\_\_, que son invisibles e indestructibles.

6.- \_\_\_\_\_ considera al átomo como una gran esfera con carga eléctrica positiva, en la cual se distribuyen los electrones como pequeños granitos.

7.- La experiencia de \_\_\_\_\_ consistió en bombardear con partículas alfa una finísima lámina de oro.

*Subraya la respuesta correcta:*

1.- Está considerado como el padre de la teoría atómica molecular:

- a) Thomson
- b) Rutherford
- c) Dalton
- d) Bohr

2.- Estudió las propiedades eléctricas de la materia, especialmente de los gases:

- a) Thomson
- b) Rutherford
- c) Dalton
- d) Bohr

3.- Identificó dos tipos de radiaciones emitidas por el uranio a las que nombró alfa y beta:

- a) Thomson
- b) Rutherford
- c) Dalton
- d) Bohr

## RESPUESTAS

1. Extrínseco
2. Dopar
3. Conducción, valencia
4. Semiconductor tipo "n"
5. Átomos
6. Thomson
7. Rutherford

1. c
2. a
3. b

## UNIDAD 3

### DIODOS

#### OBJETIVO

Conocer, identificar y analizar los principales tipos de diodos que existen en la electrónica.

#### TEMARIO

3.1 Técnicas de fabricación de diodos

3.2 Polarización

3.3 Unión PN

3.4 Diodo rectificador

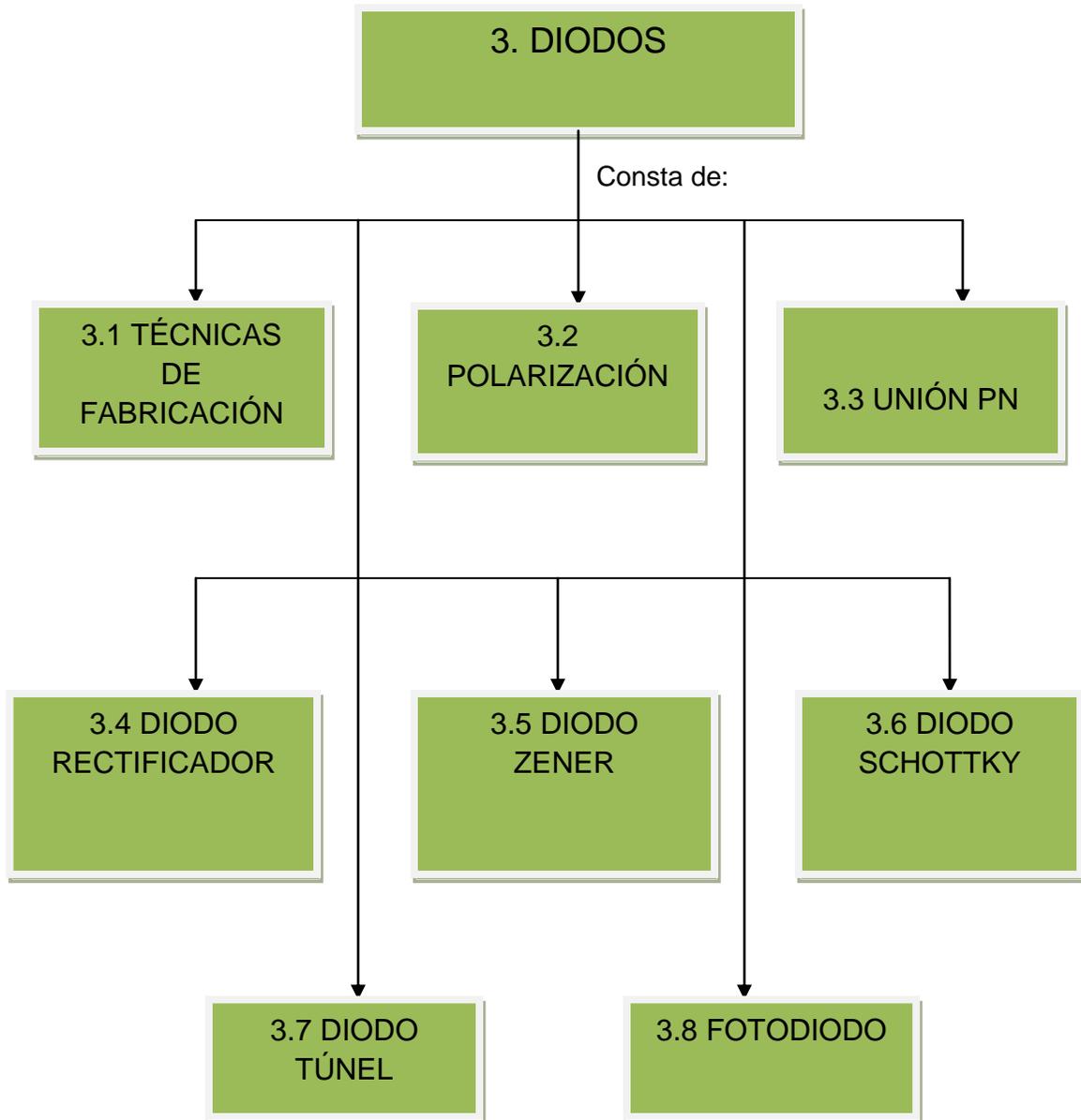
3.5 Diodo zener

3.6 Diodo Schottky

3.7 Diodo túnel

3.8 Fotodiodo

## MAPA CONCEPTUAL



## INTRODUCCIÓN

El diodo es un dispositivo de dos terminales que, en una situación ideal, se comporta como un interruptor común, con la condición especial de que sólo puede conducir en una dirección.

La utilidad del diodo radica en los dos diferentes estados en que se puede encontrar, dependiendo de la corriente eléctrica que esté pasando en este dispositivo.

El diodo como rectificador es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua pulsante, que se realiza utilizando diodos rectificadores, ya sean semiconductores de estado sólido, válvula al vacío, etc.

El diodo zener es similar al diodo de unión; su característica corriente-voltaje presenta también una zona directa, otra inversa, y otra de ruptura.

El diodo schottky proporciona conmutaciones muy rápidas entre los estados de conducción directa e inversa (menos de un nanosegundo en dispositivos pequeños) y tiene muy bajas tensiones umbral (del orden de 0.2 volts).

Los diodos túnel son muy rápidos, presentan una zona con “resistencia negativa” que permiten utilizarlos como elementos activos en osciladores y amplificadores.

El fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por luz.

### 3.1 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN DE DIODOS

Para comenzar el proceso de fabricación de un diodo semiconductor se debe contar con el equipo especializado y con los materiales necesarios, como el germanio, el silicio o algún otro elemento semiconductor que forme parte del grupo IV de la tabla periódica de los elementos, y que se encuentre libre de contaminación.

De manera inicial, los materiales se someten a una serie de reacciones químicas y a un proceso de refinación por zona para formar un cristal policristalino, en el cual los átomos están acomodados en forma aleatoria, mientras que en el cristal único, los átomos se encuentran instalados en una red cristalina geométrica, simétrica y uniforme.

A continuación, mediante técnicas especiales se dopan dos cristales, uno con exceso de electrones, denominado *cristal tipo N*, y otro con deficiencia de electrones, llamado *cristal tipo P*. De forma posterior, se unen dos cristales, uno tipo N y otro tipo P, formando prácticamente un diodo semiconductor el cual, para quedar terminado, se encapsula en un material resinoso y aislante, y se le sueldan terminales metálicas en sus extremos, esto permite utilizarlos en los diferentes circuitos electrónicos.

En otra etapa, se le imprime una nomenclatura y un color que lo distingue de otros. En una máquina de pruebas se mide su corriente a favor y en sentido contrario; de estos resultados, se decidirá el fin del dispositivo construido. Finalmente, una máquina lo prensa en una tira de papel para depositarlo en una caja para almacenarse o para su venta.

#### *Técnica de dopaje*

Una de las técnicas más utilizadas por los fabricantes de semiconductores es la *técnica de dopaje*, en este proceso se efectúa una siembra de átomos con un número de electrones mayor o menor que el material semiconductor, que como sabemos tiene cuatro electrones en su última órbita. Al inyectar electrones, éstos se combinan con los protones, cuando sobran electrones se origina el *cristal tipo N* por exceso de electrones, y cuando faltan electrones para

combinarse con los protones, se produce un *crystal tipo P*. Esta implantación de átomos se realiza mediante dos técnicas:

- *Dopaje por implantación anódica*: es el proceso de enviar sobre el área de un cristal semiconductor, una cantidad determinada de átomos que funcionan como dopantes, estos átomos son acelerados mediante una diferencia de potencial para que, con bastante velocidad, se claven en el cristal semiconductor produciendo el efecto deseado.
- *Dopaje por difusión térmica de impurezas*: es un proceso en el cual, en altas temperaturas (aproximadamente 1000°C), se disuelve un soluto, que es el material dopante, en un disolvente que casi siempre es el silicio. Al calentarse el silicio, los átomos dopantes penetran en el cristal semiconductor.

#### *Metalizar superficies de contacto*

En los circuitos electrónicos todos los componentes van soldados, por esta razón se deben metalizar las superficies de contacto de los materiales semiconductores, de manera que los substratos sean de capa gruesa y resistente, para ello se emplean dos técnicas muy comunes:

- *Evaporación térmica*: Este proceso se realiza dentro de una campana al vacío. En su interior se encuentran, los substratos de silicio, los filamentos que funcionan como un crisol, el metal que se va a evaporar y una bomba de difusión. Los filamentos se conectan a una fuente externa de energía eléctrica para calentar el metal colocado sobre ellos hasta que se evapora y cubre a los substratos al enfriarse metalizándolos.
- *Pulverización catódica*: Esta forma de metalizar el substrato de silicio consiste en colocarlo en una cámara de vacío sobre una placa a la cual se conecta el positivo de una fuente externa de alto voltaje, y sobre el negativo de la fuente se conecta el metal (por ejemplo, aluminio). En el interior se hace el vacío y se inyecta argón que al calentarse, sus iones

positivos se dirigen al metal con mucha fuerza, de tal manera que le arrancan átomos que se depositan sobre la oblea de silicio que se encuentra sobre el ánodo, y que son empujados por una bomba de difusión.

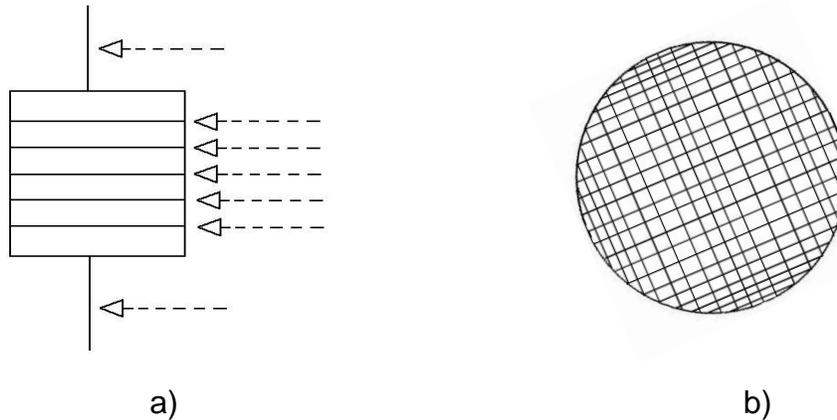


Fig. 3-1 a) Sección esquemática de un diodo de unión PN discreto  
b) Superficie de la oblea. Cada cuadrado (un dado) se convierte en un diodo, una vez cortado y montado.

El proceso de dopaje se realiza al mismo tiempo con todos los dados de la oblea, los cuales posteriormente se convertirán en diodos discretos o normales (figura 3.1a).

### 3.2 POLARIZACIÓN

Como se explicó, los materiales tipo N y tipo P se unen mediante técnicas especiales, y teóricamente en ese momento se origina un diodo semiconductor, con la característica de que al estar unidos estos dos materiales semiconductores, se genera una barrera cuando se combinan los electrones con los agujeros que se formaron en el cristal tipo N, esto produce una deficiencia de portadores alrededor de la región de unión también denominada región de agotamiento.

El diodo semiconductor se forma entonces al unir dos cristales, uno tipo N y otro tipo P, los cuales al recibir una diferencia de potencial en sus terminales soldables presentarán las siguientes reacciones:

a) Sin polarización ( $V_D = 0V$ ):

Sin una batería en sus extremos que lo polarice, no habrá flujo de corriente, en otras palabras, su corriente en cualquier sentido es cero. Como se observa en la figura 3-2.

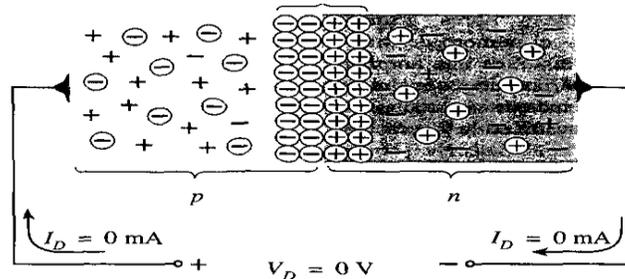


Fig. 3-2 Unión PN sin polarización externa.

Bajo condiciones sin polarización, cualquiera de los portadores minoritarios (huecos) en el material tipo N, que se encuentren dentro de la región de agotamiento, pasarán directamente al material tipo P.

Entre más cercanos se encuentren los portadores minoritarios y la unión, disminuirá la oposición de los portadores positivos, y aumentará la atracción de los portadores negativos en la región de agotamiento del cristal tipo N.

b) Polarización inversa ( $V_D < 0V$ ):

Si se aplica una batería a los extremos del diodo semiconductor, de tal forma que la terminal positiva se encuentre conectada con el material tipo N y la terminal negativa esté conectada con el material tipo P como se muestra en la figura 3-3, el número de iones positivos en la región de agotamiento del material tipo N se incrementará debido al gran número de electrones “libres” atraídos por el potencial positivo del voltaje aplicado. De igual manera, el número de iones negativos se incrementará en el material tipo P. El efecto neto, por tanto, es una ampliación de la región de agotamiento, en la cual esa ampliación establecerá una barrera de potencial demasiado grande para ser superada por los portadores mayoritarios, además de una reducción efectiva del flujo de los portadores mayoritarios a cero, como se muestra en la figura 3-3.

