

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



AUTO-  
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD  
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

POR:

ING. JOSE FLORENCIO SILVA GARCIA

T E S I S

EN OPCION AL TITULO AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA  
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN  
ELECTRONICA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 1998



AUTO-

EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD  
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

1998

TM  
25853  
.M2  
PIME  
1998  
S5



1020124766

ENCUADERNACIONES MODERNAS AMERICANAS  
JESUS M. GARCIA # 1217 OTE.  
COL. TERMINAL  
MONTERREY, N. L. MEXICO  
TEL. 374-02-69

# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



AUTO-  
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD  
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

POR

ING. JOSE FLORENCIO SILVA GARCIA

T E S I S

EN OPCION AL TITULO AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA  
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN  
ELECTRONICA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 1998



**FONDO  
TESIS**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



AUTO-  
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD  
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

POR

ING. JOSE FLORENCIO SILVA GARCIA

T E S I S

EN OPCION AL TITULO AL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE INGENIERIA  
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN  
ELECTRONICA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 1998

TMA  
25853  
.M2  
FIME  
1998  
CE

0129-73660




**PONDO  
TESIS**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**

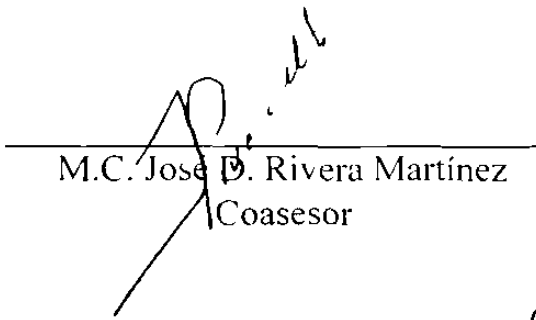
Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Autoevaluación y Comprobación de Calidad de Aprendizaje de Electrónica” realizada por el Ing. José Florencio Silva García No. matrícula 124343, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con la especialidad en Electrónica.

El Comité de Tesis



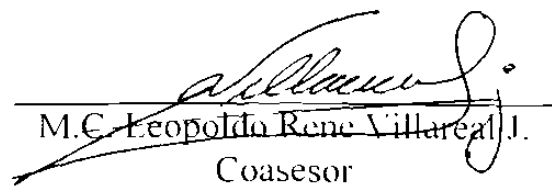
---

M.C. José René Medina Cantú  
Asesor



---

M.C. José B. Rivera Martínez  
Coasesor



---

M.C. Leopoldo René Villareal J.  
Coasesor



---

M.C. Roberto Villarreal Garza  
Vo.Bo.  
División de Estudios de Post-grado

San Nicolás de los Garza, N.L.

Diciembre de 1998



## PRÓLOGO

Hoy en día es importante que los egresados de la carrera relacionada con la ingeniería en electrónica y comunicaciones sean capaces no sólo de contar con los conocimientos más nuevos sobre su especialidad sino reafirmar las bases adquiridas en el campo de la electrónica.

Las universidades que preparan a éstos profesionistas deben de ajustar también sus programas de estudio, infraestructura y metodología de enseñanza para satisfacer los perfiles ideales de los egresados en el área de electrónica y comunicaciones y sean más competitivos.

Debido a esto se ha creado un examen general de calidad profesional para ingeniería electrónica.

Con el propósito de contribuir de cierta manera a la solución de la problemática planteada, desarrollamos éste trabajo como una parte del programa de electrónica que se establece para dicho examen. Ésto como formación de recursos humanos para alumnos y egresados.

Lo extenso de los temas tratados fue desarrollado por dos personas afines a la enseñanza en el área de electrónica, el Ing. José Florencio Silva García y el Ing. Humberto Figueroa Martínez.

# SÍNTESIS

Estamos viviendo en una sociedad de información donde ahora más que nunca se requieren enormes cantidades de ésta.

Este trabajo pretende crear un documento que sirva como tutorial para el aprendizaje de algunos dispositivos semiconductores más importantes tales como el diodo, el transistor bipolar, el transistor de efecto de campo los cuáles han ejercido desde su aparición una importante influencia en el área de electrónica.

Inicia la presentación de éste trabajo con una introducción sobre materiales utilizados para la formación de los dispositivos semiconductores de entrada y formas de onda de salida en circuitos recortadores y sujetadores describiendo como están formados estos a partir de los materiales tipo-p y tipo-n, continuando con aplicaciones al diodo ideal, semiconductores y especiales como también el análisis de la resistencia que se presenta en ellos de acuerdo a la señal.

Continuando con circuitos de transistores bipolares y transistores de efecto de campo proponiendo una metodología para el análisis de puntos de operación de un circuito para diferentes tipos de polarización y configuraciones, así como la obtención de sus líneas de carga en su forma matemática y forma gráfica.

Posteriormente se hace una descripción a grandes rasgos de los requerimientos de hardware y software para la simulación de circuitos electrónicos por computadora.

Concluyendo con una serie de preguntas y problemas propuestos así como sus resultados para la evaluación del interesado.

