

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.

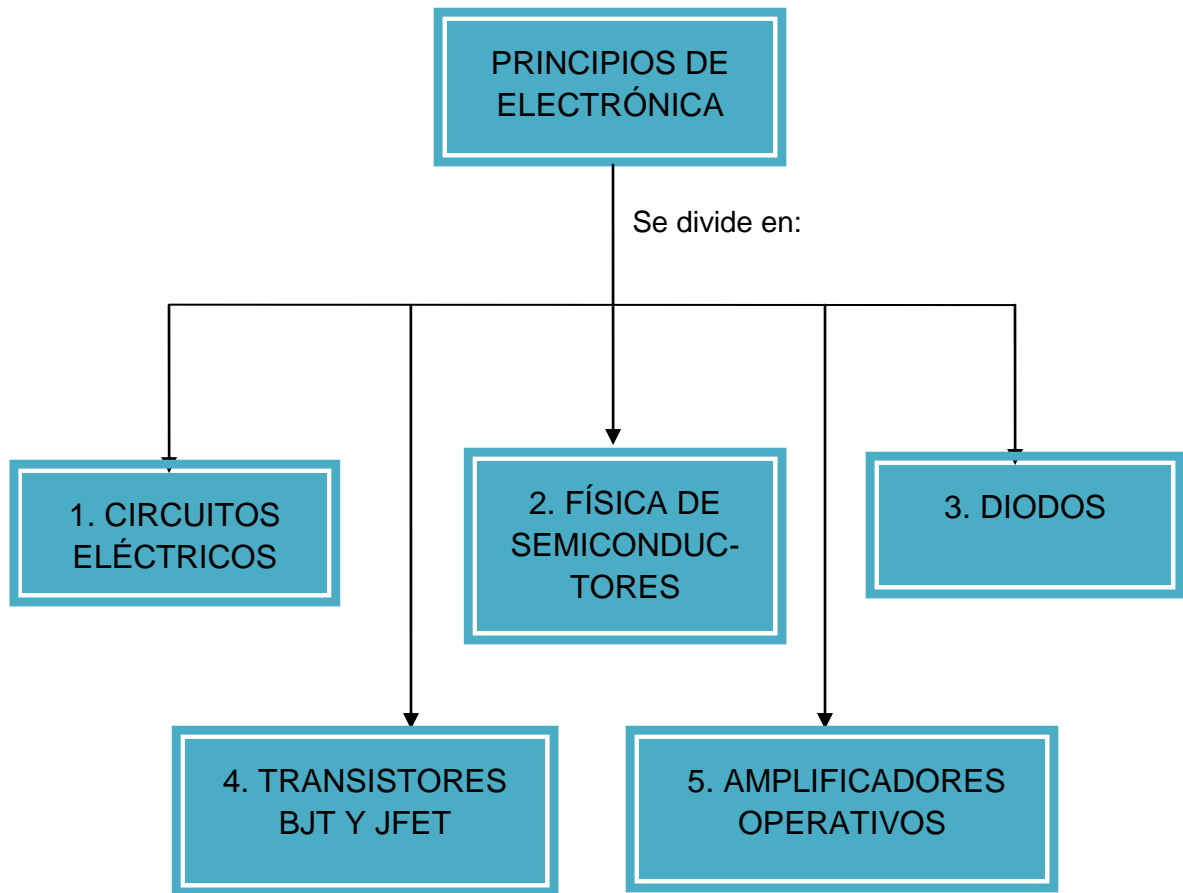
Posteriormente, otros investigadores multiplicaron la creación de las válvulas electrónicas, las cuales se construyeron de diversos tipos y aplicaciones, como diodos, triodos, tetrodos, pentodos, y otras válvulas que hacían diferentes funciones en un tubo, como un doble triodo o un triodo pentodo. Este 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

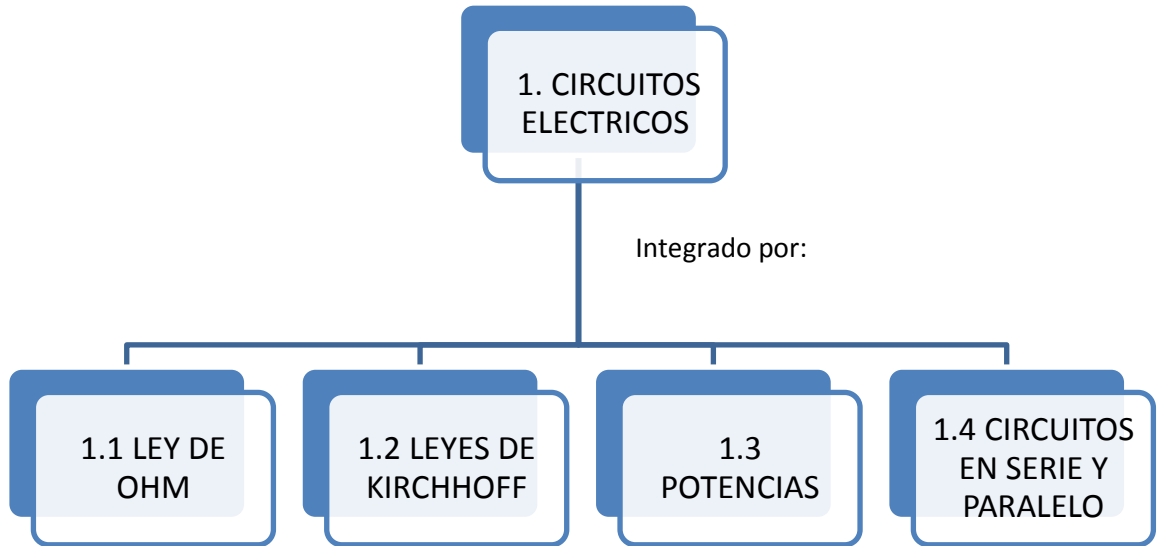
OBJETIVO

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”.¹ 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, Ω .

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

¹ 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

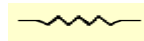


Figura 1.1 Símbolo de resistor

“Uno de los autores, quien prefiere no ser identificado”,² 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

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

² 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 2Ω 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 Ω

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 Ω si la corriente que transporta es de 2.5 A?
 2. ¿Cuál es la corriente a través de un resistor de 72 Ω 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 KΩ, 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 MΩ es de 3.6 μ 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.

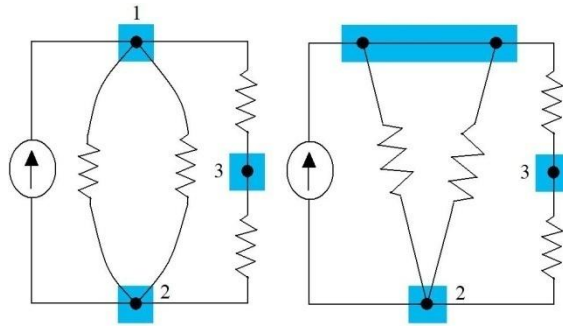


Figura 1-2 a). Circuito que contiene 3 nodos. b) el nodo 1 se redibujó para que parezca que son dos nodos, aunque sigue siendo duro.

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*³ 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:

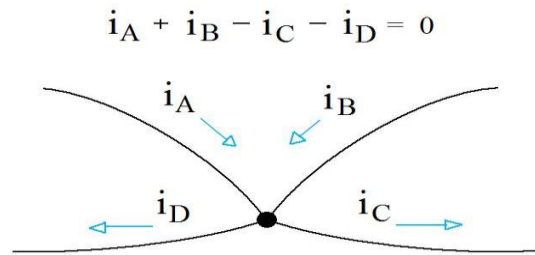


Figura 1-3

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:

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

³ 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.