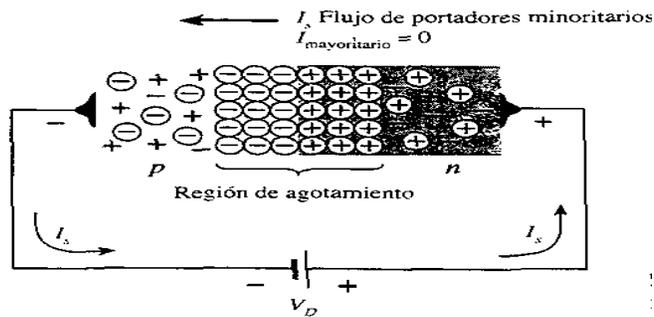


Fig. 3-3 Unión PN con polarización inversa

A la corriente que existe en condiciones de polarización inversa se le denomina corriente de saturación inversa, y se representa mediante  $I_s$ .

c) *Polarización directa* ( $V_D > 0V$ ):

La condición de polarización directa se establece al aplicar el potencial positivo al material tipo P y el potencial negativo al material tipo N, como se muestra en la figura 3-4.

“Un diodo semiconductor tiene polarización directa cuando se ha establecido la asociación tipo P y positivo y tipo N y negativo”.<sup>12</sup>

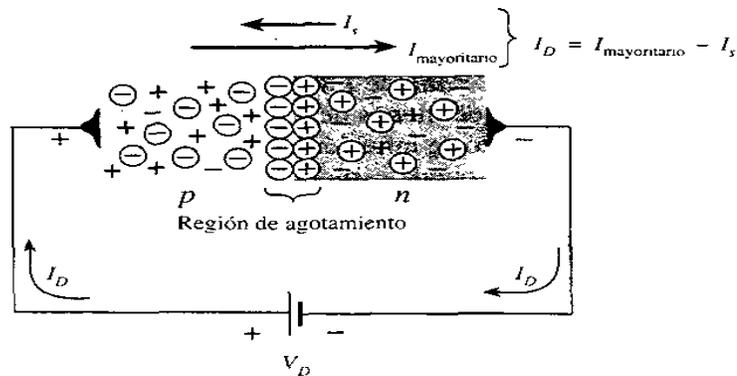


Fig. 3-4 Unión PN con polarización directa

La aplicación de un potencial de polarización directa  $V_D$  “forzará” los electrones en el material tipo N y los huecos en el material tipo P para que se

<sup>12</sup> Boylestad, Robert L., *Electrónica teoría de circuitos*, p. 12.

recombinen con los iones cercanos a la unión y reducirá el ancho de la región de agotamiento como se observa en la figura 3-4.

### ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

- Identifica y describe los principales tipos de polarización en los diodos mediante una investigación documental.
- Construye un circuito con un diodo 1N 4001, una resistencia de  $600\Omega$  y una batería de 9V; conecta la batería en una posición y luego al contrario; mide la corriente que circula en ambas formas; anota tus conclusiones.

#### 3.3 UNIÓN PN

Se denomina unión PN a la configuración fundamental de los dispositivos electrónicos comúnmente llamados semiconductores, principalmente diodos y transistores; está formada por la unión metalúrgica de dos cristales, generalmente de silicio (Si), aunque también se fabrican de germanio (Ge), ya sea de naturaleza P y N, según su composición a nivel atómico.

La figura 3-5 representa el símbolo, la estructura y el diagrama de bandas en equilibrio de la unión PN. El nivel de Fermi,  $E_f$ , es constante en equilibrio térmico. La deformación de los niveles  $E_c$  y  $E_v$ , y junto con ellos de  $E_f$ , indica que hay un campo eléctrico en sentido de derecha a izquierda en la región de transición, es decir, un campo que va de la región N a la región P.

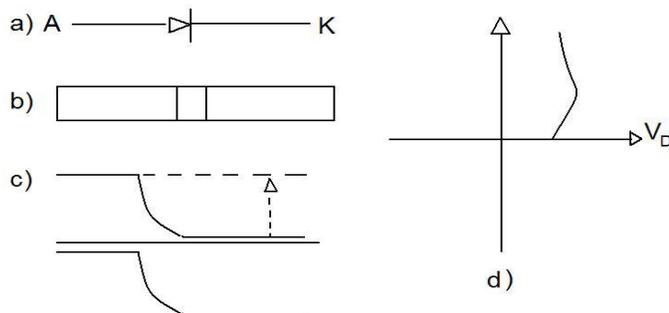


Fig. 3-5 La unión PN: a) Símbolo circuital. b) Estructura física. c) Diagrama de bandas en equilibrio térmico  
d) Características  $I(V)$

Se presentan tres zonas en una unión:

- La zona neutra P en la cual el campo eléctrico es nulo por lo que hay neutralidad de carga.
- La zona de carga espacial (ZCE) en la que el campo eléctrico es fuerte, también denominada región de transición que se origina por un dipolo de carga espacial.
- La zona neutra N. En la zona neutra P la aglomeración de huecos es  $N_A$  y  $n \ll p$ , en tanto que para la región neutra N debemos suponer que  $n = N_D$  y  $p \ll n$ .

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

- Aplicación práctica de los diodos semiconductores:

### *Práctica No.1*

#### *Materiales:*

- Un multímetro digital
- Un diodo OA41 o similar
- Un diodo 1N4148
- Una batería de 9VDC
- Un resistor de  $1000 \Omega$  a  $\frac{1}{2} W$
- Un foco para 9V
- Cinco jumper con caimanes chicos
- Pinza de punta
- Pinza de corte diagonal

#### *Instrucciones:*

- 1) Conecta los dos diodos en paralelo
- 2) Conecta un polo de la fuente a los diodos

- 3) Conecta el otro extremo de los diodos al resistor de  $1000\Omega$
- 4) Conecta el otro extremo de la batería al resistor de  $1000\Omega$
- 5) Conecta los extremos del foco a los extremos del resistor y observa lo que sucede
- 6) Ahora, desconecta la fuente e inviértela, observa lo que sucede
- 7) Conecta el amperímetro en serie, entre un polo de la batería y los diodos en paralelo, observa la lectura
- 8) Invierte la batería y observa la lectura
- 9) Realiza un diagrama de la práctica realizada y anota todas tus observaciones

### 3.4 DIODO RECTIFICADOR

El diodo rectificador es un dispositivo que está considerado como uno de los más sencillos de la familia de los diodos. El nombre diodo rectificador procede de su aplicación, la cual consiste en apartar los ciclos positivos de una señal de corriente alterna.

Un diodo se polariza en forma directa, al suministrarle una tensión de corriente alterna durante los medios ciclos positivos, mediante este procedimiento el diodo permite el paso de la corriente eléctrica en ese sentido. Considerando el tipo de circuito de rectificación, éste puede ser de *media onda* cuando se emplea sólo uno de los dos semiciclos de la corriente, o *de onda completa* cuando se utilizan ambos semiciclos.

#### *Rectificación de media onda*

La figura 3-6 muestra un circuito rectificador de media onda. La fuente de corriente alterna produce una tensión sinusoidal. Suponiendo un diodo ideal, la mitad positiva del ciclo de la tensión de fuente polarizará el diodo en directa. Si el interruptor está cerrado, como se observa en la figura 3-6b, la mitad positiva del ciclo de la tensión de fuente aparecerá a través de la resistencia de carga.

En la otra mitad negativa del ciclo, el diodo se encuentra polarizado en inversa. Por tanto, el diodo aparecerá como un interruptor abierto y no hay tensión a través de la resistencia de carga, como se indica en la figura 3.6c.

La figura 3-7a, muestra una representación gráfica de la forma de onda de la tensión de entrada. Es una onda sinusoidal con un valor instantáneo  $V_{in}$  y un valor de pico de  $V_p$  (in). Una senoide pura la cual tiene un valor medio de cero en ciclo debido a que cada tensión instantánea tiene una tensión igual y opuesta medio ciclo después. Si se mide esta tensión con un voltímetro de continua, se leerá 0 porque un voltímetro de continua indica el valor medio.

En el rectificador de media onda de la figura 3.7b, el diodo está conduciendo durante mitades negativas. En cada ciclo, el circuito recorta las mitades negativas como se muestra en la figura 3-7c. A esto se denomina señal de media onda. Esta tensión de media onda produce una corriente por la carga unidireccional. Esto significa que sólo circula en una dirección.

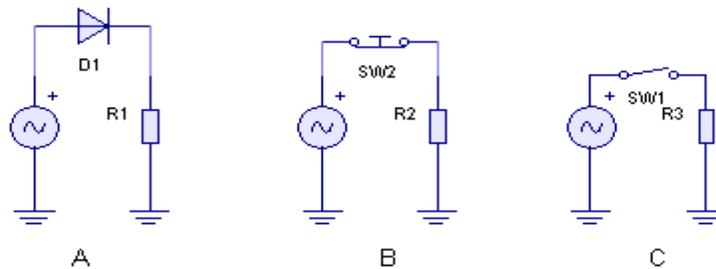


Figura 3-6: a) rectificador ideal de media onda  
 b) en la mitad positiva del ciclo  
 c) en la mitad negativa del ciclo

Una señal de media onda como la figura 3-7c, es una tensión continua pulsante que se incrementa a un máximo, decrece a cero, y después permanece en 0 durante la mitad negativa del ciclo.

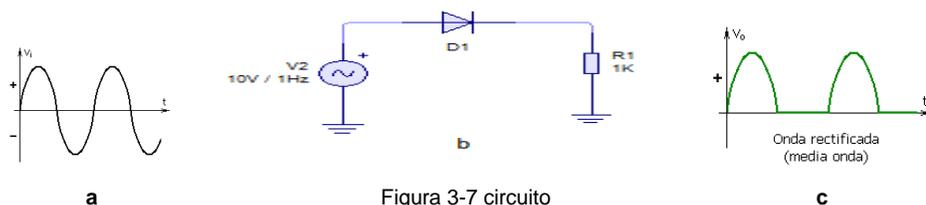


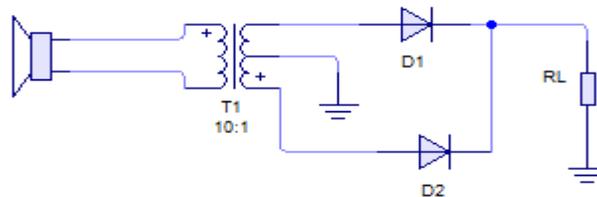
Figura 3-7 circuito

### Rectificación de onda completa

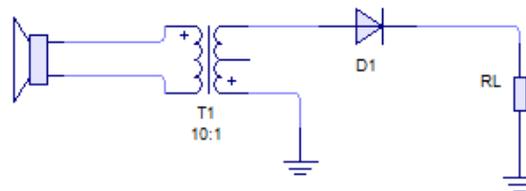
La figura 3-8 muestra un rectificador de onda completa. Observa la conexión intermedia llevada a masa en el arrollamiento secundario. Debido a esta conexión central de circuito es equivalente a dos rectificadores de media onda.

Cada uno de estos rectificadores tiene una tensión de entrada igual a la mitad de la tensión del secundario.  $D_1$  conduce durante el semiciclo positivo y  $D_2$  conduce durante el semiciclo negativo, dando como resultado que la corriente por la carga rectificada circule durante ambos semiciclos. El rectificador de onda completa actúa como dos rectificadores de media onda superpuestos.

En la figura 3-8b se representa el circuito equivalente para el semiciclo positivo. Como se puede observar,  $D_1$  está polarizado en directa. Esto produce una tensión positiva en la carga como se indica por la polaridad (+), (-),  $R_L$ , ( $D_1$ ), y el extremo negativo del transformador T1. La figura 3-8c muestra el circuito equivalente para el semiciclo negativo. Ahora  $D_2$  se encuentra polarizado en directa. El flujo de la corriente es: (+) de T1, ánodo de  $D_2$ ,  $R_L$ , (- de  $R_L$ ), cerrándose en el extremo negativo del transformador T1. Comprobándose también la existencia de una tensión en la carga positiva.



a



b

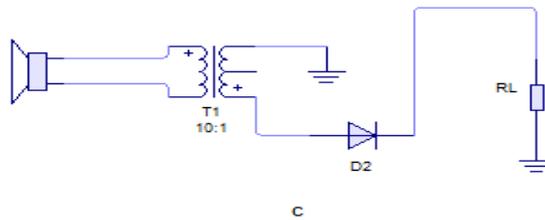


Figura 3-8 a) Rectificador de onda completa  
 b) Circuito equivalente para el semiciclo positivo  
 c) Circuito equivalente para el semiciclo negativo

Durante ambos semiciclos, la tensión en la carga tiene la misma polaridad y la corriente por la carga circula en la misma dirección. El circuito se denomina “rectificador de onda completa” porque ha cambiado la tensión alterna de entrada a una tensión de salida pulsante continua durante los dos semiciclos (figura 3-8d).

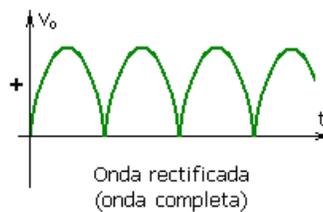


Figura 3-8d

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

### *Práctica No.2*

#### *Funcionamiento de los diodos rectificadores*

##### *Materiales:*

- Un osciloscopio de dos canales
- Cuatro diodos 1N4001
- Un resistor de  $100\Omega$  a  $1/2W$  5% tol.
- Un transformador reductor 120VAC a 12VAC, con centro a 1ª
- 2.5m de cable dúplex del no.14
- Una clavija toma corriente

- Seis jumper con caimán

*Instrucciones:*

- 1) Realiza un circuito rectificador de media onda
- 2) Conecta el circuito rectificador de media onda al secundario del transformador
- 3) Conecta el transformador al contacto de 120 VAC
- 4) Calibra el osciloscopio y aplica las puntas de prueba del canal 1 a los extremos de la resistencia de  $100\Omega$
- 5) Dibuja la forma de onda que se observa en la pantalla
- 6) Ahora, construye un circuito rectificador de onda completa tipo puente con los cuatro diodos, y observa nuevamente con el osciloscopio sobre la resistencia de  $100\Omega$
- 7) Dibuja la forma de onda que se observa en la pantalla del osciloscopio
- 8) Anota tus conclusiones sobre las ondas que se observan en el osciloscopio.