# CONTENIDO

<b>Prólogo</b>	<b>i</b>
<b>Síntesis</b>	<b>ii</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	3
<b>Capítulo 2 Materiales semiconductores</b>	<b>4</b>
2.1 Introducción	4
2.2 Niveles de energía	7
2.3 Materiales extrínsecos	8
2.4 Diodo semiconductor	11
2.5 Niveles de resistencia	16
<b>Capítulo 3 Aplicaciones de los diodos</b>	<b>24</b>
3.1 Análisis mediante la recta de carga	24
3.2 Circuitos con configuraciones de diodos en serie con entradas de cd	27
3.3 Circuitos con configuraciones de diodos en paralelo y serie-paralelo	30
3.4 Circuitos con entradas senoidales	33
3.5 Circuitos recortadores	46
3.6 Circuitos sujetadores	54
<b>Capítulo 4 Diodos especiales</b>	<b>60</b>
4.1 Diodo ideal	60
4.2 Diodo zener	62
4.3 Diodo schottky	68
4.4 Diodo varactor	70
4.5 Diodo tunel	72
4.6 Fotodiodo	74

<b>Capítulo 5 Transistores Bipolares</b>	<b>77</b>
5.1 Introducción	77
5.2 Construcción de los transistores	77
5.3 Operación del transistor	78
5.4 Configuración de base común	80
5.5 Configuración de emisor común	85
5.6 Configuración de colector común	88
5.6 Límites de operación	88
<b>Capítulo 6 Polarización de los transistores bipolares</b>	<b>91</b>
6.1 Introducción	91
6.2 Punto de operación	91
6.3 Regiones de operación	93
6.4 Diferentes tipos de polarizaciones	93
<b>Capítulo 7 Transistores de efecto de campo</b>	<b>123</b>
7.1 Introducción	123
7.2 Construcción y características del JFET	124
7.3 Dispositivos de canal p	129
7.4 Características de transferencia del JFET	130
7.5 MOSFET tipo decremental	136
7.6 MOSFET tipo incremental	142
<b>Capítulo 8 Polarizaciones del transistor de efecto de campo</b>	<b>151</b>
8.1 Introducción	151
8.2 Configuración de polarización fija	152
8.3 Configuración de autopolarización	156
8.4 Polarización mediante divisor de voltaje	167
8.5 Polarización para el MOSFET tipo decremental	176
8.6 Polarización para el MOSFET tipo incremental	184
<b>Capítulo 9 Pspice</b>	<b>197</b>
9.1 Introducción	197
9.2 Información sobre programación	200
9.3 Formato	201
9.4 Descripción del circuito	202
9.5 Datos de entrada	203
9.6 Operación general para el uso de pspice	213
9.7 Análisis por computadora	214



<b>Capítulo 10 Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>225</b>
10.1 Conclusiones	225
10.2 Recomendaciones	226
<b>Bibliografía</b>	<b>227</b>
<b>Listado de tablas</b>	<b>228</b>
<b>Listado de figuras</b>	<b>229</b>
<b>Glosario de términos</b>	<b>238</b>
<b>Resumen autobiográfico</b>	<b>239</b>

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

### 1.1 INTRODUCCION

El campo de la electronica ha sufrido un notable cambio últimamente. El tubo de vacio que influyó en diversas facetas de la civilización ha sido desplazado por los dispositivos semiconductores los cuales han ejercido desde su aparición, una influencia decisiva en aplicaciones como elementos amplificadores, para la generación de oscilaciones y en el campo de las telecomunicaciones y la electrónica.

En éste trabajo se ha tratado de destacar y explicar conceptos que tienen algun valor a largo plazo. Rápidos desarrollos en la tecnología de semiconductores continuará para llegar a nuevos dispositivos con características funcionales mejoradas, éstos desarrollos se basarán en los mismos conceptos fundamentales que sus predecesores.

Esta tesis pretende darle al estudiante los principios básicos de formación, características, analisis y aplicaciones de éstos dispositivos, así como una base que le capacitará para tratar circuitos con facilidad de modo que sea capaz de comprender los nuevos dispositivos que surgan. Para esto se supone que el estudiante cuenta con una base teorica de los circuitos lineales como son las leyes de Kirchhoff en circuitos de corriente directa.

## **1.2 OBJETIVO**

El presente trabajo tiene como propósito fundamental crear un documento que sirva como tutorial como apoyo para el aprendizaje de algunos circuitos electrónicos.

El objetivo principal es que el alumno o egresado puedan conocer el alcance de sus conocimientos mediante una autoevaluación.

## **1.3 JUSTIFICACION**

Las universidades que preparan a profesionales en el área de ingeniería en electrónica y comunicaciones están creando una estandarización de los temas de área académica mediante un examen general de calidad profesional.

Con éste fundamento justifico la elaboración de mi tesis "Autoevaluación y Comprobación de Calidad de Aprendizaje en Electrónica" para apoyo de los alumnos y egresados de la carrera de IEC en la materia de electrónica analógica.

## 1.4 METODOLOGIA

Este manual inicia con la descripción de algunos materiales semiconductores más utilizados en los diferentes dispositivos electrónicos.

Enseguida se analizan principalmente cuatro tipos de dispositivos electrónicos como son el diodo semiconductor, el diodo zener, el transistor bipolar y el transistor efecto de campo, así como un software ( PSPICE ) para simulación de circuitos eléctricos y electrónicos.