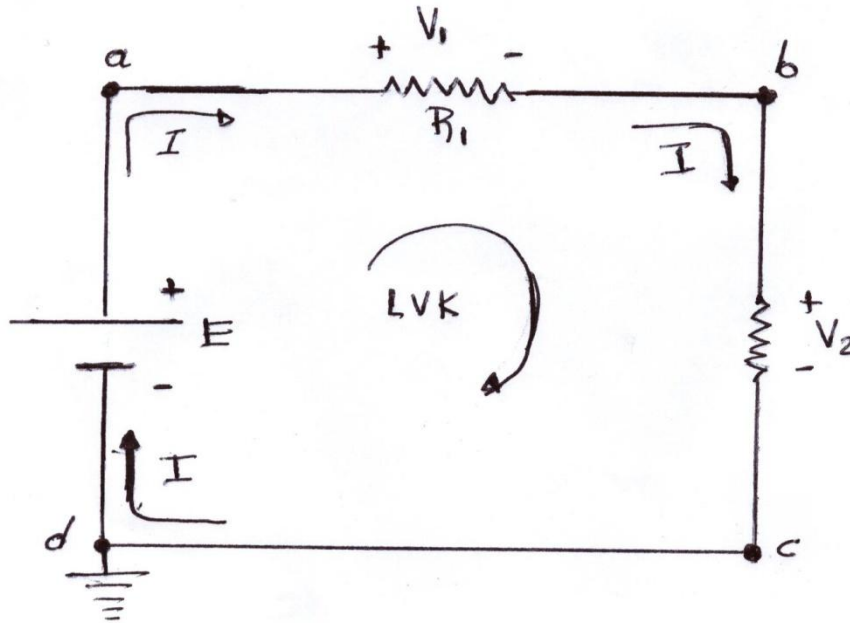


Figura 1-4

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.

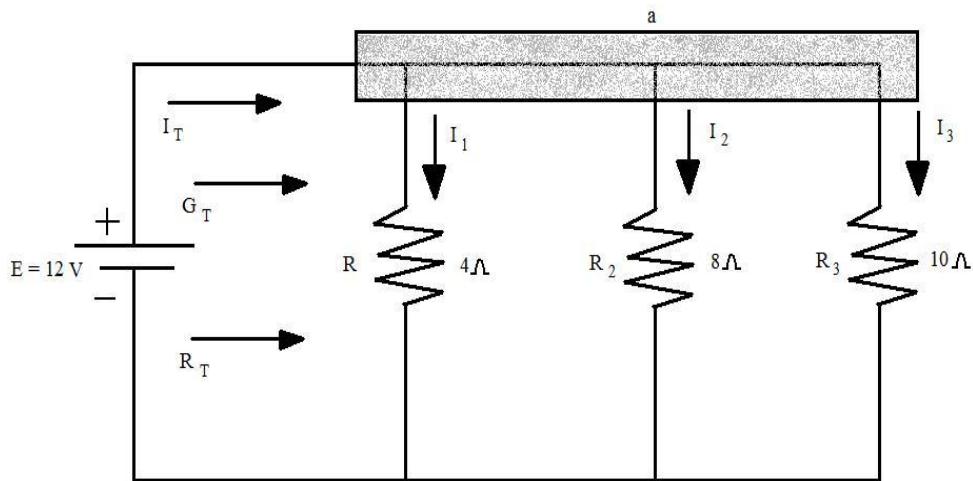


Figura 1-5

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:

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

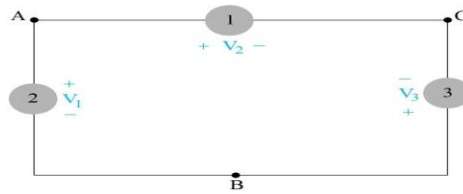


Figura 1-5 Leyes de voltaje

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

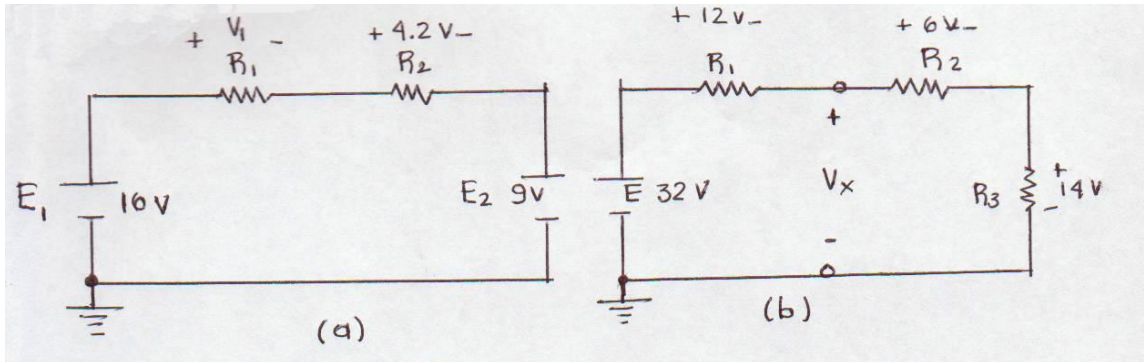


Figura 1-6

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.

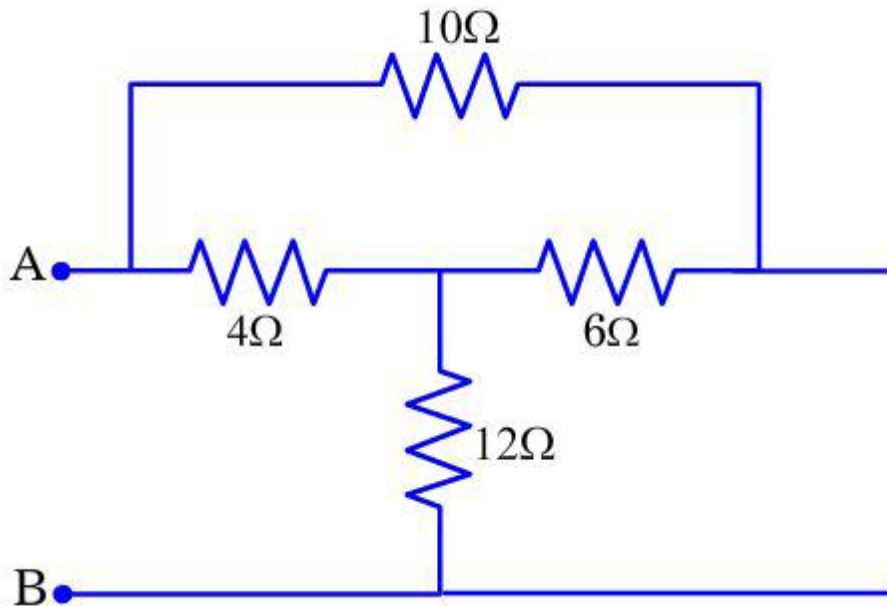


Figura 1-7

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:

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

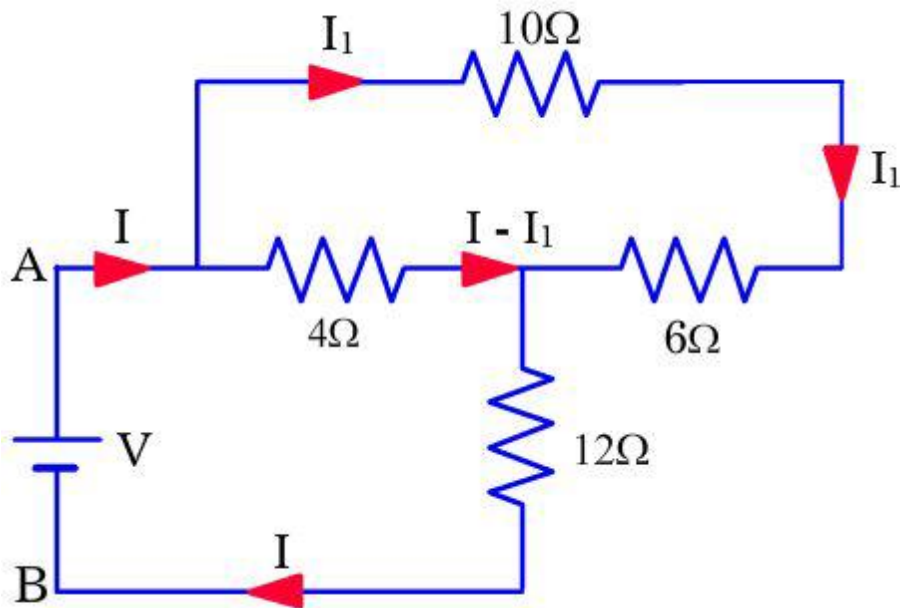
Y la misma segunda ley, aplicada a la malla inferior, da:

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

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 .