### 3.5 DIODO ZENER

En temas anteriores, se indicó que tanto los diodos rectificadores y los diodos para pequeña señal nunca se emplean intencionalmente en la zona de ruptura, ya que esto podría dañar al diodo, poniéndolo en circuito corto. “Un diodo zener es diferente; se trata de un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en la zona de ruptura”.<sup>13</sup> También denominado diodo de avalancha, el diodo zener es pieza fundamental en un circuito regulador de tensión, ya que éstos son circuitos que conservan constante la tensión aunque se presenten grandes variaciones a la entrada del circuito rectificador o varíe la resistencia de carga (lo que se alimenta, con ese voltaje).

---

<sup>13</sup> Malvino Paul, *Principio de electrónica*, p. 155.

*Gráfica del comportamiento de la corriente debido a la variación del voltaje en un diodo zener*

La figura 3-9a muestra el símbolo de un diodo zener; la figura 3-9b es otra opción. En cualquiera de los dos símbolos, las líneas recuerdan la letra “z”, símbolo de zener. Cambiando el nivel de dopaje de los diodos de silicio, se pueden producir diodos zener con tensiones de ruptura, desde 2 hasta 200V, por lo que este tipo de diodo puede trabajar en cualquiera de las tres zonas, es decir, en la zona directa, en la zona de fuga y en la zona de ruptura:

- La zona de polarización directa de un diodo zener es la misma zona de polarización directa de un diodo rectificador normal.
- La zona de fuga es la zona polarizada entre 0 V y la zona zener, en donde circula únicamente una corriente inversa muy pequeña.
- La zona de ruptura es aquella en la que se realiza el “efecto zener” o “efecto avalancha”, aquí la corriente aumenta bruscamente debido a tensiones inversas, pero una vez que alcanza el valor nominal de su tensión inversa, el voltaje en sus extremos se mantiene constante, cumpliendo con la función de regulador de voltaje.

La figura 3.9c muestra la gráfica I-Y de un diodo zener. Este diodo empieza a conducir en la zona directa, aproximadamente a los 0.7 V, semejante a un diodo normal de silicio. En la zona de fuga (entre 0 y la zona zener), circula únicamente una pequeña corriente inversa. En un diodo zener, la ruptura tiene un doblez muy acentuado acompañado de un incremento casi vertical en la corriente. Observa que la tensión es casi constante, aproximadamente igual a la tensión zener ( $V_z$ ) en la mayor parte de la zona de ruptura.

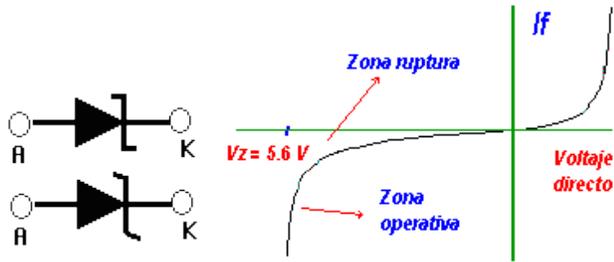
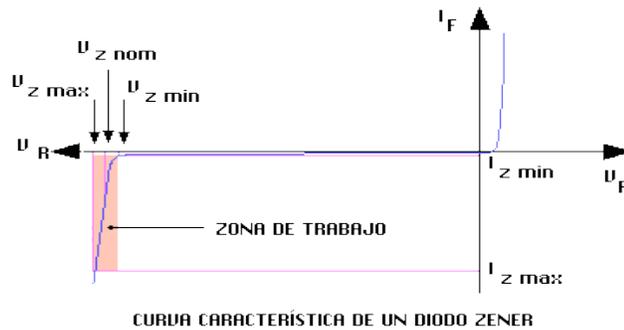


Figura 3.9a Símbolo de un diodo zener.

Figura 3.9b Zona de ruptura.



CURVA CARACTERÍSTICA DE UN DIODO ZENER

Figura 3.9c Zona de trabajo.<sup>14</sup>

La figura 3.9c muestra la máxima corriente inversa  $I_{ZM}$ , pero el diodo funciona siempre dentro de la zona de seguridad, siempre que la corriente inversa sea menor que la corriente inversa  $I_{ZM}$ , por lo tanto, si la corriente se hace mayor que  $I_{ZM}$ , el diodo zener se destruirá.

### Resistencia zener

En la tercera aproximación de un diodo de silicio, la diferencia de potencial directa a través de un diodo es igual a la tensión de umbral más una diferencia de potencial adicional a través de la resistencia interna.

De igual manera, en la zona de ruptura, la tensión inversa a través de un diodo es igual a la diferencia de potencial de ruptura más una tensión adicional a través de la resistencia interna.

La *zona inversa* es conocida como *resistencia zener*, esta resistencia es igual a la inclinación de la curva en la región de ruptura, es decir, cuanto más

<sup>14</sup> <http://www.ifent.org/lecciones/zener/default.asp>

vertical sea la gráfica en la zona de ruptura, el valor de la resistencia zener será menor.

Al analizar la gráfica de la figura 3.9c, se observa que el valor de la resistencia zener es el resultado de que un aumento en la corriente inversa produzca una ligera variación en el voltaje inverso, siendo su valor de décimos de volt.

### Regulador zener

En ocasiones, el diodo zener se denomina diodo regulador de tensión porque mantiene la tensión entre sus terminales constantes aún cuando la corriente sufra cambios. En condiciones normales, el diodo zener debe tener polarización inversa, como se muestra en la figura 3-10a. Esto significa que, para trabajar en la zona zener, la tensión de la fuente  $V_S$  debe ser mayor que la tensión de ruptura  $V_Z$ . Siempre se emplea una resistencia en serie  $R_S$ , para limitar la corriente a un valor menor de su limitación máxima de corriente. De lo contrario, el diodo zener se quemaría, como cualquier dispositivo que disipase excesiva potencia.

En la figura 3-10b se observa una forma alternativa de dibujar el circuito que incluye las masas. Siempre que un circuito tenga una línea de masa, es preferible medir las tensiones de los nudos respecto a masa.

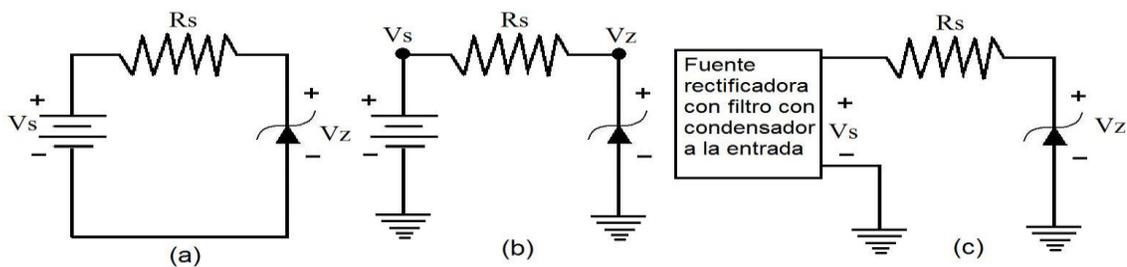


Figura 3-10 Regulador zener

- a) Circuito básico
- b) El mismo circuito con masa

### Fuente de alimentación regulada

En la figura 3-10c se observa la salida de una fuente de alimentación conectada a una resistencia en serie con un diodo zener. Este circuito se aplica cuando se desea una tensión continua de salida menor que la salida de la alimentación.

Este tipo de circuito recibe el nombre de regulador zener de tensión o simplemente regulador zener.

- *Ejemplo 3-1:* Suponga que el diodo zener de la figura 3-11 tiene una tensión de ruptura de 10 v, ¿cuál es la corriente zener máxima y mínima?

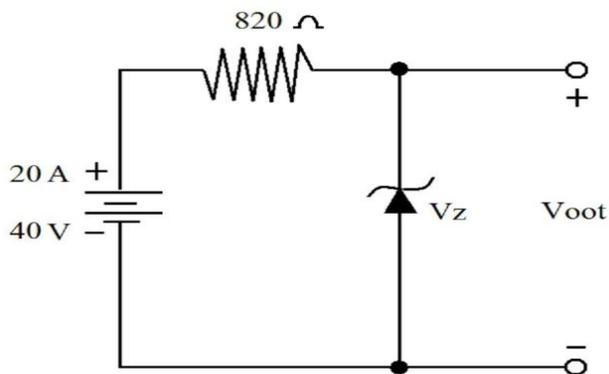


Figura 3-11

*Solución:*

Como la  $I=20\text{ A}$  y  $E=40\text{V}$ ,  $V_z = 10\text{V}$ , la caída de tensión sobre la resistencia de  $820\Omega$  será la diferencia de  $40\text{V}-10\text{V} = 30\text{V}$ . Con este dato, se puede calcular la corriente de salida al aplicar la ley de ohm, al dividir  $30\text{V}$  entre  $820\Omega$ , lo que dará un resultado de  $38,6\text{mA}$ .

$$I_s = \frac{30\text{V}}{820\Omega} = 38,6\text{ mA}$$

De igual forma volvemos a aplicar la ley de ohm, tomando la tensión zener, y al dividir los  $10\text{V}$  entre los  $820\Omega$  de la resistencia, y se obtendrá la corriente mínima de  $12,2\text{ mA}$ .

$$I_s = \frac{10\text{V}}{820\Omega} = 12,2\text{ mA}$$

- *Ejemplo 3-2:* Para la red de diodo zener de la figura 3-12, determina  $V_L$   
 $V_R I_Z P_Z$

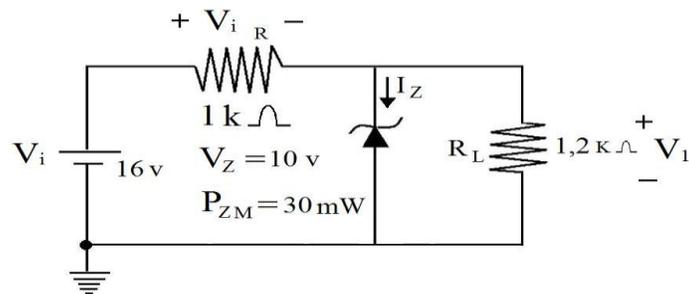


Figura 3-12

*Solución:*

$$V = \frac{R_L V_i}{R + R_L} = \frac{1,2 \text{ K}\Omega (16 \text{ v})}{1 \text{ K}\Omega + 1,2 \text{ K}\Omega} = 8,73 \text{ v}$$

$$V_L = V = 8,73 \text{ v}$$

$$V_R = V_i - V_L = 16 \text{ v} - 8,73 \text{ v} = 7,27 \text{ v}$$

$$I_Z = 0 \text{ A}$$

$$P_Z = V_Z I_Z = V_Z (0 \text{ A}) = 0 \text{ W}$$

- *Ejemplo 3-3:* Determina el rango de valores de  $V_i$  que mantendrá el diodo zener de la figura 3-13 en estado “encendido”

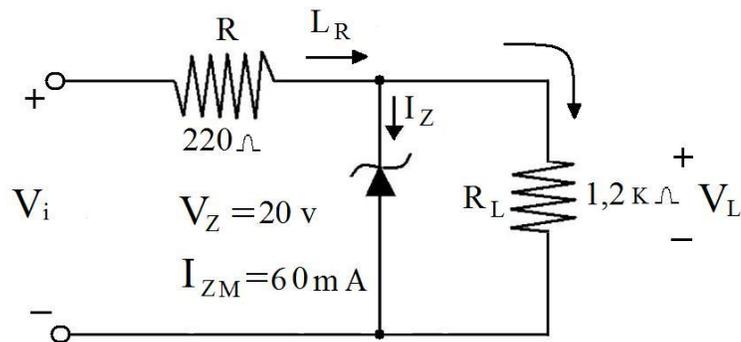


Figura 3-13

Solución:

$$V_{\text{max}} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L} \text{ V} = \frac{(1200\Omega + 220\Omega)(20\text{v})}{1200\Omega} = 23,67 \text{ v}$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20\text{v}}{1,2\text{k}\Omega} = 16,67 \text{ mA}$$

$$I_{R_{\text{max}}} = I_{z_{\text{m}}} + I_L = 60 \text{ mA} + 16,67 \text{ mA} = 76,67 \text{ mA}$$

$$V_{L_{\text{max}}} = I_{R_{\text{max}}} R + V_Z = (76,67 \text{ mA})(0,22\text{k}\Omega) + 20\text{v} = 16,87\text{v} + 20 \text{ v} = 36,87 \text{ v}$$

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

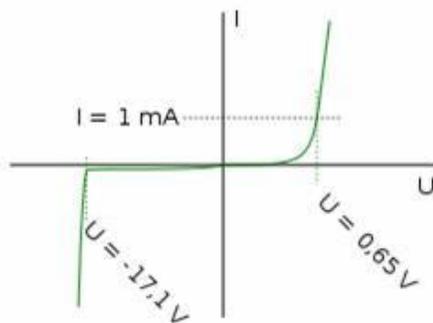
### Práctica No.3

#### Uso y conexión del diodo zener

Instrucciones:

- 1) En el circuito rectificador de media onda de la figura 3.8b instala un diodo zener para 5 volts en paralelo a la  $R_L$  y con el multímetro digital toma la lectura.
- 2) Ahora, utiliza un transformador que en el secundario proporcione 12VAC, y después de conectarlo, toma la lectura nuevamente sobre el diodo zener.
- 3) Dibuja el circuito y resume los resultados obtenidos en ambos casos.

Grafica del diodo



Símbolo Zener



Representación en circuito

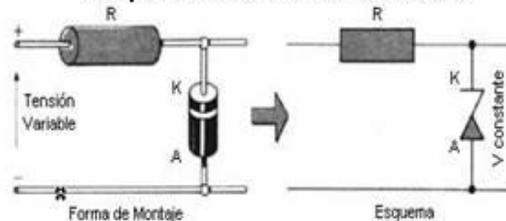


Figura 3-14

### 3.6 DIODO SCHOTTKY

“A medida que la frecuencia crece, el funcionamiento de los diodos rectificadores de pequeña señal empieza a deteriorarse”.<sup>15</sup> Ya no son capaces de conmutar lo suficientemente rápido como para producir una señal de media onda bien detallada. El remedio a este problema es el diodo schottky. A diferencia del diodo semiconductor normal que tiene una unión PN, el diodo schottky tiene una unión metal N. Estos diodos se caracterizan por su velocidad de conmutación, y una baja caída de tensión cuando están polarizados en directo (0,25 voltios a 0,4 voltios).