La metodología empleada en este trabajo consiste primero en definir sus símbolos correspondientes curvas características, polarizaciones y configuraciones más comunes posteriormente se analizan los circuitos para la obtención de sus líneas de carga y puntos de operación mediante un análisis matemático y gráfico finalizando con un establecimiento de las condiciones de simulación y sus resultados.

En cada una de las partes se plantean ejemplos relevantes que involucran teoremas, modelos, principios de circuitos electrónicos. Así como una serie de preguntas y problemas propuestos.



## CAPITULO 2

### MATERIALES SEMICONDUCTORES

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

El termino **semiconductor** cuenta con el prefijo **semi** ésto quiere decir que está situado entre dos límites.

El término **conductor** se aplica a cualquier material que soporte un flujo generoso de carga, cuando una fuente de voltaje de magnitud limitada se aplica a través de sus terminales.

Un **aislante** es un material que ofrece un nivel muy bajo de conductividad bajo la presión de una fuente de voltaje aplicada.

Un **semiconductor** es un material que posee un nivel de conductividad entre los extremos de un aislante y un conductor.

De manera inversa y relacionada con la conductividad de un material, se encuentra su resistencia al flujo de la carga ó corriente; el termino **resistividad** ( $\rho$ ), utilizado para comparar los niveles de resistencia de los materiales. En unidades metricas la resistividad de un material se mide en ohms-cm ó ohms-mtro. Las unidades de ohms-cm se derivan de la sustitución de las unidades para cada cantidad de la figura

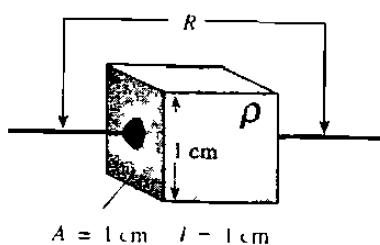


Figura 2.1 Definición de las unidades metricas de resistividad.

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (\Omega)(\frac{cm}{cm}) \Rightarrow \Omega - cm$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \rho \left( \frac{1cm}{1cm} \right) = \rho |ohms$$

Los materiales semiconductores, **germanio** (Ge) y **silicio** (Si), pueden ciertamente no ser los únicos dos materiales semiconductores, sin embargo, son los que más interesan en el desarrollo de dispositivos semiconductores.

La capacidad de cambiar las características del material en forma significativa se le conoce con el nombre de "**dopado**", esto es que sus características se pueden alterar a través de la aplicación de calor ó luz. Los átomos de ambos materiales forman un patrón muy definido que es periódico en naturaleza ( esto es, que continuamente se repite el mismo). A un patrón completo se le llama: **crystal** y al arreglo periódico de los átomos **Red cristalina**. Para el Ge y el Si el cristal tiene la estructura de diamante de tres dimensiones, como se muestra en la figura 2.2

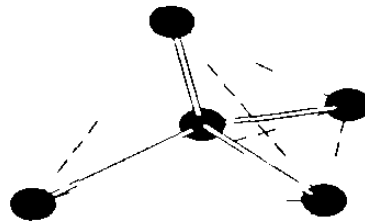


Figura 2.2 Estructura de un solo cristal de germanio y silicio

El átomo se compone de tres partículas básicas: el **electrón**, el **protón**, y el **neutrón**. En la red atómica los neutrones y los protones forman el **núcleo**, mientras que los electrones se mueven alrededor del núcleo sobre una órbita fija.

Los semiconductores que se usan con mayor frecuencia son el germanio y el silicio estos se muestran en la figura 2.3

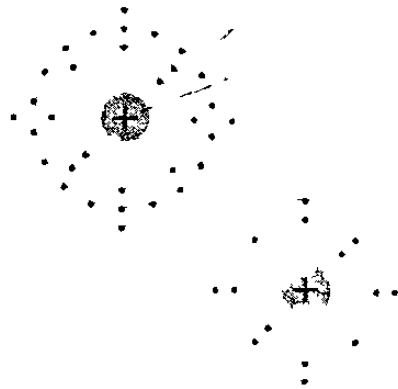


Figura. 2.3

Estructura atómica germanio y silicio

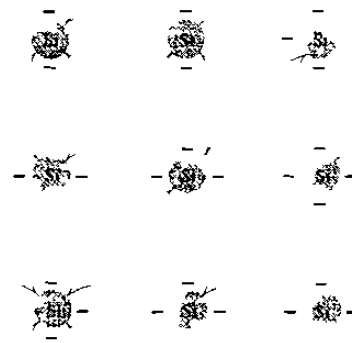


Figura. 2.4

Unión covalente del átomo de silicio

El átomo de germanio, tiene 32 electrones en órbita, mientras que el silicio tiene 14 electrones en varias orbitas. En cada caso, existen cuatro electrones en la órbita exterior (**valencia**). El potencial que se requiere para movilizar cualquiera de éstos cuatro electrones de valencia, es menor que el requerido por cualquier otro electron dentro de la estructura. En un cristal puro de germanio o de silicio éstos cuatro electrones de valencia se encuentran unidos a cuatro átomos adjuntos como se muestra en la figura 2.4

Tanto el Ge como el Si son referidos como átomos tetravalentes porque cada uno tiene cuatro electrones de valencia.