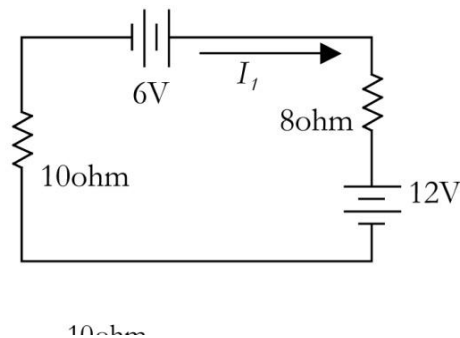


Solución:

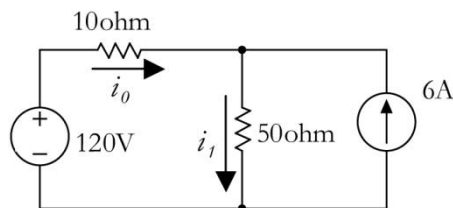
En el dibujo que sigue a continuación aparecen las variables algebraicas I , I_1 e I_2 , que son incógnitas. En el dibujo estamos implementando directamente la primera ley de Kirchhoff, según la cual en cada nodo la cantidad de corriente que entre es igual a la cantidad de corriente que sale. Ahora usaremos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

ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

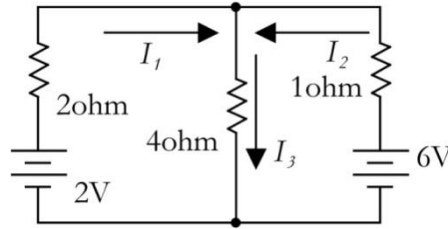
- Desarrollar y resolver problemas de las leyes de Kirchhoff.
 1. Empleando las leyes de Kirchhoff, encuentra la corriente I_1 . ¿Cuál es la potencia disipada en cada resistencia? ¿Cuál es la potencia entregada/absorbida por las fuentes?



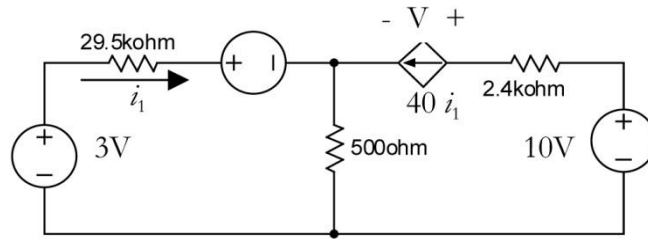
2. Utilizando las leyes de Kirchhoff, encuentra i_0 e i_1 y verifica la potencia total generada es igual a la potencia total disipada.



- 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”,⁴ 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:

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

⁴ 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 5Ω , si la corriente que pasa por ella es de 4 A ?

Solución:

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

Ejemplo 1.8 Una batería de automóvil de 12 V de fem (fuerza electromotriz) proporciona 7.5 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 6h = 21600s

- 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”.⁵

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*.

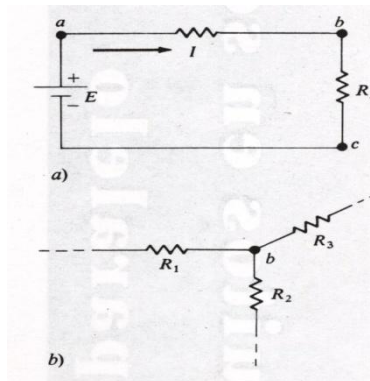


Figura 1-8
a) circuito en serie
b) circuito no en serie

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.

⁵ Boylestad, Robert, L., *op. cit.*, p. 130.

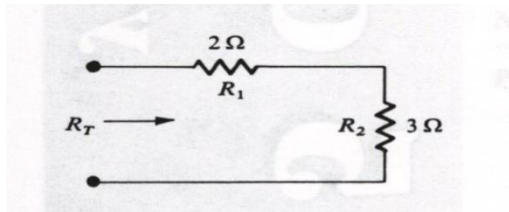


Figura 1-9

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

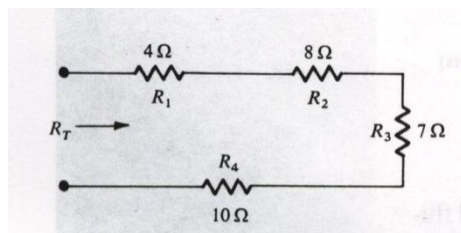


Figura 1-10

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

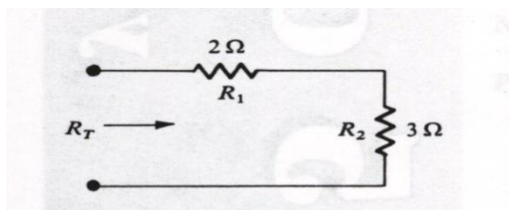


Figura 1-11

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

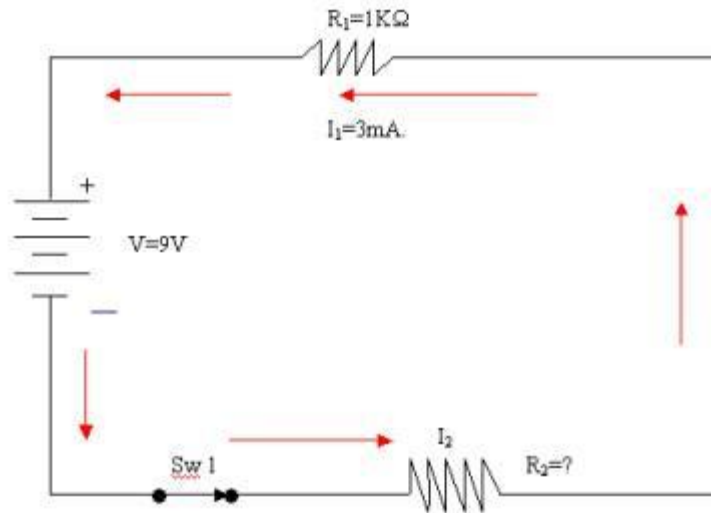


Figura 1-12

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.

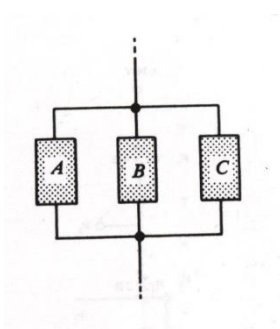


Figura 1-13 a

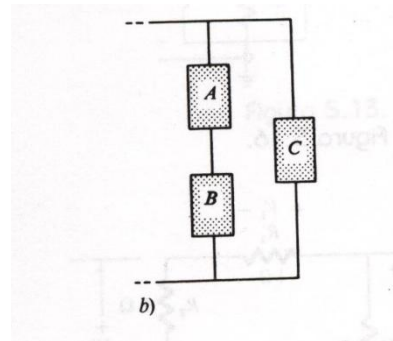


figura 1-13 b

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:

$$G_T = G_1 + G_2$$

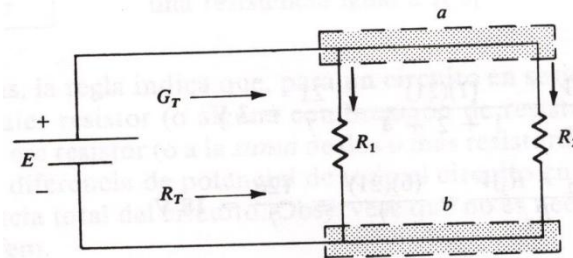


Figura 1-14

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:

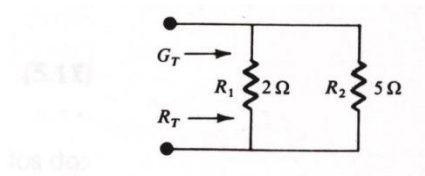


Figura 1-15

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:

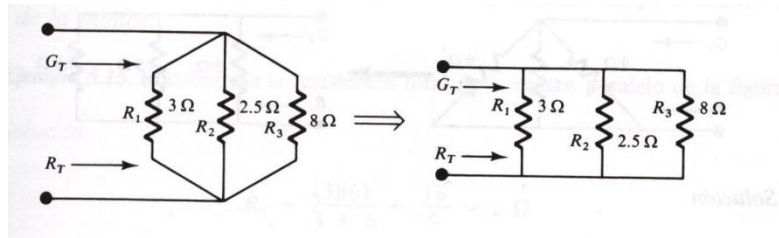


Figura 1-16

Solución:

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3$$

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

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

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

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

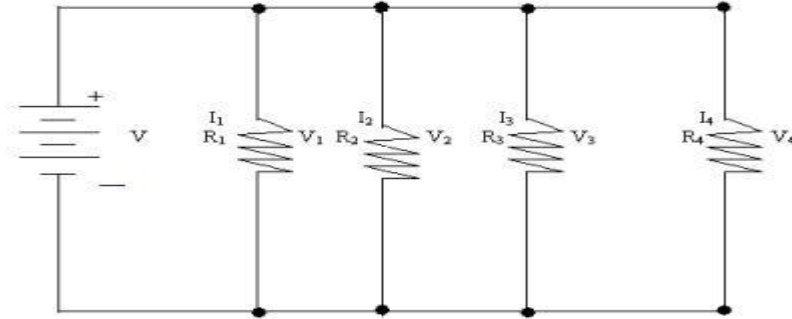
$$R_T = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{0.858} = 1.165 \Omega$$

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:

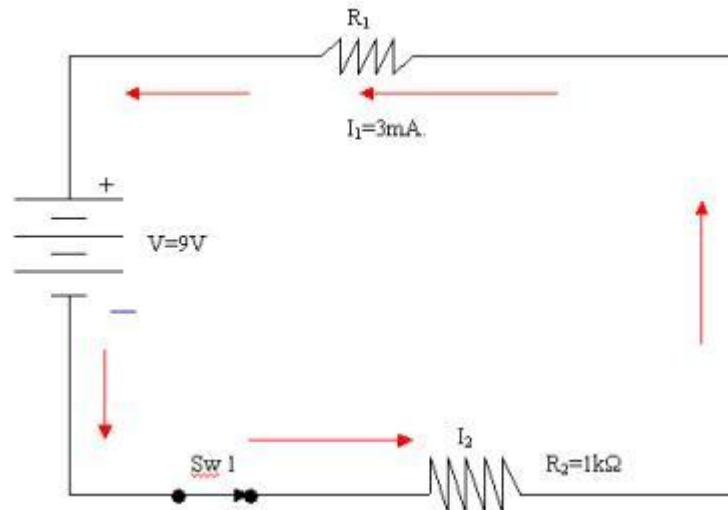
$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{1}{\frac{1}{2k\Omega} + \frac{1}{470k\Omega} + \frac{1}{220k\Omega} + \frac{1}{100k\Omega}} = 1.94K\Omega$$

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

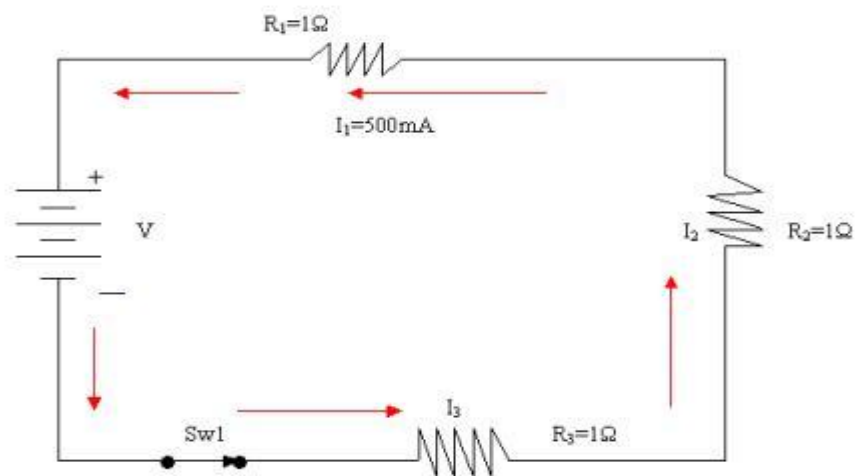
ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

➤ 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:



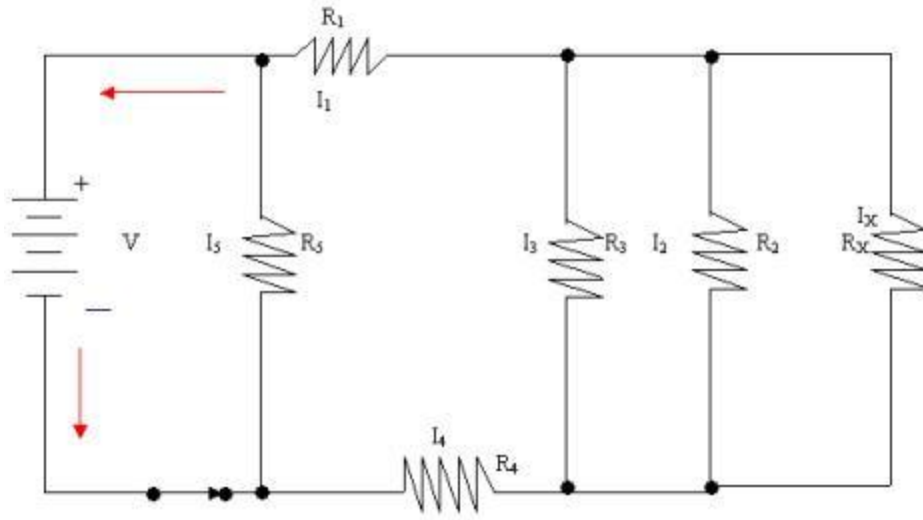
3.- Encuentra la resistencia R_x del circuito. Considera los siguientes datos:

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

$$R_1 = R_4 = 1\Omega$$

$$V_T = 24V$$

$$I_T = 300mA$$



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

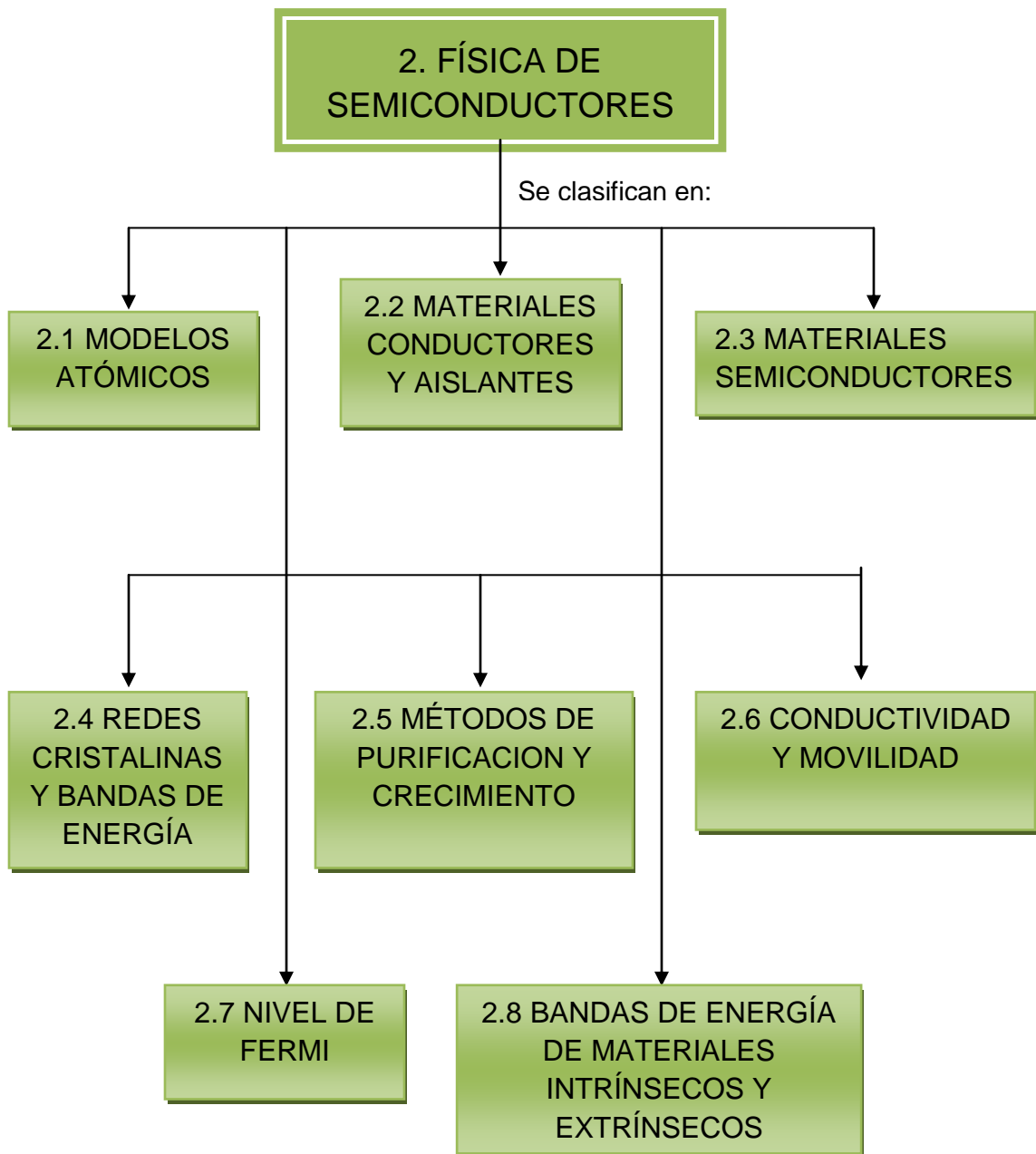
OBJETIVO

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.

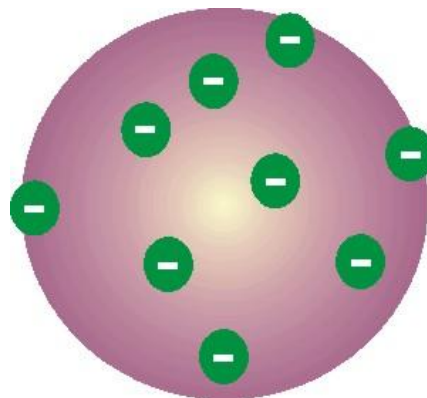


Figura 2-1 Modelo atómico de Thomson

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”.⁶

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

⁶ 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.

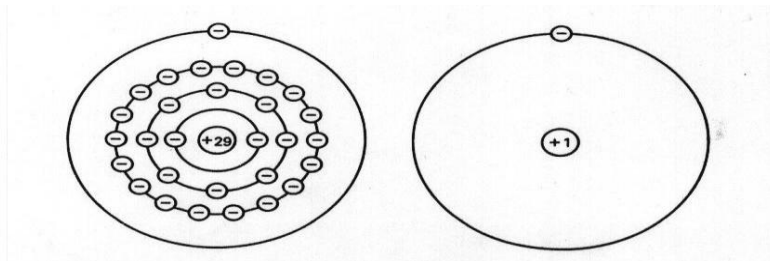


Figura 2-2 Átomo de cobre

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.⁷

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.

⁷ 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”.⁸ 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.

⁸ Malvino, Paul, *op. cit.*, p. 35.

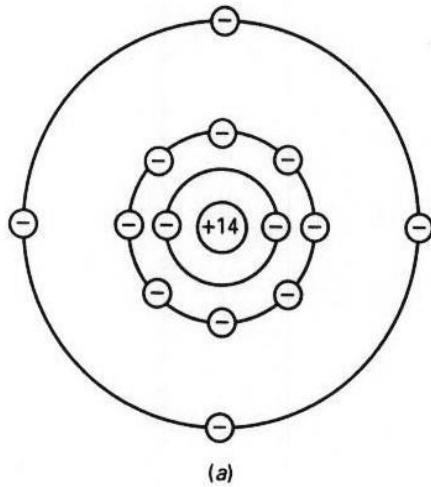


Figura 2-4a Átomo de silicio

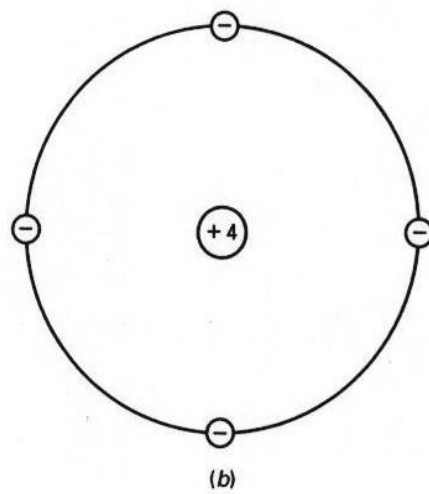


Figura 2-4b Diagrama de la parte interna

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, KNO₂.
2. Cristales moleculares: No conducen la corriente eléctrica encontrándose en estado líquido o sólido, por ejemplo: H₂O, CH₄
3. Redes covalentes: No conducen la corriente eléctrica, algunos ejemplos son: SiO₂, 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.

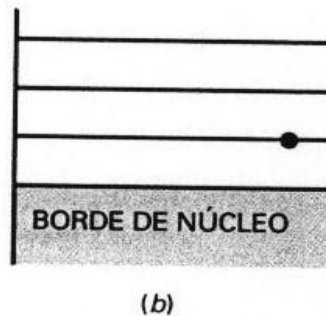
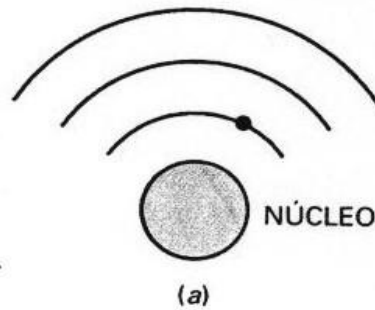


Figura 2-5a Orbitales

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.

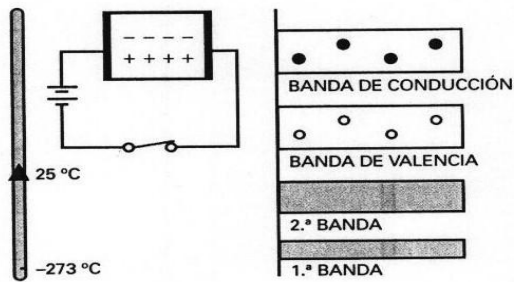


Figura 2-6 Semiconductor intrínseco y sus bandas de energía

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.