El diodo schottky se aproxima más al diodo ideal que el diodo semiconductor común, pero tiene algunas características que imposibilitan su uso en circuitos electrónicos de potencia. Estas características son:

- Limitada capacidad de conducción de corriente hacia adelante, en sentido de la flecha de su símbolo.
- No admite grandes voltajes de polarización inversa.
- Tiene gran utilidad en circuitos de alta velocidad como los que se utilizan en las computadoras donde se requieren grandes velocidades de conmutación.
- Poca caída de voltaje en directo.
- Bajo consumo de energía.

En la figura 3-15 se observa la simbología del diodo schottky.

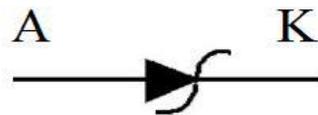


Figura 3-15 Símbolo del diodo schottky

Cuando este tipo de diodo funciona en modo directo, la corriente electrónica que circula por él se debe a los electrones que viajan desde el cristal

---

<sup>15</sup> Malvino Paul, *op. cit.*, p. 185

tipo N a través del metal; el tiempo en que se recombinan es muy corto, del orden de  $10^{-12}$  segundos.

### 3.7 DIODO TÚNEL

Incrementando el nivel de dopaje de un diodo opuesto, se puede hacer que la ruptura se produzca a los 0V. Además, el dopaje más fuerte distorsiona la curva de polarización directa; la figura 3-16b representa el símbolo esquemático para un diodo túnel.

En este tipo de diodos se presenta un fenómeno conocido como resistencia negativa. Esto significa que un aumento de la tensión de polarización directa produce una disminución en la corriente directa al menos en la parte de la curva entre  $V_P$  y  $V_V$ . Esta resistencia negativa de los diodos túnel es útil en determinados circuitos de alta frecuencia denominados osciladores. Estos circuitos pueden generar una señal sinusoidal semejante a la producida por un generador de alterna. Pero a diferencia del generador de alterna, que convierte energía mecánica en una señal sinusoidal, un oscilador transforma

energía en una señal sinusoidal.

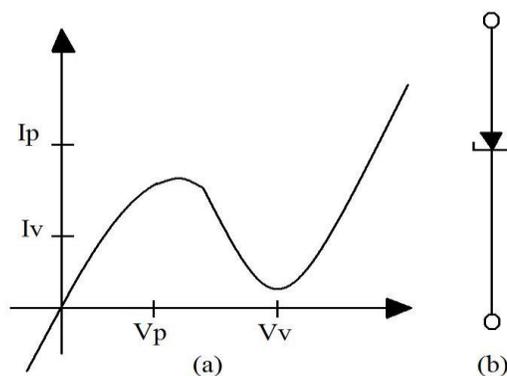


Figura 3-16 Diodo túnel

- a) La ruptura ocurre a 0V
- b) Símbolo esquemático

Para las aplicaciones prácticas del diodo túnel, la parte más interesante de su curva característica es la comprendida entre la cresta y el valle.

De igual manera, este diodo presenta una propiedad peculiar que se manifiesta inmediatamente al observar su curva característica (figura 3.16a). Con respecto a la corriente, en sentido de bloqueo se comporta como un diodo normal, pero en el sentido de paso tiene algunas variaciones según la diferencia de potencial a la cual se expone. La intensidad de la corriente aumenta

rápidamente al principio con muy poco valor de tensión hasta llegar a la cresta en donde, al recibir mayor tensión se origina una pérdida de intensidad, hasta que aumenta nuevamente cuando se sobrepasa toda esta zona del valor de la diferencia de potencial.

### 3.8 FOTODIODO

Este tipo de diodo es muy parecido a un diodo semiconductor común, aunque tiene una propiedad que lo distingue: es un material que conduce una cantidad de corriente eléctrica proporcional a la cantidad de luz que incide sobre él, la cual circula en sentido opuesto a la flecha del diodo y se denomina *corriente de fuga*.

Este dispositivo se puede utilizar como detector de luz, pues es capaz de transformar la luz que incide sobre él en corriente eléctrica, esta alteración de energía eléctrica se emplea para indicar que hubo un cambio en el nivel de iluminación que incide sobre el fotodiodo.

Cuando este dispositivo se conecta de forma que la corriente circule a través de él en el sentido de la flecha, es decir, polarizado directamente, la luz que incide sobre él no produce ninguna alteración, comportándose como un diodo semiconductor normal.

La mayoría de estos semiconductores están equipados con una lente de aumento para concentrar la energía lumínica que incide sobre estos dispositivos, para hacer más notable su reacción a la luz.

De forma contraria a la operación de una fotorresistencia (LDR), la velocidad de respuesta del fotodiodo a los cambios de oscuridad e iluminación, y viceversa, es mucho más rápida, por ello se puede emplear en circuitos con tiempo de respuesta más bajo.

La figura 3-17 muestra el símbolo de un fotodiodo. Las flechas representan la luz incidente. Es importante recordar que la fuente y la resistencia en serie polarizan inversamente el fotodiodo. A medida que la luz se hace más intensa, la corriente inversa aumenta.

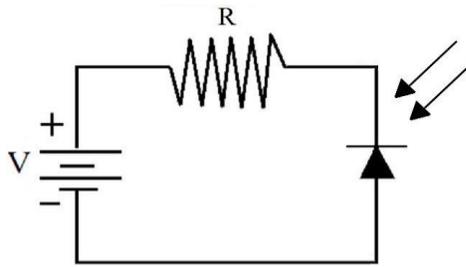


Figura 3-17 La luz incidente incrementa la corriente inversa en el fotodiodo.

Aprovechando las características del fotodiodo, se puede utilizar en forma combinada con un transistor bipolar, conectando el fotodiodo entre el colector y la base del transistor, con el cátodo del diodo dirigido al colector del transistor, obteniendo un circuito equivalente al de un fototransistor.

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

### *Práctica No.4*

#### *Prueba de funcionamiento de un fotodiodo*

#### *Materiales:*

- Batería de 9VDC
- Resistor de  $1000\Omega$   $\frac{1}{4}$  W, 5% de tolerancia
- Un LDR (fotodiodo)
- Multímetro digital
- Tres jumper con caimanes en los extremos

#### *Instrucciones:*

- 1) Conecta la batería con el resistor y el fotodiodo en serie
- 2) Mide la tensión sobre los extremos del resistor R
- 3) Tapa el fotodiodo con una franela y mide nuevamente el voltaje sobre la resistencia R
- 4) Dibuja el diagrama
- 5) Anota tus conclusiones

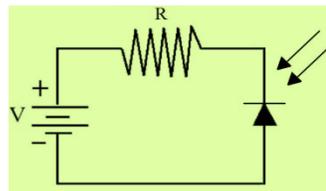


Figura 3-18

## AUTOEVALUACIÓN

•  
*Completa los siguientes enunciados:*

- 1.- Una unión \_\_\_\_ es un cristal semiconductor único, con una región \_\_\_\_\_ con impurezas aceptadoras y otra con impurezas donadoras.
- 2.- Si se aplica al diodo una tensión de corriente alterna durante los medios ciclos positivos, se polariza en forma \_\_\_\_\_.
- 3.- Un diodo tiene polarización \_\_\_\_\_ cuando sea establecido la asociación tipo “p” y positivo y tipo “n” y negativo.
- 4.- La \_\_\_\_\_ es igual a la pendiente en la región de ruptura.
- 5.- La resistencia zener significa que un \_\_\_\_\_ en la corriente inversa producirá un ligero aumento en la \_\_\_\_\_.
- 6.- La combinación de un fotodiodo con un transistor bipolar logra un circuito equivalente denominado \_\_\_\_\_.

*Subraya la respuesta correcta:*

- 1.- Está considerado como uno de los más sencillos de la familia de los diodos:
  - a) Diodo túnel
  - b) Diodo rectificador
  - c) Diodo zener
  - d) Diodo schottky

2.- Es un diodo de silicio que se ha construido para que funcione en la zona de ruptura:

- a) Diodo túnel
- b) Diodo rectificador
- c) Diodo zener
- d) Diodo schottky

3.- Estos diodos se caracterizan por su velocidad de conmutación y una baja caída de tensión cuando están polarizados en directa (0,25 voltios a 0,4 voltios):

- a) Diodo túnel
- b) Diodo rectificador
- c) Diodo zener
- d) Diodo schottky

4.- En este tipo de diodo se presenta un fenómeno conocido como resistencia negativa:

- a) Diodo túnel
- b) Diodo rectificador
- c) Diodo zener
- d) Diodo schottky

## RESPUESTAS

1. PN, dopada
2. Directa
3. Directa
4. Resistencia zener
5. Aumento, tensión inversa
6. Fototransistor

### *Opción múltiple:*

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

## UNIDAD 4

### TRANSISTORES BJT Y JFET

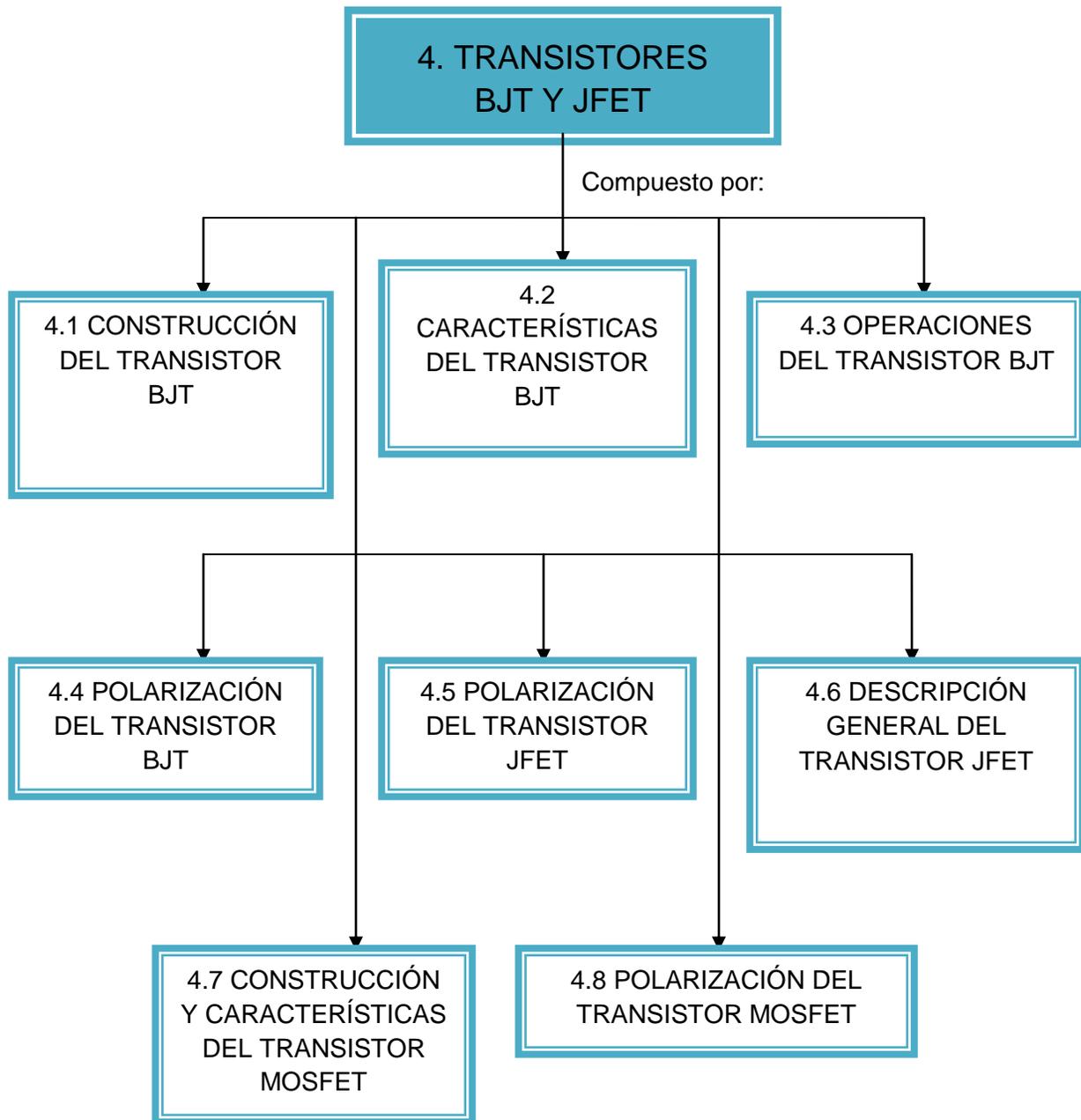
#### OBJETIVO

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.