Una unión de átomos fortalecida por el compartimiento de electrones se denomina: **Enlace covalente**. Este enlace generara una unión más fuerte entre los electrones de valencia y su átomo, pero todavía es posible para los electrones absorber energía cinética y romper ésta unión covalente y asumir el estado "libre". Ésto es, que su movimiento es sensible a campos eléctricos aplicados. En un centímetro cúbico de material intrínseco hay  $1.5 \times 10^1$  portadores libres.

Los materiales intrínsecos son aquellos semiconductores que han sido cuidadosamente refinados para reducir las impurezas a un nivel muy bajo esencialmente tan puro como se puede obtener a través de la tecnología moderna.

A los electrones libres localizados en el material que se deben solo a causas naturales se les conoce como **portadores intrínsecos**. El material intrínseco de germanio tiene aproximadamente  $2.5 \times 10^{16}$  transmisores libres por centímetro cúbico. El germanio es un mejor conductor a temperatura ambiente.

Un incremento en la temperatura de un semiconductor, puede generar un incremento sustancial en el número de electrones libres en el material.

## 2.2 NIVELES DE ENERGÍA

En la estructura atómica aislada existen niveles de energía discretos (individuales) asociados con cada electron en una órbita, según se muestra en la figura 2.5 cada material tendrá, de hecho su propio conjunto de niveles de energía permisibles para los electrones en su estructura atómica.

Mientras más distante se encuentre el electrón del núcleo, mayor es el estado de energía y cualquier electrón que haya dejado a su átomo, tiene un estado de energía mayor que cualquier electron en la estructura atómica.

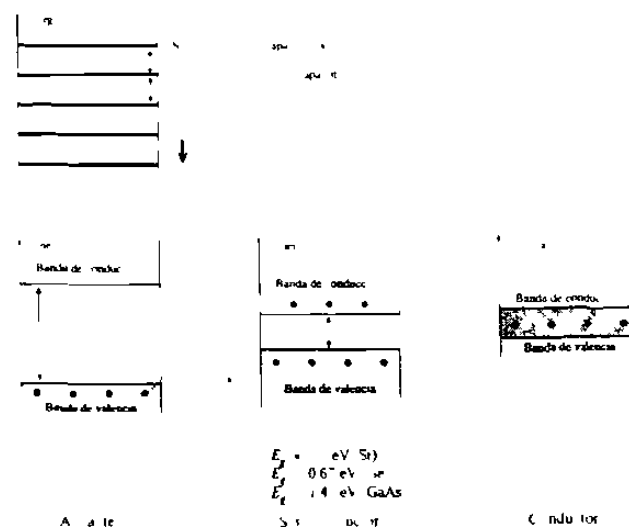


Figura 2.5 Niveles de energía.



La ionización es el mecanismo mediante el cual un electrón puede absorber suficiente energía para separarse de su estructura atómica y entrar en la banda de conducción. La energía asociada con cada electrón se mide en **electrón volts ( eV )**. La unidad de medida será:

$$W = QV \quad \text{eV}$$

Sustituyendo la carga de un electrón y una diferencia de potencial de 1 volt en la ecuación anterior se tiene un nivel de energía referido como un **electrón volt**. Debido a que la energía también se mide en joules y que la carga de un electrón  $= 1.6 \times 10^{-19}$  coulombs,

$$W = QV = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V})$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joules}$$

## 2.3 MATERIALES EXTRÍNSECOS

### tipo - n y tipo - p

Las características de los materiales semiconductores pueden ser alteradas significativamente por la adición de ciertos átomos de impureza a un material semiconductor relativamente puro. Estas impurezas, aunque sólo haya sido añadida una parte en 10 millones, pueden alterar en forma suficiente la estructura de la banda y cambiar totalmente las propiedades eléctricas del material.

Un material semiconductor que haya sido sujeto al proceso de dopado, se denomina un **material extrínseco**.

Existen dos materiales extrínsecos de gran importancia para la fabricación de dispositivos semiconductores: el tipo-n y el tipo-p.

### Material tipo - n

Tanto el material tipo-n como tipo-p se forman mediante el dopado. Esto es la adición de un número predeterminado de átomos de impurezas al germanio o al silicio.

El tipo-n se crea a través de la introducción de elementos de impureza que poseen cinco electrones de valencia (pentavalentes) como ejemplos se encuentran: el antimonio, el arsenico, el fósforo. El efecto de estos elementos impuros se observa en la figura 2.6 y 2.7

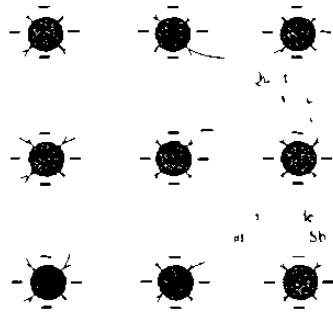


Figura.2.6 Impurezas de boro en el material tipo-p

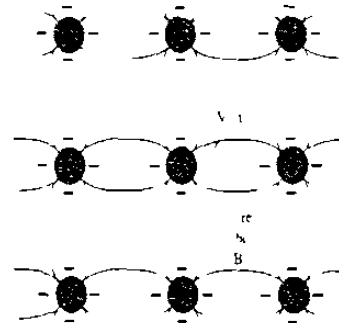


Figura 2.7 Impurezas de antimonio en el material tipo-n

Las cuatro uniones covalentes se encuentran presentes, pero existe un quinto electrón debido al átomo de impurezas, éste se encuentra desasociado de cualquier unión covalente. Este electrón restante se encuentra libre para poder moverse dentro del recién formado material tipo-n.