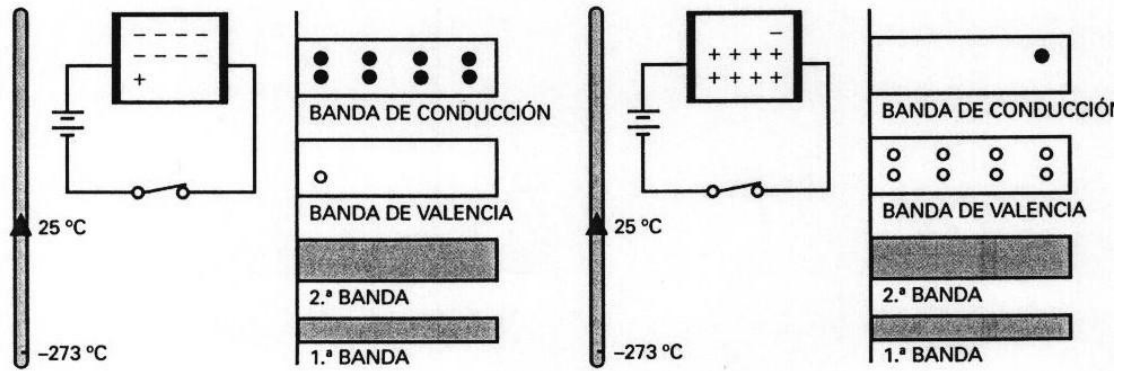


Figura 2-7 Semiconductor tipo “n” y sus bandas de energía. Figura 2-8 semiconductor tipo “p” y sus bandas de energía.

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”.⁹

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.

⁹ 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 cm^3 y p huecos por 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 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 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 (0K). 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”.¹⁰ 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.

¹⁰ *Ibidem*, p. 39.

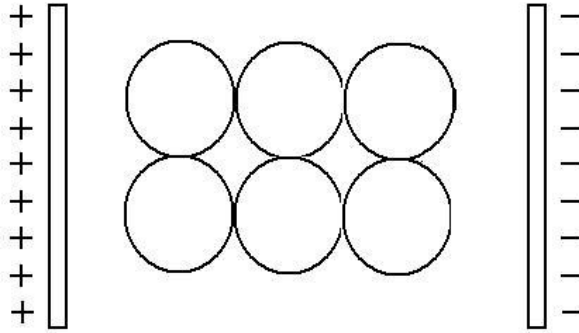


Figura 2-9 Flujo de un hueco a través de un semiconductor.

Semiconductores extrínsecos

Un semiconductor se puede dopar¹¹ 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.

¹¹ Dopar es la acción de añadir impurezas a un mono cristal.

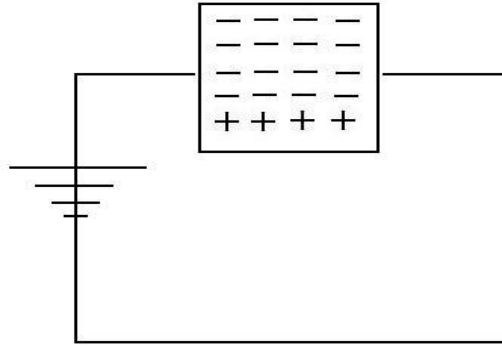


Figura 2-10 El semiconductor tipo *n* tiene muchos electrones libres

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.

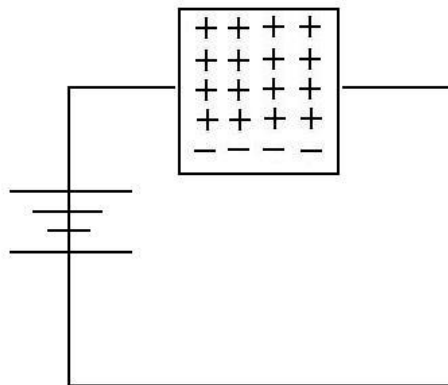


Figura 2-11 El semiconductor tipo *p* tiene muchos huecos

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

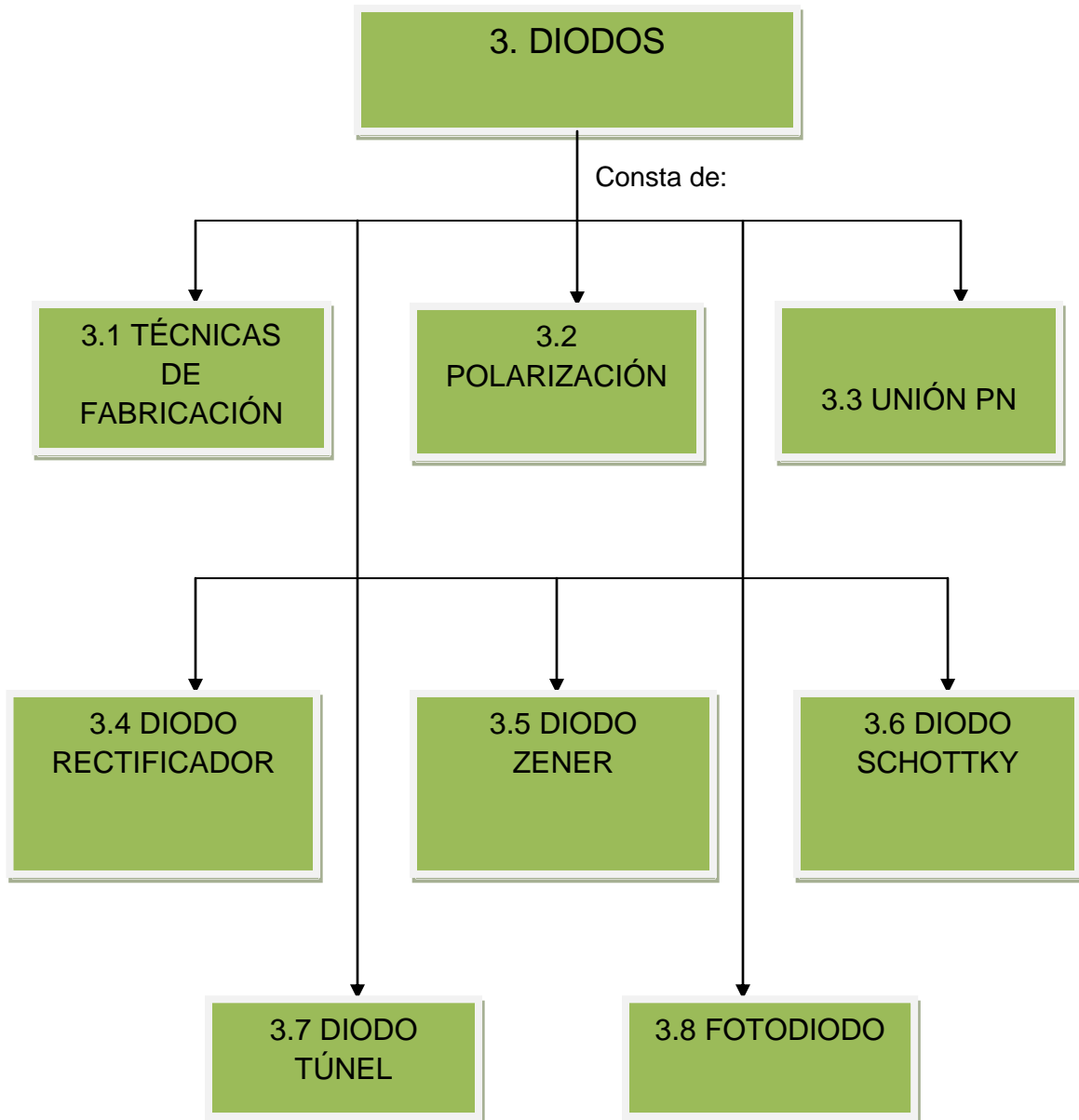
OBJETIVO

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.

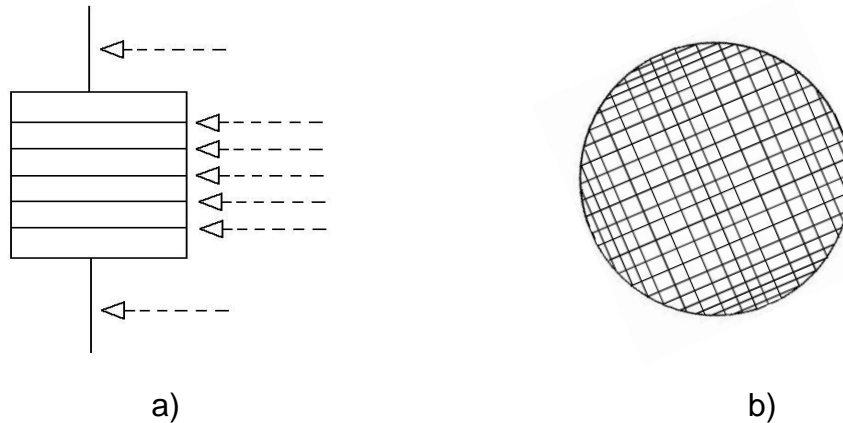


Fig. 3-1 a) Sección esquemática de un diodo de unión PN discreto
b) Superficie de la oblea. Cada cuadrado (un dado) se convierte en un diodo, una vez cortado y montado.