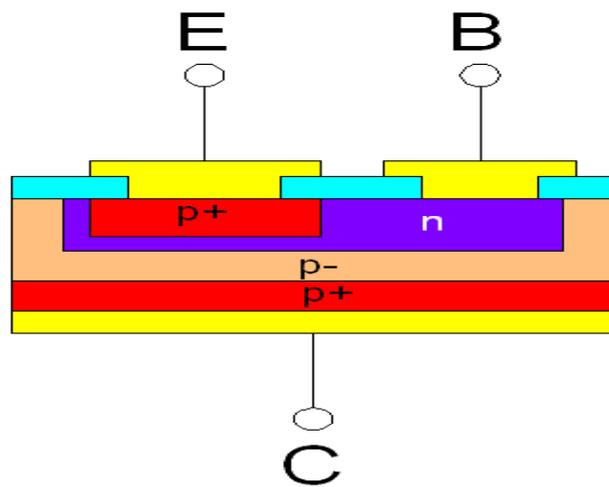


Figura 4-1 Estructura de un transistor bipolar<sup>16</sup>

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

<sup>16</sup> <http://es.wikipedia.org>

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

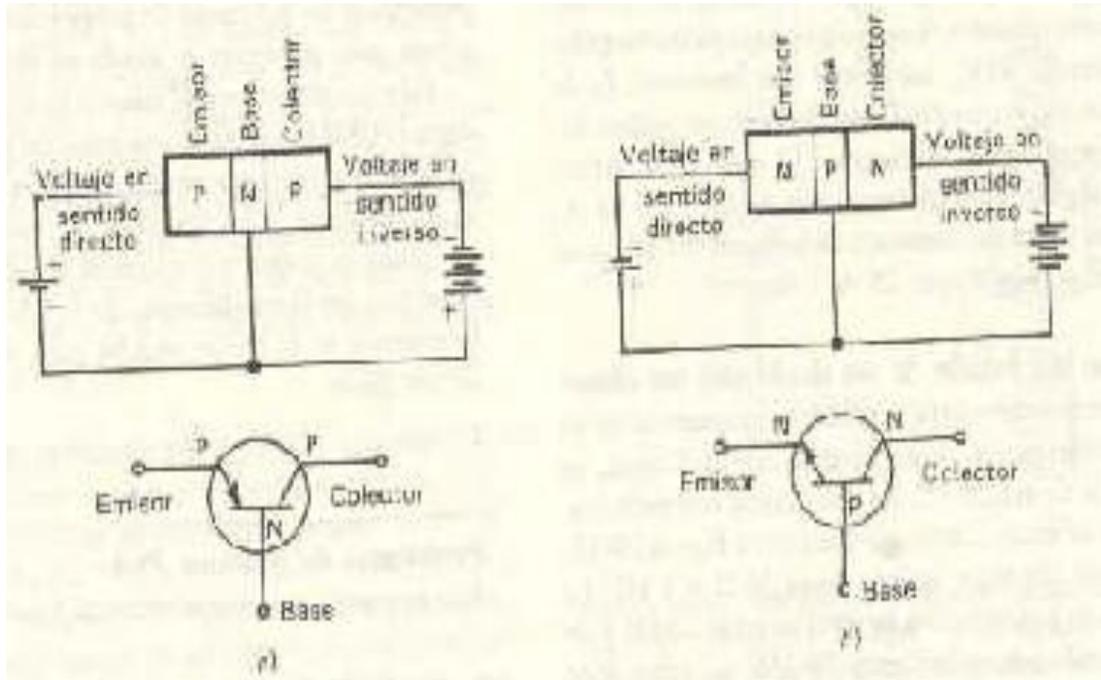


Figura 4-2. Tipos de transistores y su respectiva polarización en región activa a) PNP, b) NPN

#### 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.

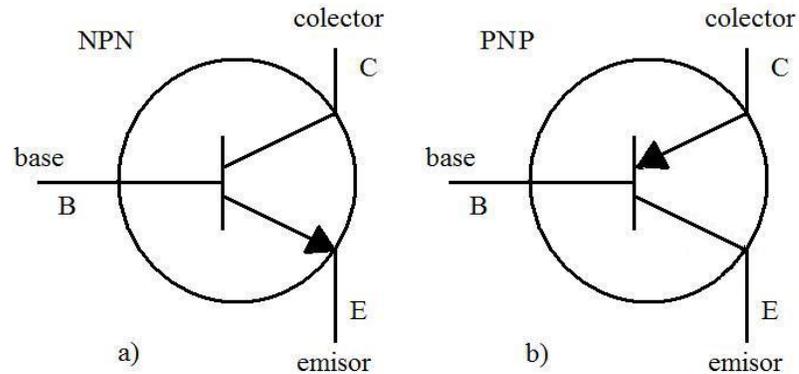


Figura 4-3 Símbolos del transistor bipolar:  
a) transistor NPN b) transistor PNP

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).

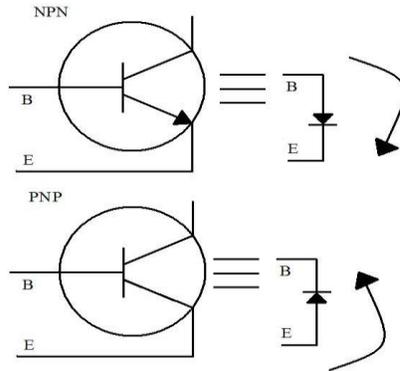


Figura 4-4 Representación simbólica de transistores NPN y PNP

### 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.

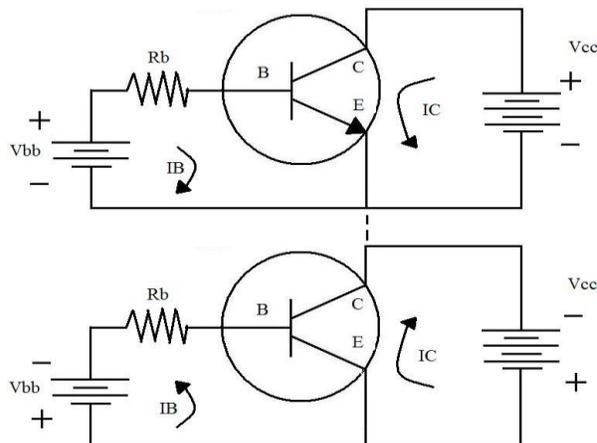


Figura 4-5 Circuitos de entrada y salida

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  $I_E$ .

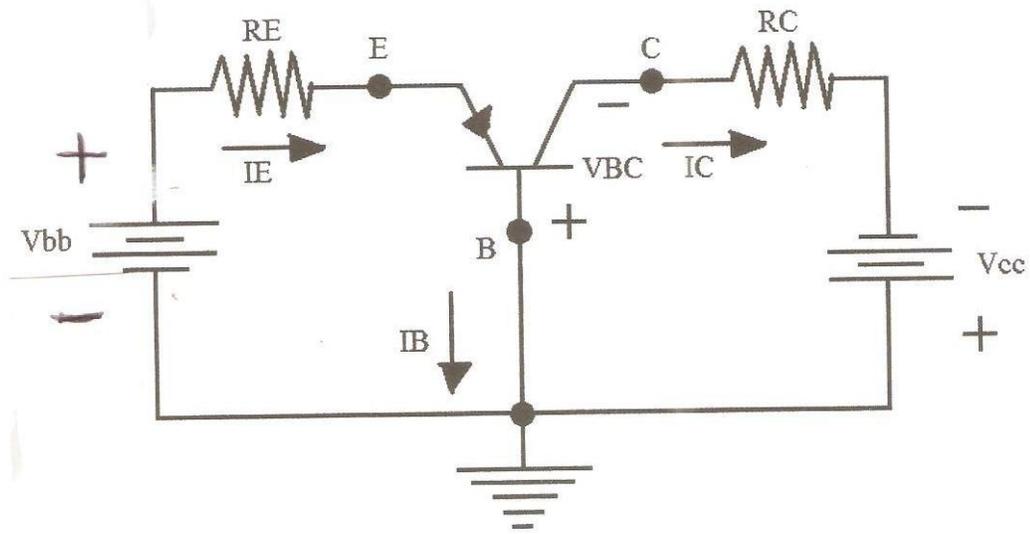


Figura 4-6. Circuito amplificador de base común con transistor PNP

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  $I_E$ .

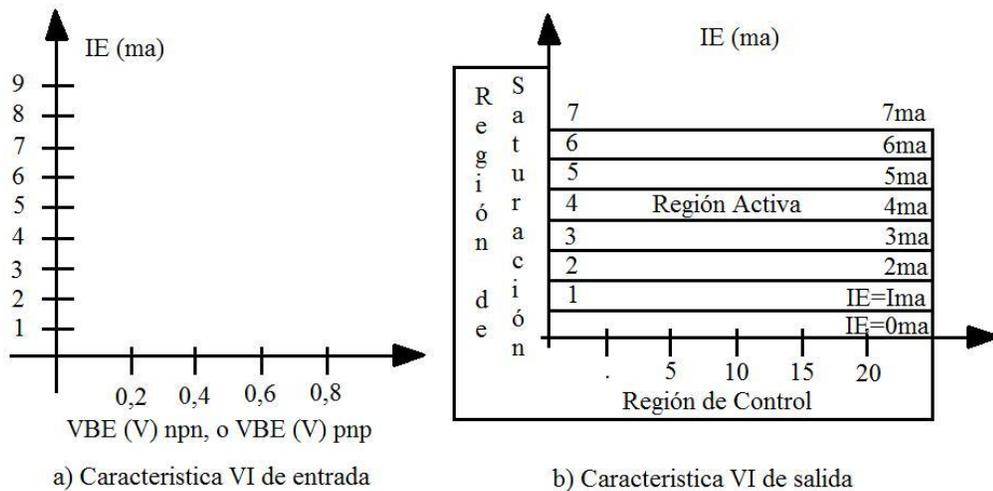


Figura 4-7 Características corriente-voltaje del transistor en configuración base común.

## 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  $\Omega$
- Resistor de 180 K $\Omega$
- 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 $\Omega$  y el colector con el resistor de 2200  $\Omega$ .

- 1) Conecta el emisor al negativo de la batería de 12 V
- 2) Conecta el colector a la resistencia de 2200  $\Omega$
- 3) Conecta la base a la resistencia de 180 K $\Omega$
- 4) Conecta el amperímetro entre el positivo de la batería de 12 V y el otro extremo de la resistencia de 180K $\Omega$
- 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”

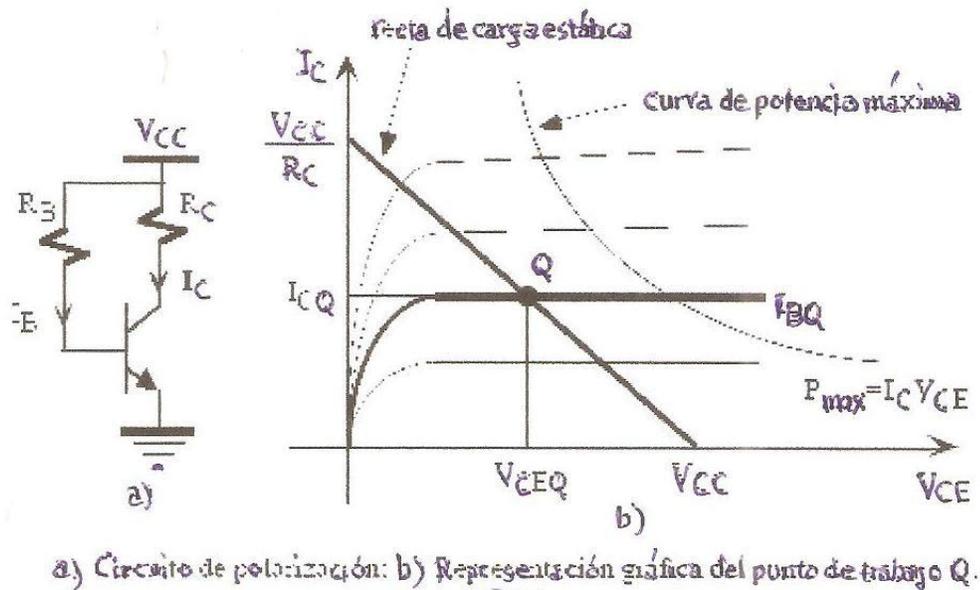


Figura 4-8 Punto de trabajo Q de un transistor bipolar

### 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”.<sup>17</sup> 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

<sup>17</sup> 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.

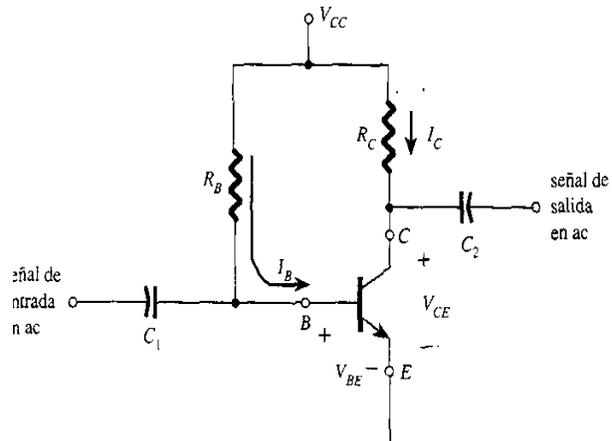


Figura 4-9 Circuito de polarización fija

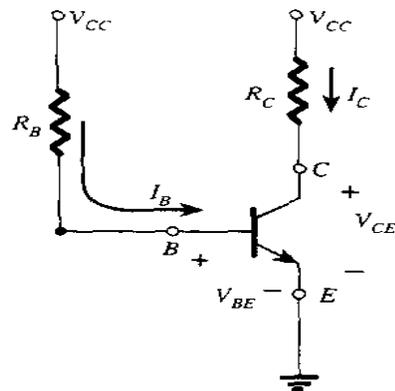


Figura 4-10 Equivalentes de DC

### *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.

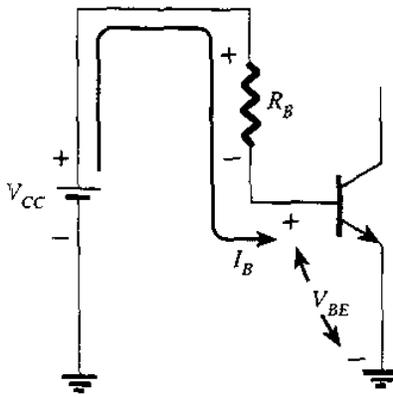


Figura 4-11 Malla base-emisor

#### *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.

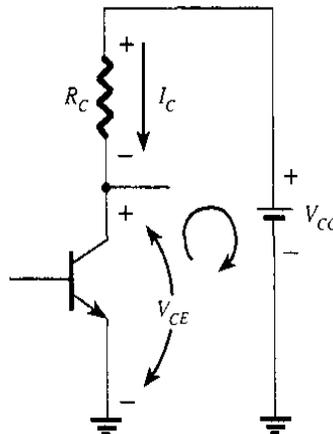


Figura 4-12 Malla colector-emisor

$$I_C = \beta I_B$$

(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” ( $\alpha$ ) y “beta” ( $\beta$ ).

- Alfa ( $\alpha$ ) 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 ( $\beta$ ) 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*

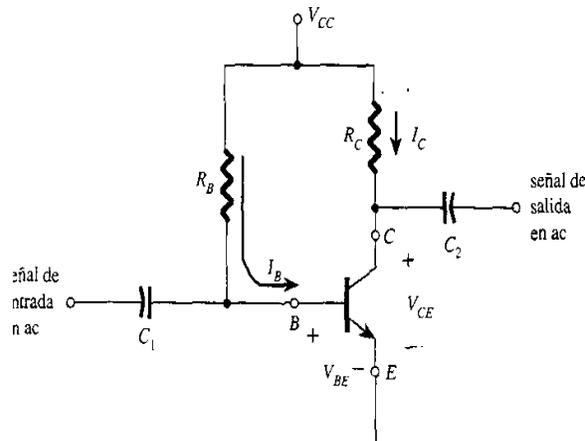


Figura 4-13

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:*

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

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

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

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

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 ( $\beta$ ) del transistor. Sin embargo, debido a que  $\beta$  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.