A las impurezas difundidas con cinco electrones de valencia se les llama: **átomos donadores**.

### Material tipo - p

El material tipo-p se forma mediante el dopado de un cristal puro de germanio ó de silicio con átomos de impureza que poseen tres electrones de valencia.

Los elementos más utilizados son: el boro, galio e indio. El efecto de alguno de estos elementos como el boro sobre el silicio se muestra en la figura 2.6

ahora existe un número de electrones insuficiente para completar las uniones covalentes de la red cristalina recién formada. A la vacante que resulte se llama: hueco y esta representado por un pequeño círculo o signo positivo debido a la ausencia de una carga negativa. Por lo tanto, la vacante resultante aceptará o recibirá con facilidad un electrón "libre".

A las impurezas difundidas con tres electrones de valencia se les conoce como **átomos receptores**.

Si un electrón de valencia adquiere suficiente energía cinética para romper su unión covalente y llena un hueco, entonces se creará un hueco en la unión covalente que liberó el electrón, por lo tanto existirá una transferencia de huecos hacia la izquierda y de electrones a la derecha esto se muestra en la figura 2.8

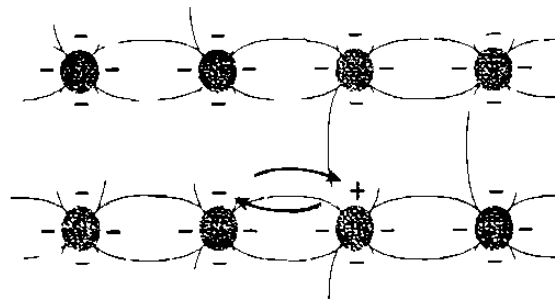


Figura 2.8 Flujo de electrones en función del flujo de huecos

### Portadores mayoritarios y minoritarios

En un material **tipo-n** al electrón se le llama: **portador mayoritario** y al hueco se le llama **portador minoritario**. figura 2.9a

En un material **tipo-p** el hueco es el **portador mayoritario** y el electrón es el **portador minoritario** figura 2.9b

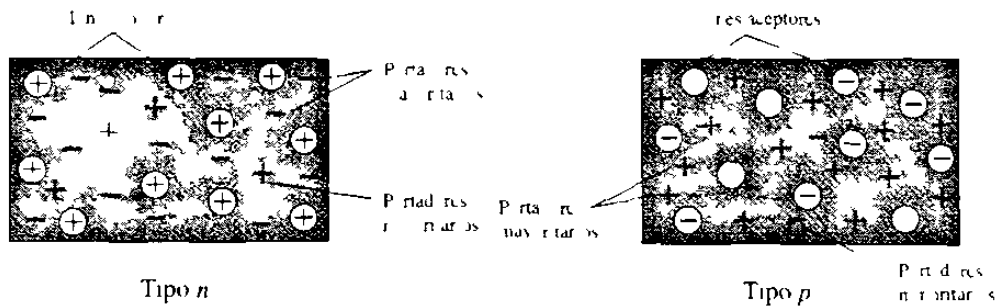


Figura 2.9 a  
Material tipo-n

Figura 2.9 b  
Material tipo-p

## 2.4 DIODO SEMICONDUCTOR

El diodo semiconductor se forma con solo juntar un material tipo-p con un material tipo-n. En el momento en que son "unidos" los dos materiales, los electrones y los huecos en la región de la unión se combinan, dando por resultado una falta de portadores en la región cercana a la unión.

A esta región de iones positivos y negativos descubiertos se le llama: **región de agotamiento**, éste es debido al agotamiento de portadores en esa región.

**Sin polarización aplicada (  $V_D = 0V$  )**

En ausencia de un voltaje de polarización aplicado, el flujo neto de la carga en cualquier dirección para un diodo semiconductor es cero figura 2.10



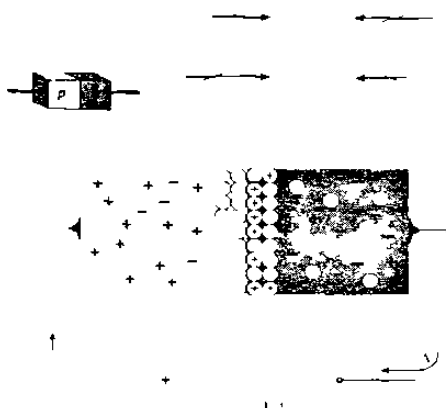


Figura 2.10  
Union p-n sin polarización externa

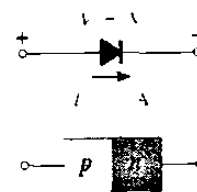


Figura 2.11  
Diodo semiconductor sin polarización

El símbolo para un diodo semiconductor se muestra en la figura 2.11 con las regiones tipo-p y tipo-n asociadas. La flecha está asociada con el componente tipo-p y la barra con la región tipo-n, llamados ánodo y cátodo respectivamente.