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.

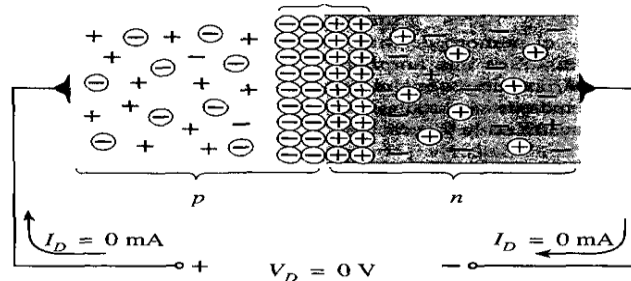


Fig. 3-2 Unión PN sin polarización externa.

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.

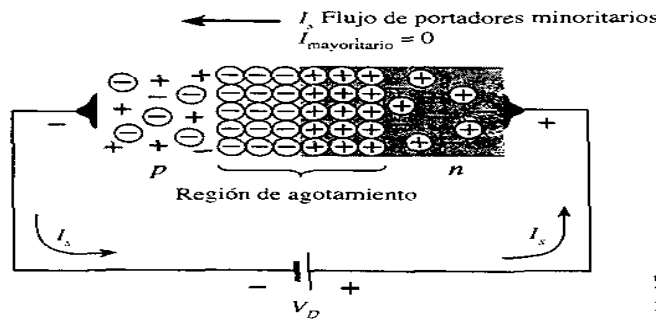


Fig. 3-3 Unión PN con polarización inversa

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”.¹²

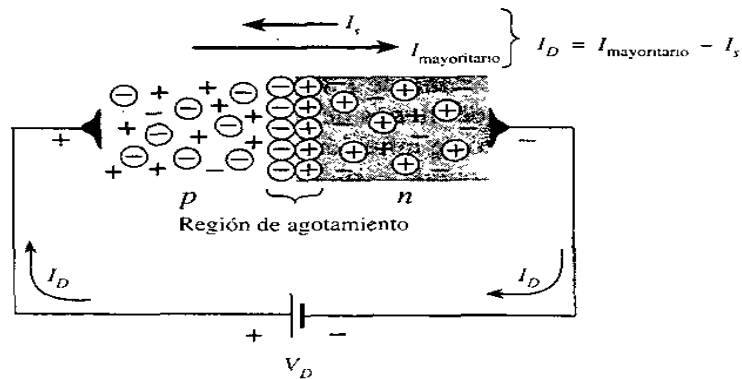


Fig. 3-4 Unión PN con polarización directa

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

¹² 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 600Ω 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.

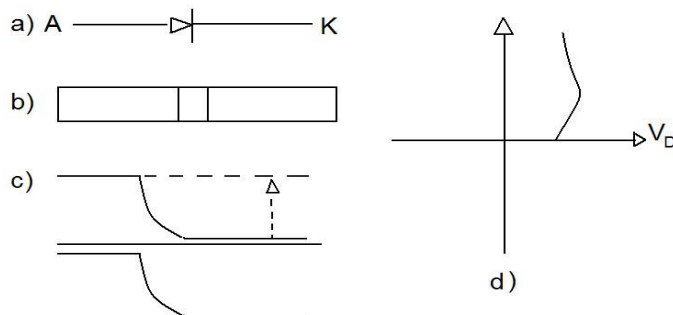


Fig. 3-5 La unión PN: a) Símbolo circuital. b) Estructura física. c) Diagrama de bandas en equilibrio térmico
d) Características $I(V)$

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 1000Ω 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 1000Ω
- 4) Conecta el otro extremo de la batería al resistor de 1000Ω
- 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.

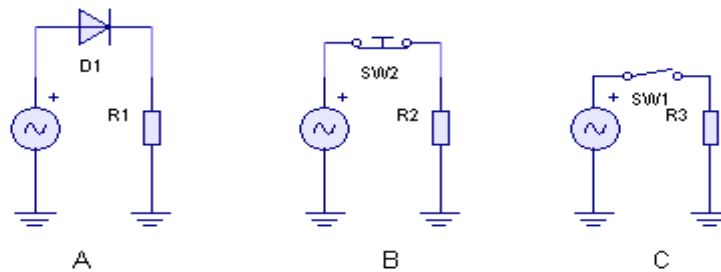


Figura 3-6: a) rectificador ideal de media onda
 b) en la mitad positiva del ciclo
 c) en la mitad negativa del ciclo

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.

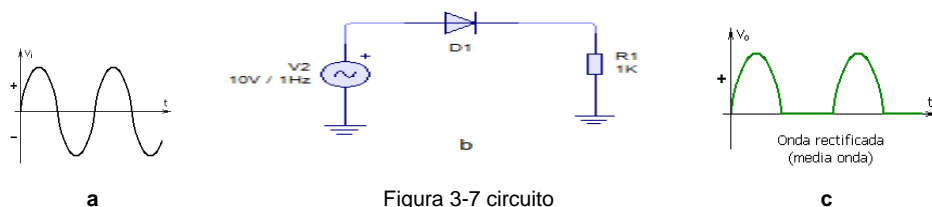


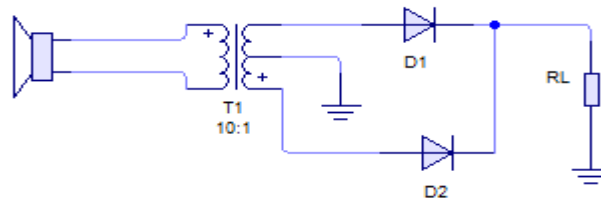
Figura 3-7 circuito

Rectificación de onda completa

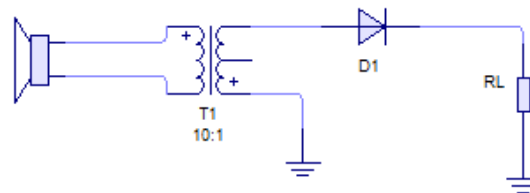
La figura 3-8 muestra un rectificador de onda completa. Observa la conexión intermedia llevada a masa en el arrollamiento secundario. Debido a esta conexión central de circuito es equivalente a dos rectificadores de media onda.

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

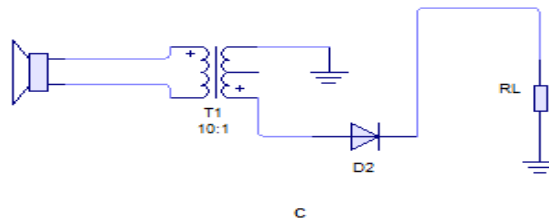


Figura 3-8 a) Rectificador de onda completa
 b) Circuito equivalente para el semiciclo positivo
 c) Circuito equivalente para el semiciclo negativo

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).

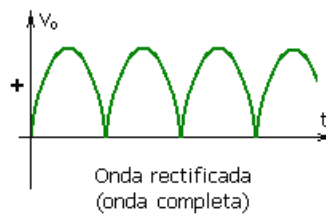


Figura 3-8d

ACTIVIDAD DE APRENDIZAJE

Práctica No.2

Funcionamiento de los diodos rectificadores

Materiales:

- Un osciloscopio de dos canales
- Cuatro diodos 1N4001
- Un resistor de 100Ω 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 100Ω
- 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 100Ω
- 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”.¹³ 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).