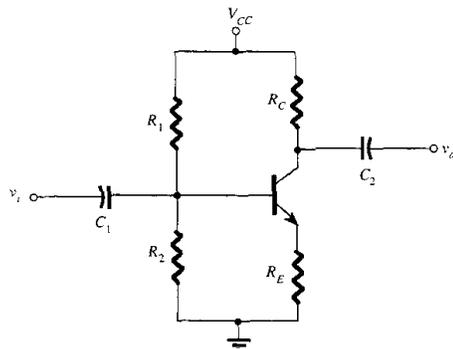


Fig. 4-14 Configuración de polarización por división de voltaje.

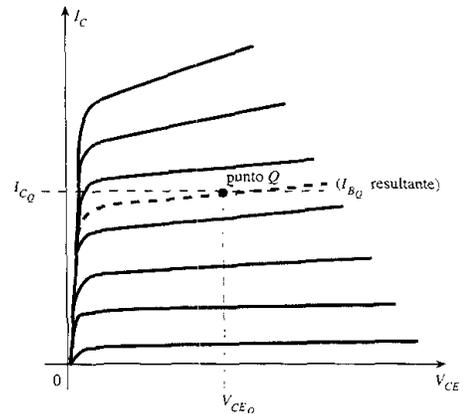


Fig. 4-15 Definición del punto Q para la configuración por divisor de voltaje.

### 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:

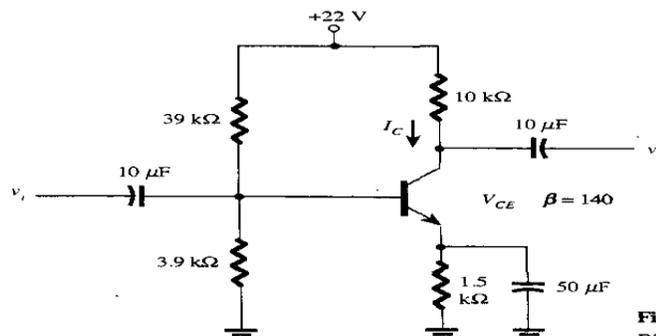


Figura 4-16 Circuito para beta estabilizada

### 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.

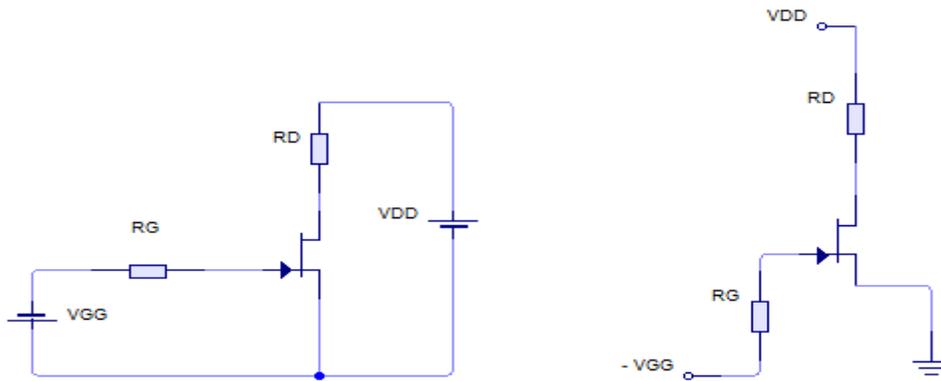


Figura 4.17. Polarización fija

*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

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

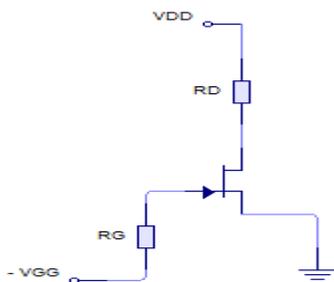
De la ecuación (2) despejamos la corriente de drenador-source y obtenemos:

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

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*.

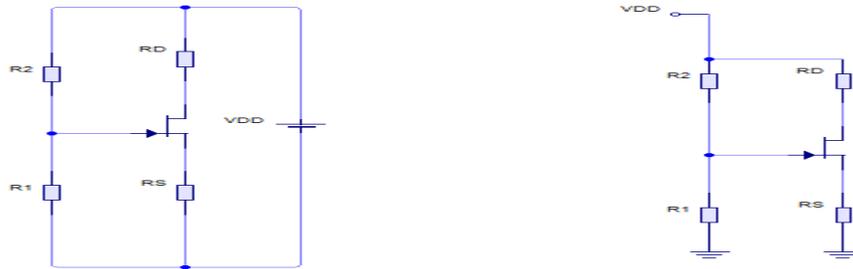


Figura 4-19 Polarizaciones por división de voltaje

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

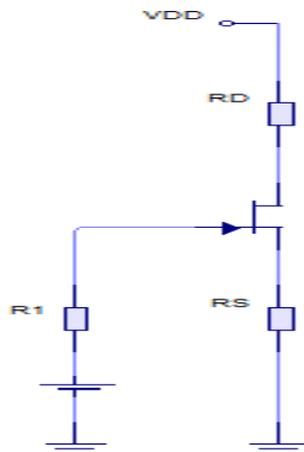


Figura 4-20 Equivalente de Thevenin

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:

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

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

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

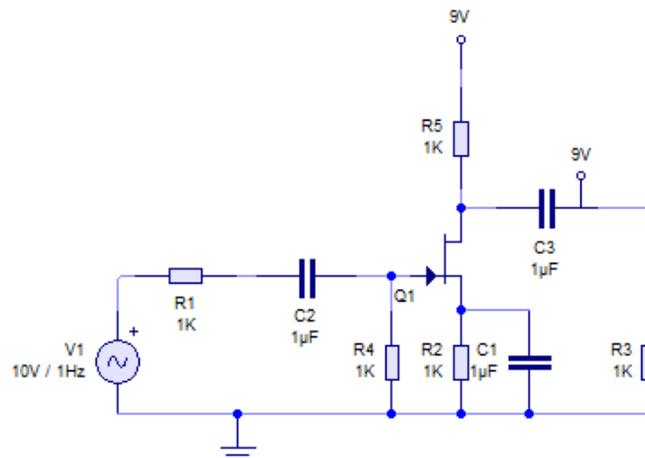
### Punto de polarización y ganancia de un circuito con transistor JFET

#### 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:

- a) Construye un circuito como el que se muestra
- b) Mide el punto de polarización
- c) Cambia la fuente de alimentación
- d) Mide nuevamente el punto de polarización
- e) Inyecta una señal de 10V a 1KHz
- f) 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”.<sup>18</sup> 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).

---

<sup>18</sup> Malvino Paul, *Principios de electrónica*, p. 451.

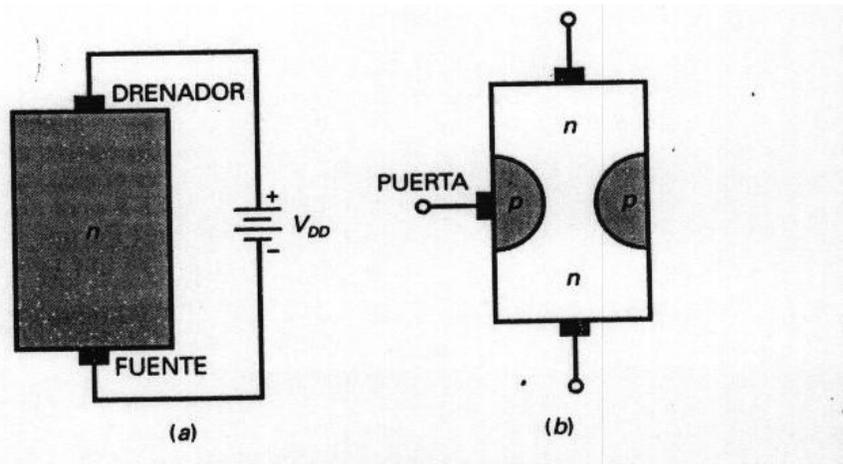


Figura 4-21 a) Parte del JFET; b) JFET de puerta única

### *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.

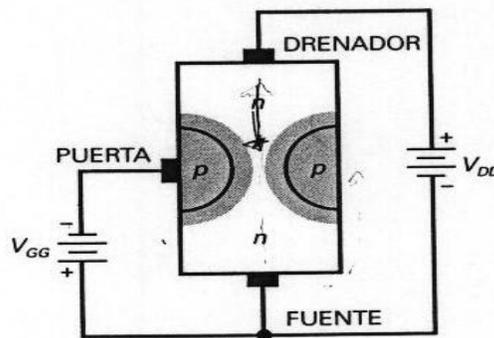


Figura 4-22 Polarización normal del JFET

### *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.

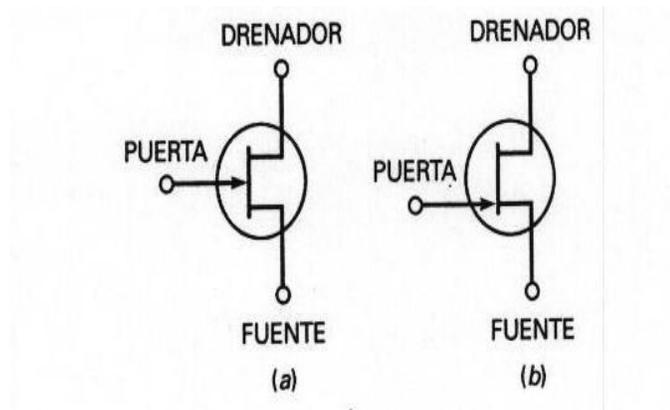


Figura 4-23 a) Símbolo eléctrico b) Símbolo con puerta desplazada

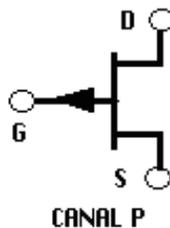


Figura 4-23c

#### 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”.<sup>19</sup> 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.

---

<sup>19</sup> Malvino Paul, *op. cit.*, p. 503.

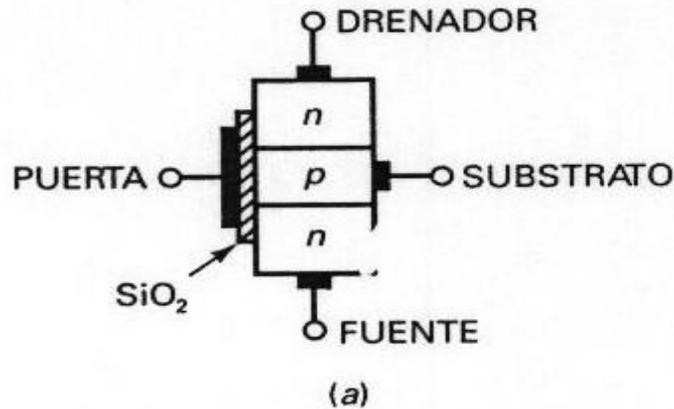


Figura 4-24 MOSFET de empobrecimiento.

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.

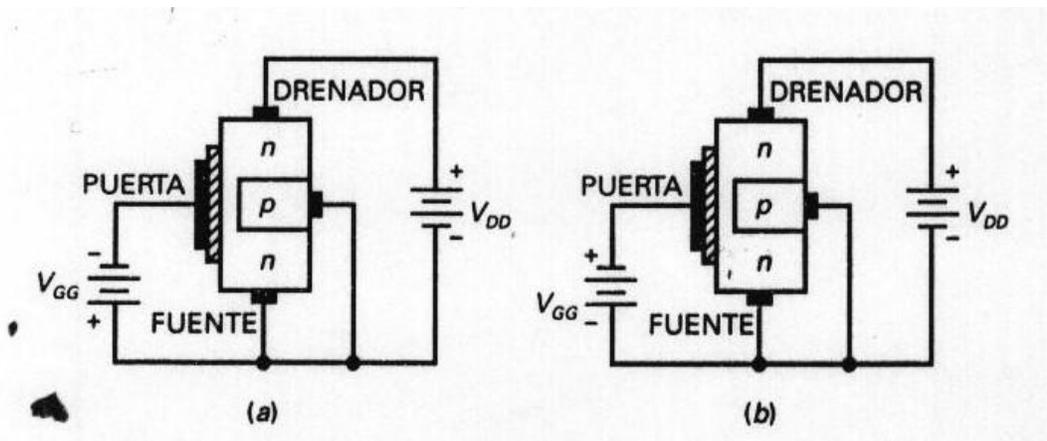


Figura 4-25a MOSFET de empobrecimiento con puerta negativa

### 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.

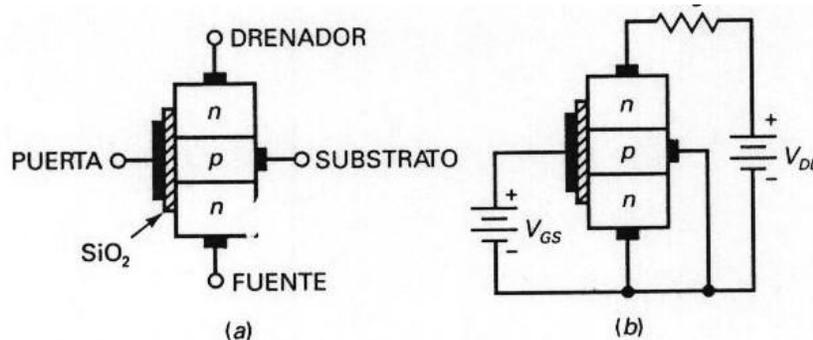


Figura 4.26 MOSFET de enriquecimiento a) No polarizado b) Polarizado

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.