### Polarización inversa ( $V_D < 0 \text{ V}$ )

Si un potencial externo de voltaje, se aplica a través de la unión p-n de modo que la terminal positiva se encuentre conectada con el material tipo-n y la terminal negativa, conectada con el material tipo-p como se muestra en la figura 2.12 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. Lo mismo ocurre con el número de iones negativos los cuales se incrementarán en el material tipo-p. Debido a esto, la región de agotamiento se ampliará y se establecerá una barrera de potencial demasiado grande para ser superada por los portadores mayoritarios.

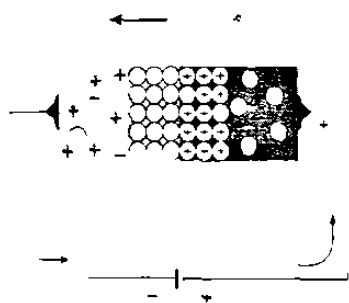


Figura 2.12  
Unión p-n con polarización inversa

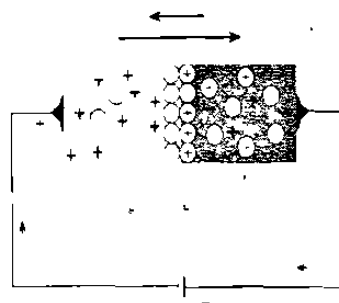


Figura 2.13  
Unión p-n con polarización directa

A la corriente que existe bajo las condiciones de polarización inversa se llama **corriente de saturación inversa** y se representa mediante  $I_s$ .

La corriente de saturación inversa rara vez es mayor que unos cuantos microamperes, con excepción de los dispositivos de alta potencia. Por lo regular se encuentran en el rango de nanoamperes para dispositivos de silicio y en el rango de microamperes para dispositivos de germanio.

### Polarización Directa ( $V_D > 0 V$ )

Una condición de polarización directa ó “encendido” 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 2.13

**Un diodo semiconductor tiene polarización directa cuando se ha establecido la asociación tipo-p y positivo y tipo-n y negativo.**

La aplicación de un potencial de polarización directa  $V_D$  “presionará” los electrones en el material tipo-n y los huecos en el material tipo-p para que se recombinen con los iones cercanos a la unión y reducirá el ancho de la región de agotamiento, esto ha generado un gran flujo de portadores mayoritarios a través de la unión, debido a la pequeña región de agotamiento y a una fuerte atracción del potencial positivo aplicado al

material tipo-p. Mientras se incrementa en magnitud la polarización aplicada, la región de agotamiento continuara disminuyendo su anchura hasta que un flujo de electrones pueda pasar a través de la unión, esto da como resultado un incremento exponencial en la corriente, en general el voltaje a través de un diodo de polarización directa sera de menos de 1V, ésto se muestra en la figura 2.14

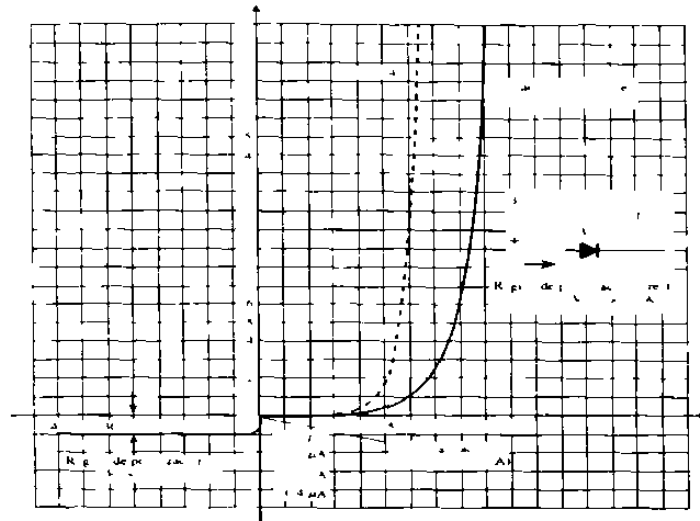


Figura 2.14 Características del diodo semiconductor de silicio

A través del empleo de la física del estado sólido se puede demostrar que las características generales de un diodo semiconductor se pueden definir mediante la siguiente ecuación:

$$I = I_s (e^{K/V} - 1)$$

donde  $I_s$  = corriente de saturación inversa.

$$K = 11600 / \eta \text{ con } \eta = 1 \text{ para el germanio y } \eta = 2 \text{ para el silicio}$$

$$T_k = T_c + 273$$

por lo tanto tenemos que:

$$I = I_s (e^{K/V} - 1)$$

Para valores positivos de  $V_D$  el primer termino de la ecuacion anterior crecera con mayor rapidez y superara el efecto de segundo termino.

El resultado sera positivo para los valores positivos de  $V_D$  e  $I_D$  y crecera en forma exponencial. Para valores negativos de  $V_D$  el primer termino disminuira rapidamente debajo de  $I_S$  dando como resultado  $I_D \approx -I_S$  en la figura 2.14

Para los valores positivos de  $I_D$  la escala se encuentra en miliamperes y la escala de corriente abajo del eje se encuentra en microamperes ó nanoamperes. Para  $V_D$  la escala para los valores positivos están en décimas de volts y para los valores negativos la escala se encuentra en decenas de volts.