¹³ 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.

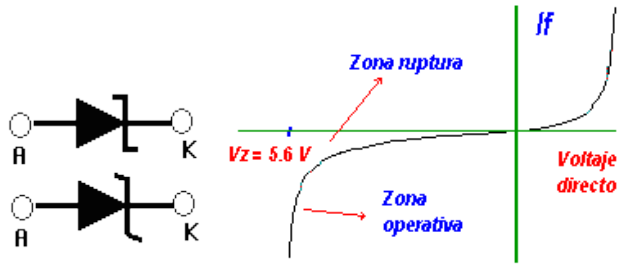


Figura 3.9a Símbolo de un diodo zener.

Figura 3.9b Zona de ruptura.

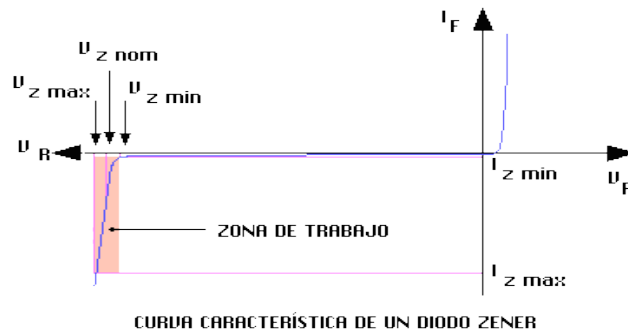


Figura 3.9c Zona de trabajo.¹⁴

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

¹⁴ <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.

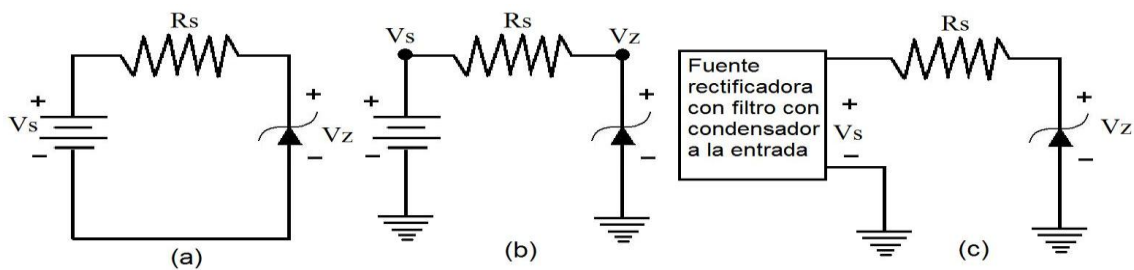


Figura 3-10 Regulador zener

- 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?

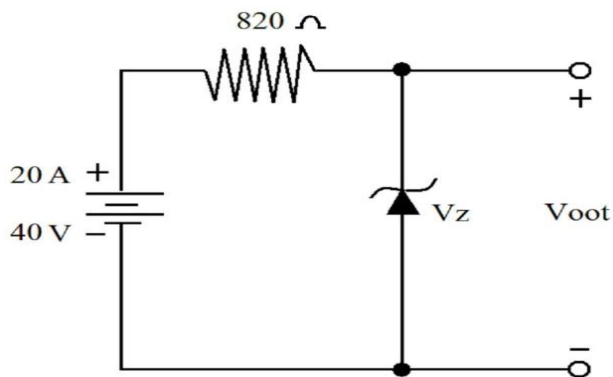


Figura 3-11

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 820Ω 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 30V entre 820Ω , 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 10V entre los 820Ω 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

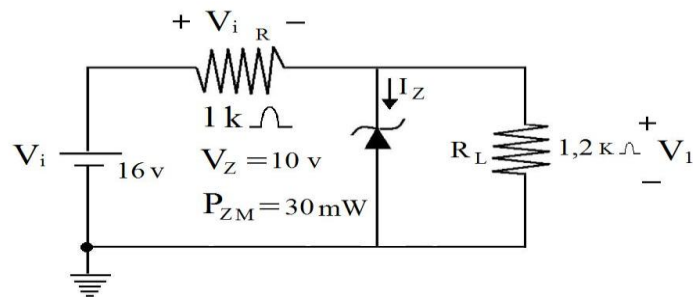


Figura 3-12

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”

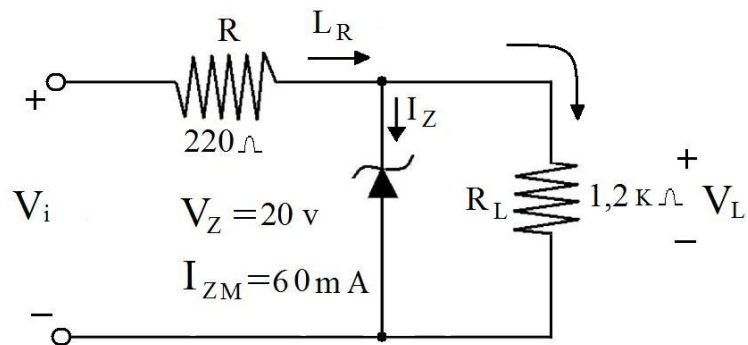


Figura 3-13

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

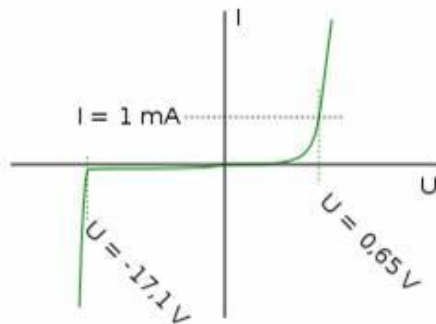
Práctica No.3

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

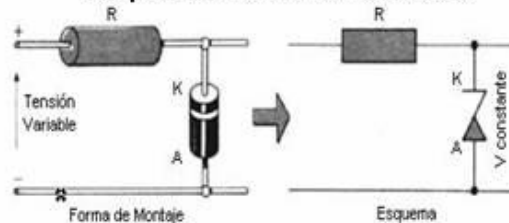


Figura 3-14

3.6 DIODO SCHOTTKY

“A medida que la frecuencia crece, el funcionamiento de los diodos rectificadores de pequeña señal empieza a deteriorarse”.¹⁵ 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.

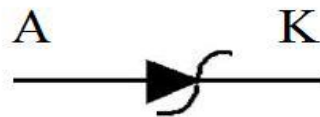


Figura 3-15 Símbolo del diodo schottky

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

¹⁵ 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.

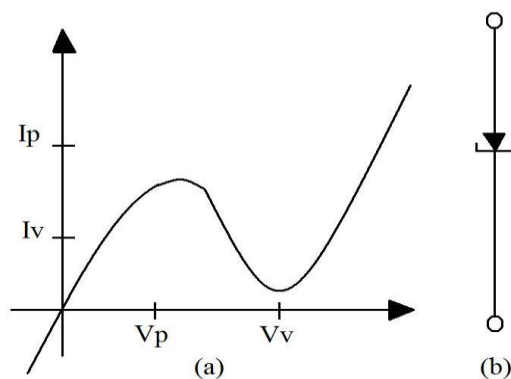


Figura 3-16 Diodo túnel

- 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.

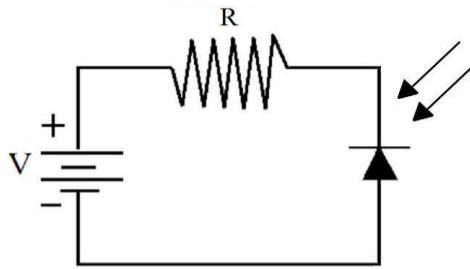


Figura 3-17 La luz incidente incrementa la corriente inversa en el fotodiodo.

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 1000Ω $\frac{1}{4}$ 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

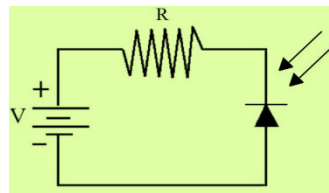


Figura 3-18

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