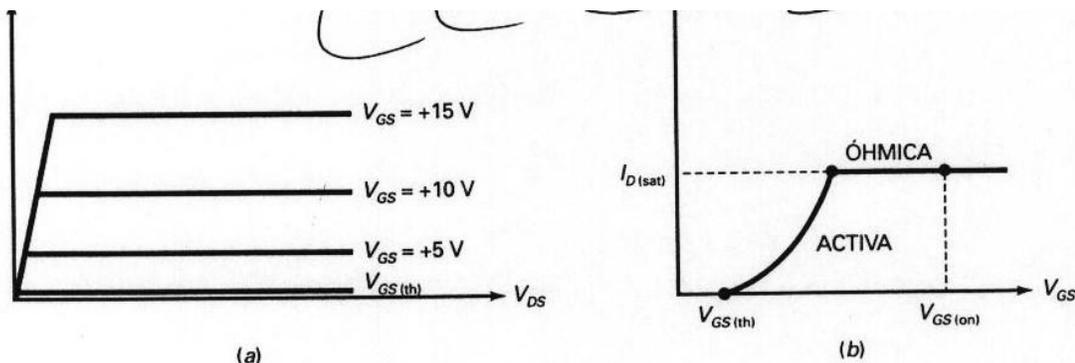


Figura 4-27 Gráfica de MOS de enriquecimiento a) Características de salida b) Características de transferencia

### 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.

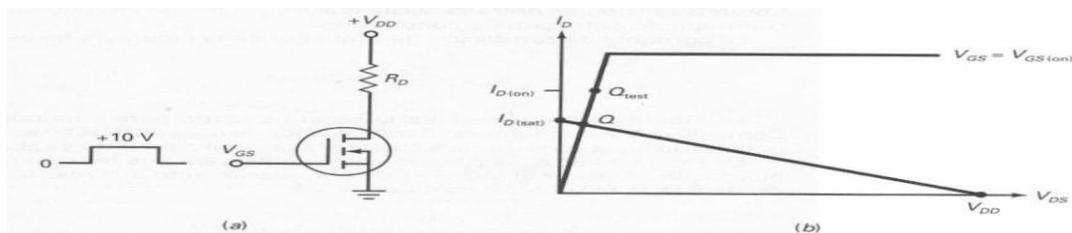


Figura 4-28  $I_{D(sat)}$  menor que  $I_{D(on)}$

Ejemplo 4-5

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

Solución:

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

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

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

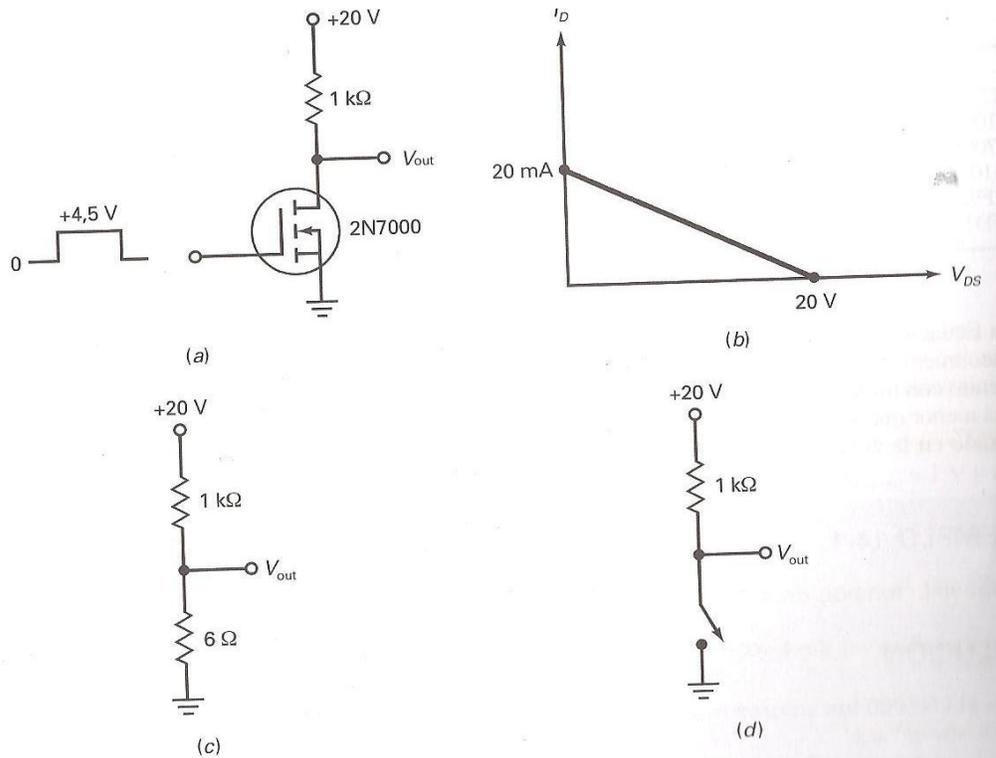


Figura 4-29a Conmutación entre corte y saturación

# 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

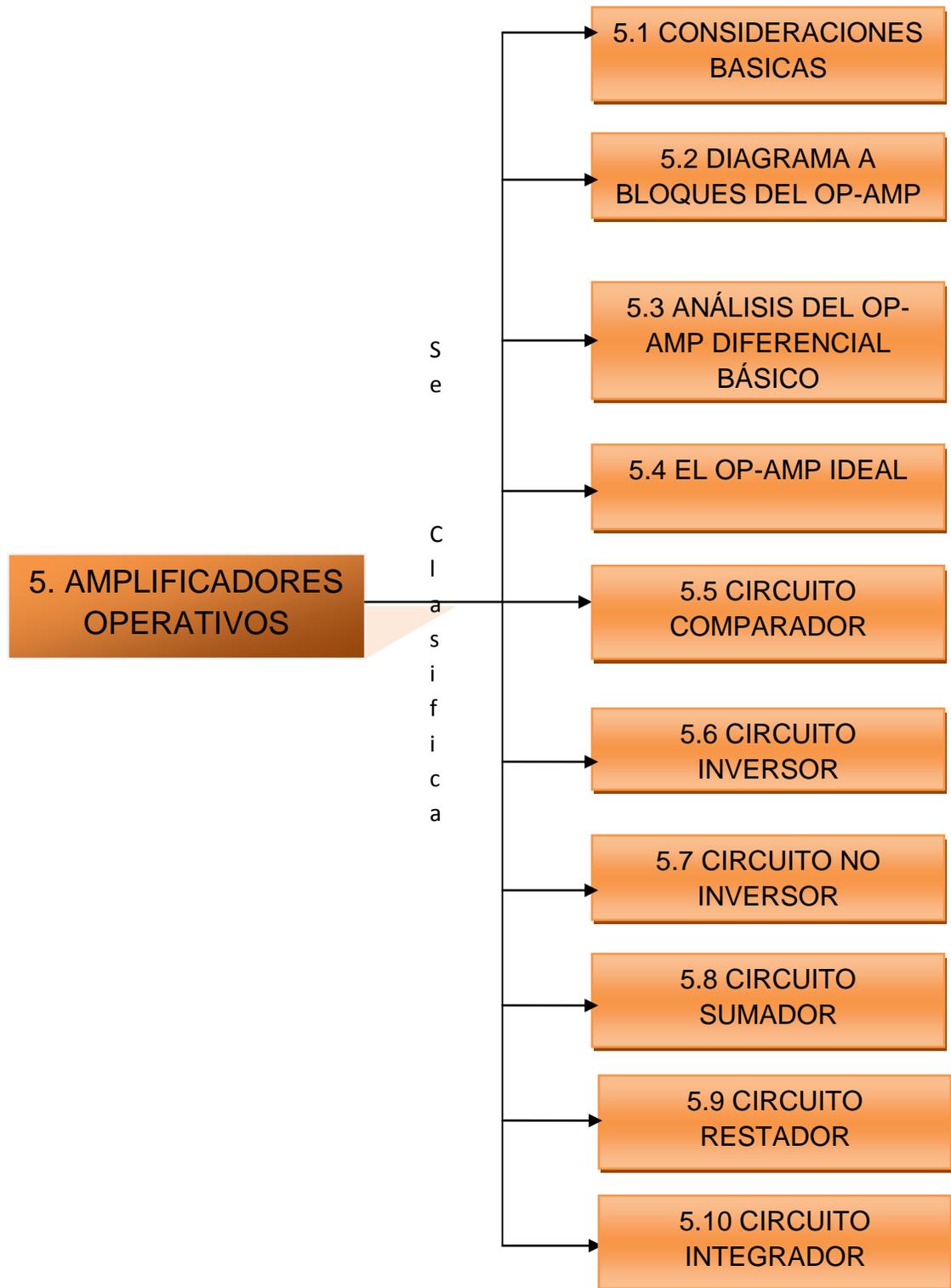
#### OBJETIVO

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.

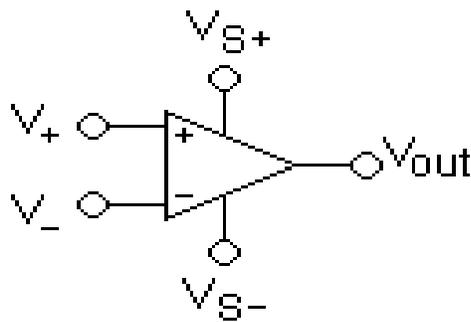


Figura 5-1a. Diagrama eléctrico del amplificador operacional.

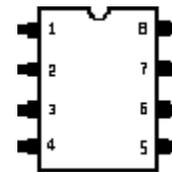


Figura 5.1b

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.

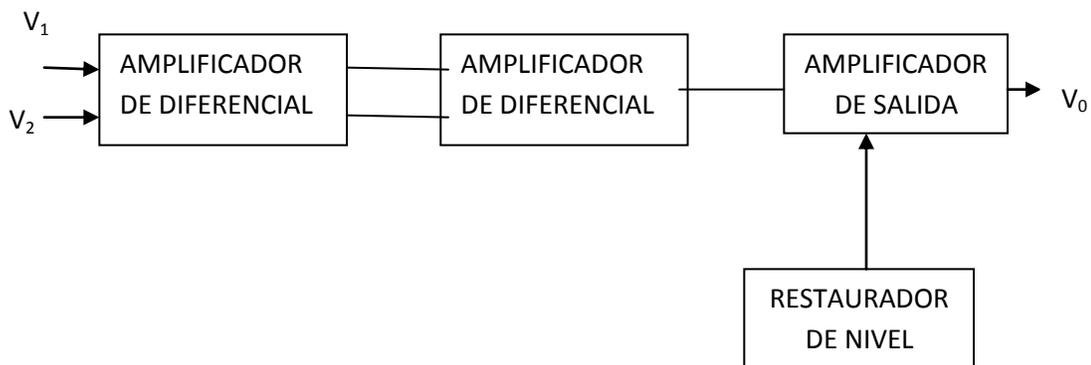


Figura 5-2 Diagrama a bloques de un amplificador operacional

## 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.

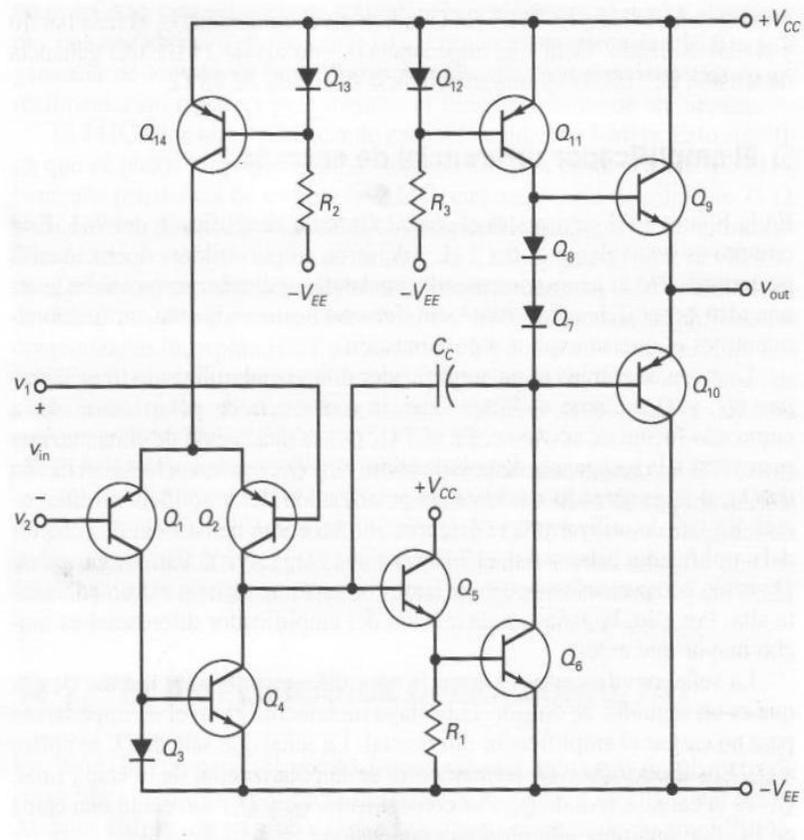


Figura 5-3 Circuito interno simplificado de un 741

### 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 $\Omega$
- 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:  $\pm 18$  V
- Tensión máxima de entrada:  $\pm 13$  V
- Tensión máxima de salida:  $\pm 14$  V
- Relación de rechazo de modo común RRMC: 90 dB

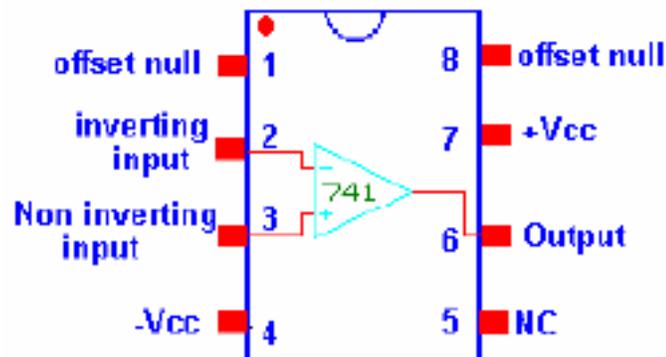


Figura 5-4 Presentación comercial de un amplificador operacional 741

#### 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.

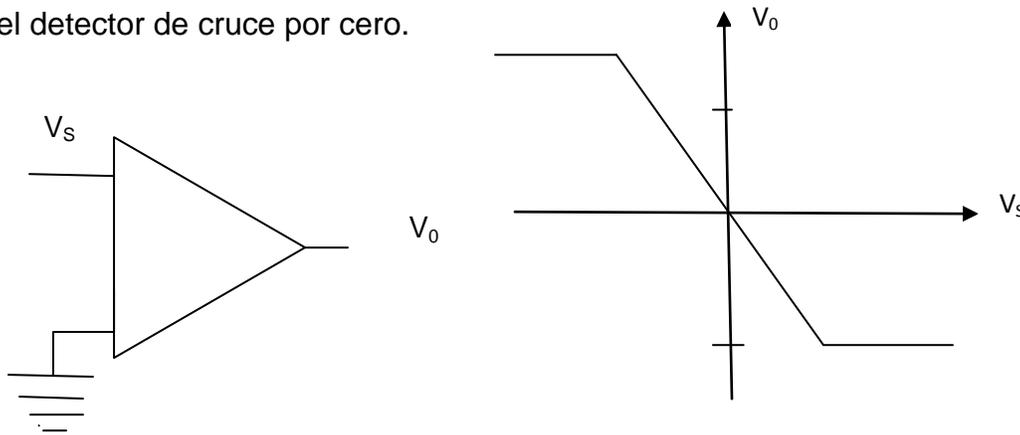


Figura 5-5 a) Diagrama del detector de cruce por cero

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 cómo 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).<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Coughlin, Robert F., *Amplificadores operacionales*, p. 87.