### Diodo de silicio con respecto al diodo de germanio

Los diodos de silicio tienen un PIV ( Voltaje de Pico Inverso ) y un valor de corriente mas altos, y rangos mas amplios de temperatura que los diodos de germanio. El PIV de silicio es 1000V y para el germanio 400V. En las aplicaciones de temperatura el silicio opera alrededor de 200 °C ( 400 °F ) y el germanio 100°C.

Segun se observa en la figura 2.15 el silicio requiere de 0.7V para alcanzar la region de conduccion y de 0.3V para el germanio. El potencial por el cual ocurre este crecimiento se conoce como: **potencial de conducción de umbral ó de encendido.**

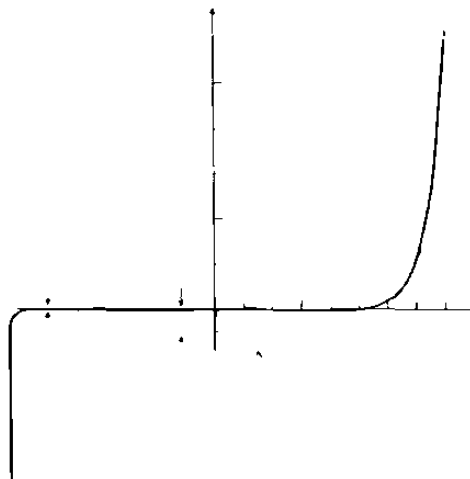


Figura 2.15 Comparación de diodos semiconductores de Si y Ge

## 2.5 NIVELES DE RESISTENCIA

Cuando el punto de operación de un diodo se mueve desde una región a otra, la resistencia del diodo también cambiará debido a la forma no lineal de la curva característica.

### Resistencia de cd ó estática

La aplicación de un voltaje de cd a un circuito que contiene un diodo semiconductor dará como resultado un punto de operación sobre la curva característica que no cambiará con el tiempo. La resistencia del diodo en el punto de operación se encuentra localizando los puntos de  $V_D$  e  $I_D$  como se muestra en la figura 2.16 por lo tanto.

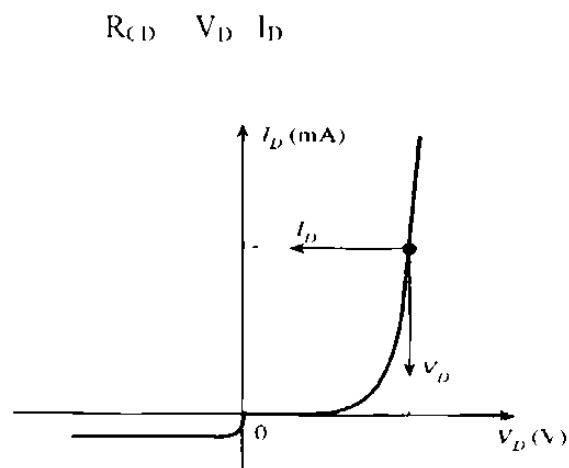


Figura 2.16 Determinación de la resistencia estática

**Ejemplo 2.1** Determine los niveles de resistencia de cd para el siguiente diodo de la figura 2.17.

a)  $I_D = 2\text{mA}$

b)  $I_D = 20\text{mA}$

c)  $V_D = -10\text{V}$

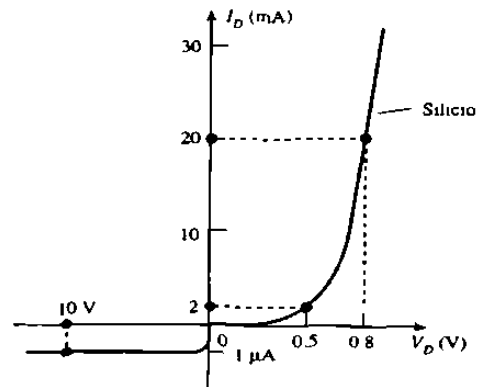


Figura 2.17 Grafica del ejemplo 2.1

**Solución:**

- a) En  $I_D = 2\text{mA}$ ,  $V_D = 0.5\text{V}$  de la curva  
 $R_{CD} = V_D / I_D$   
 $R_{CD} = 0.5\text{V} / 2\text{mA} = 250\ \Omega$
- b) En  $I_D = 20\text{mA}$ ,  $V_D = 0.8\text{V}$  de la curva:
- c) En  $V_D = -10\text{V}$ ,  $I_D = -I_s = -1\text{microAmp.}$  de la curva

**Resistencia en ac ó dinámica**

Si aplicamos una señal senoidal en lugar de una entrada de cd la situación cambiara por completo. La entrada variante desplazara de manera instantanea el punto de operacion hacia arriba y abajo en una región de las características y por lo tanto, define un cambio específico en corriente y voltaje como lo muestra la figura 2.18 Sin

aplicar una variación de señal en la entrada el punto de operación sería el punto Q el cual se deriva de la palabra en inglés quiescent que significa estable ó sin variación.