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

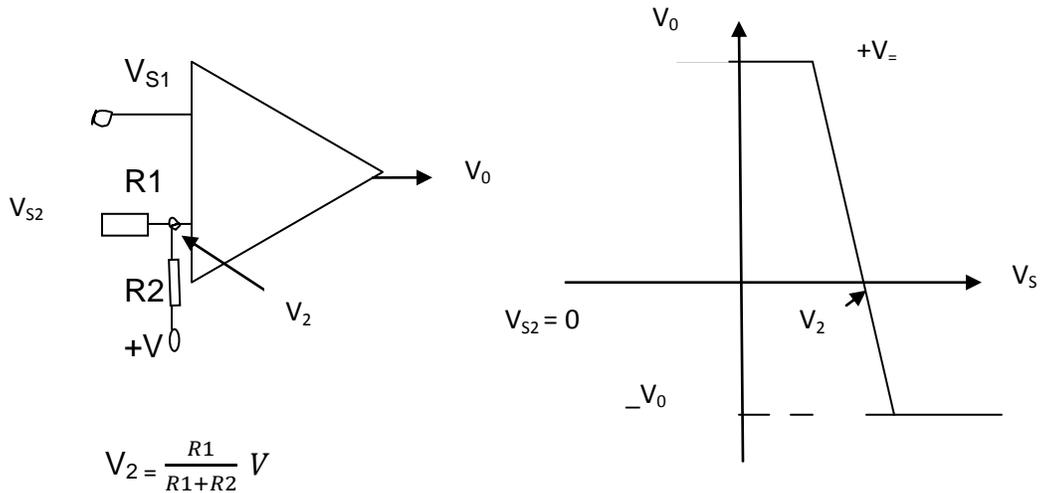


Figura 5-6 a) Diagrama de un comparador de voltaje con referencia positiva.

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:

$$I_1 = \frac{V_{in}}{R_3} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Pero: } I_1 = I_2 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Tambi3n: } \frac{-V_{out}}{R_2} = \frac{V_{in}}{R_3} \dots \dots (4)$$

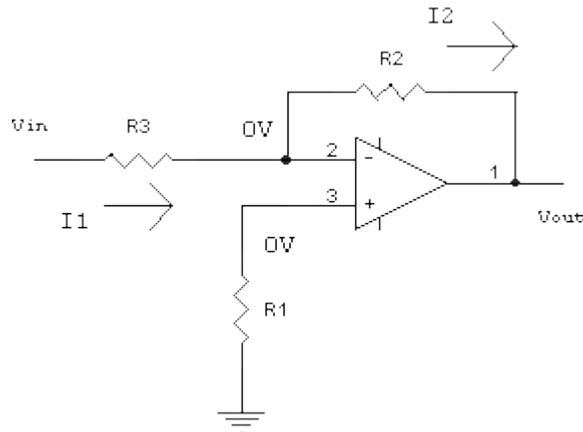


Figura 5-7 Circuito inversor

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

### Pr3ctica No. 9

#### Amplificador inversor

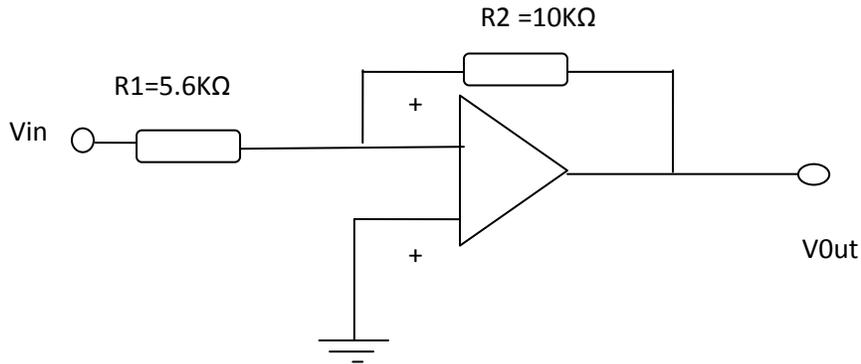
#### Material es:

- 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.

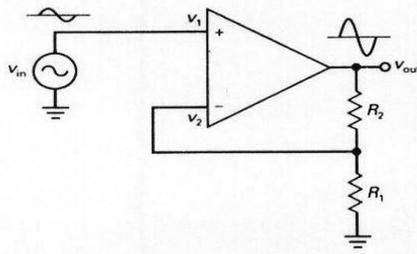


Figura 5-8 Amplificador no inversor

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.

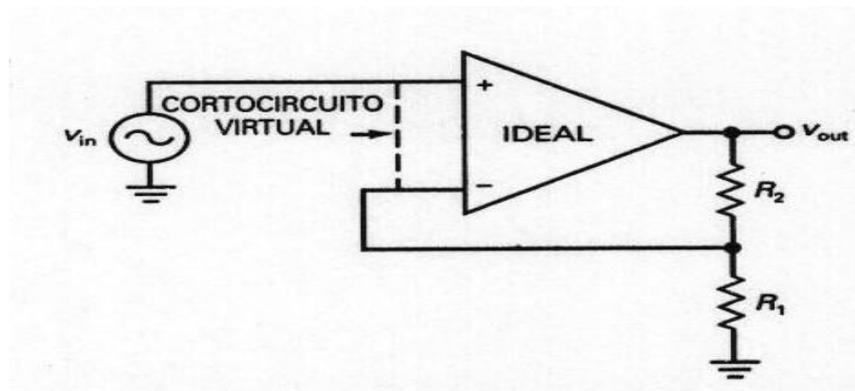


Figura 5-9 Cortocircuito virtual

# ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

## Práctica No. 10

### Amplificador no inversor

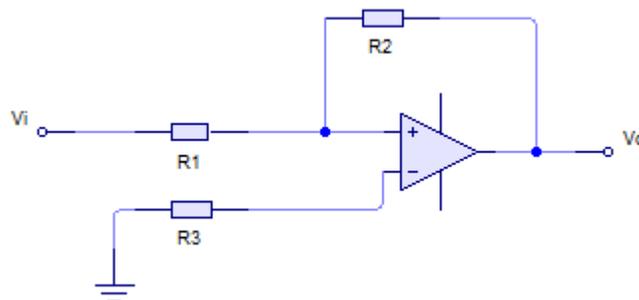
#### Materiales:

- 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.

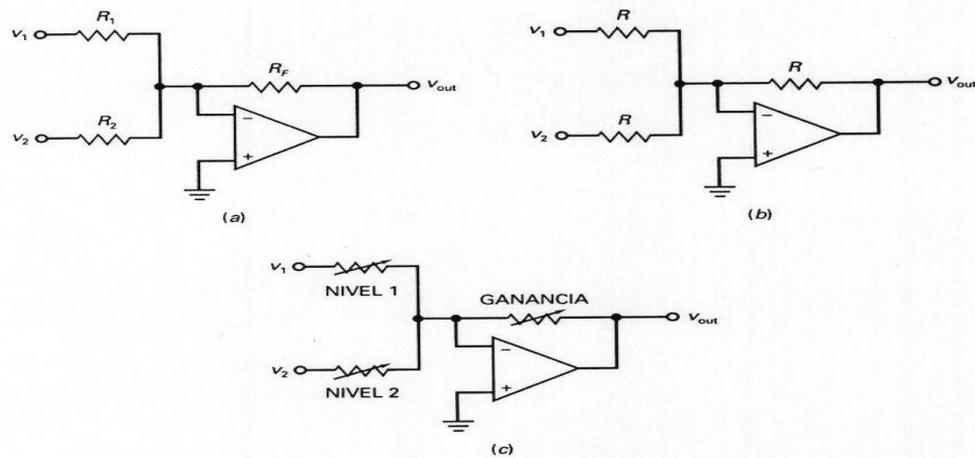


Figura 5-10 Amplificador sumador

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:

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

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

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

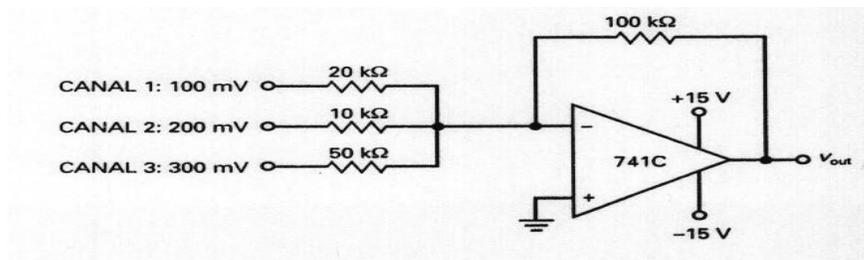


Figura 5-11

## 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  $V_1$  se conecta a tierra, y por lo mismo la tensión  $V_2$  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.

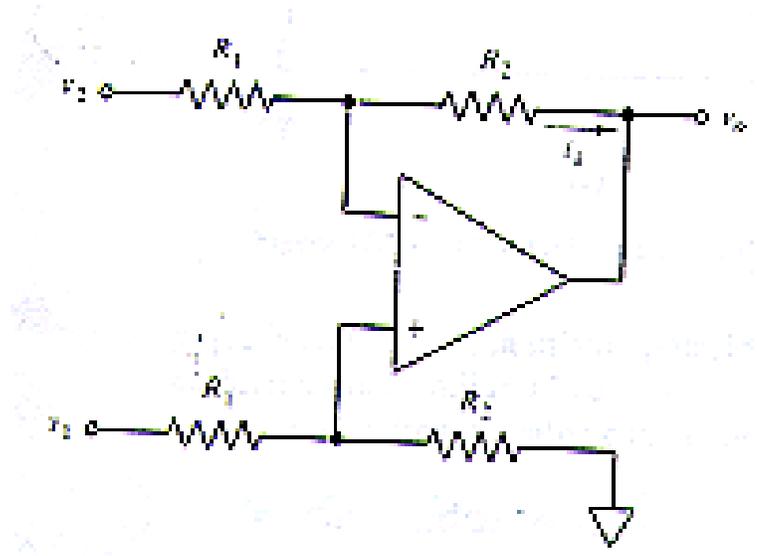


Figura 5-12 Circuito amplificador operacional restador (inversor y no inversor)

### 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)

$$V_0(s) = -\frac{(1/sC)}{R} V_i(s)$$

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

(En el dominio del tiempo)

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

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

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

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

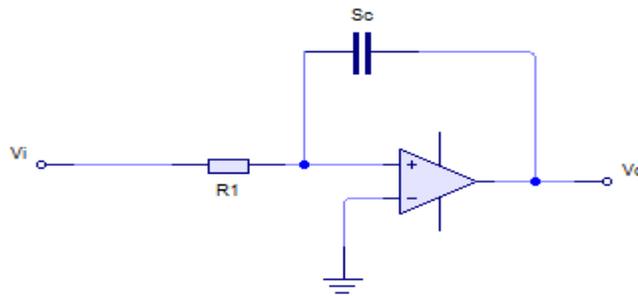


Figura 5-13 Circuito integrador

## ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

### *Práctica No. 11*

### *Circuito sumador*

#### *Materiales:*

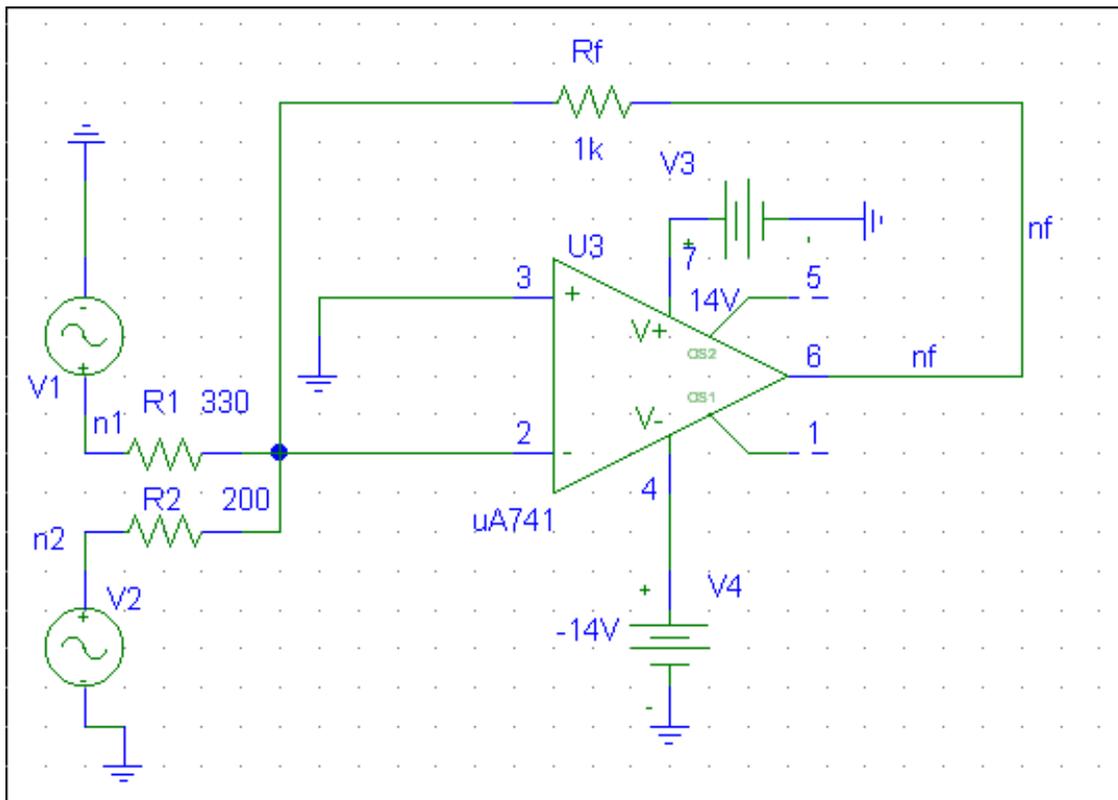
- Dos osciladores de audiofrecuencia
- Un multímetro digital
- Una fuente de alimentación de DC variable, simétrica.
- Un amplificador operacional LM741
- Un resistor de 330Ω 1/4W 5%
- Un resistor de 200Ω 1/4W 5%

- 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  $180^\circ$  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).