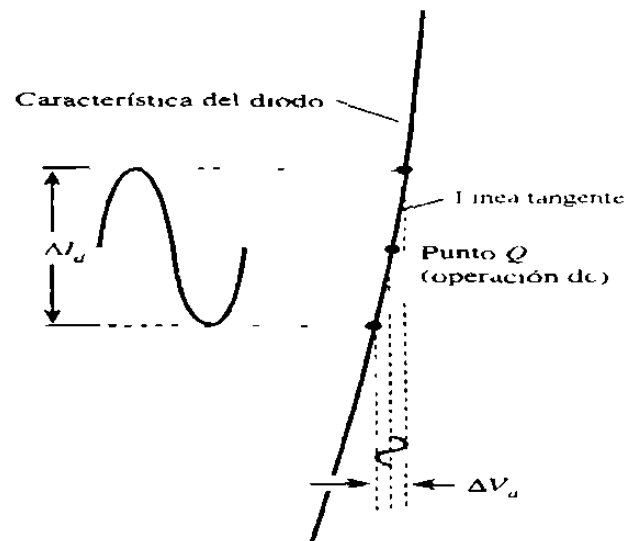


Figura 2.18 Definición de la resistencia dinámica ó en ac

Una línea recta dibujada tangencialmente a la curva a través del punto Q como se muestra en la figura 2.19 definirá un cambio en particular en el voltaje, así como en la corriente que pueden ser utilizados para determinar la resistencia en **ac** ó **dinámica**.

para esta region en las características del diodo, por lo tanto:

$$R_{din} = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d}$$

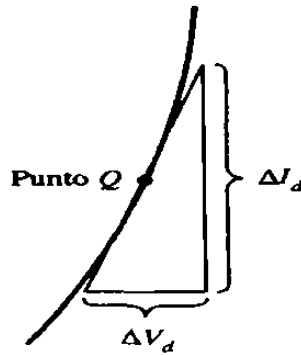


Figura 2.19 Determinación de la resistencia en ac en un punto Q

Mientras mayor sea la pendiente, menor será el valor de  $\Delta V_D$  para el mismo cambio en  $\Delta I_D$  y menor será la resistencia. La resistencia ac en la región de crecimiento vertical de la característica es por tanto, muy pequeña, mientras que la resistencia ac es mucho más alta en los niveles de corriente bajos.

**Ejemplo 2.2** para las características de la figura 2.20

- Determinar la resistencia en ac en  $I_D = 2\text{mA}$
- Determinar la resistencia en ac en  $I_D = 25\text{mA}$
- Comparar los resultados de los incisos a y b con las resistencias en dc a cada nivel.

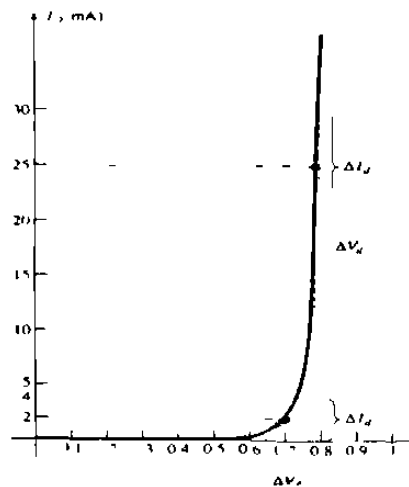


Figura 2.20 Gráfica del ejemplo 2.2



**Solución:**

a) Para  $I_D = 2 \text{ mA}$ , la línea tangente a  $I_D = 2 \text{ mA}$  se dibujo como se muestra en la figura 2.20 y se escogió un intervalo de 2 mA arriba y abajo de la corriente especificada del diodo. Para  $I_D = 4 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.76 \text{ V}$  y para  $I_D = 0 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.65 \text{ V}$ . Los cambios resultantes en corriente y voltaje son:

$$\Delta I_D = 4 \text{ mA} - 0 \text{ mA} = 4 \text{ mA.}$$

$$\Delta V_D = 0.76 \text{ V} - 0.65 \text{ V} = 0.11 \text{ V.}$$

y la resistencia de ca será:

$$r_d = \Delta V_D / \Delta I_D = 0.11 \text{ V} / 4 \text{ mA} = 27.5 \Omega$$

b) Para  $I_D = 25 \text{ mA}$ ; la línea tangente a  $I_D = 25 \text{ mA}$  se dibujo como se muestra en la figura 2.20 y se escogió un intervalo de 5 mA arriba y abajo de la corriente especificada del diodo. Para  $I_D = 30 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.8 \text{ V}$  y para  $I_D = 20 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.78 \text{ V}$ . Los cambios que resultan en corriente y voltaje son :

$$\Delta I_D = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA.}$$

$$\Delta V_D = 0.8 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 0.02 \text{ V}$$

y la resistencia de ca sera:

$$r_d = \Delta V_D / \Delta I_D = 0.02 \text{ V} / 10 \text{ mA} = 2 \Omega$$

c) Para  $I_D = 2 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.7 \text{ V}$  se tiene que:

$$R_D = V_D / I_D = 0.7 \text{ V} / 2 \text{ mA} = 350 \Omega$$

La cual excede con mucho la  $r_d = 27 \Omega$ .

Para  $I_D = 25 \text{ mA}$ ,  $V_D = 0.79 \text{ V}$  se tiene entonces :

$$R_D = \frac{V}{I_D} = \frac{0.79 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 31.62 \Omega$$

$I$  o cual excede la  $r_d$  de  $2 \Omega$

Se ha encontrado la resistencia dinámica en forma grafica, pero existe una definición básica en el cálculo diferencial que establece:

La derivada de una función en un punto es igual a la pendiente de la línea tangente dibujada en dicho punto.

Si se encuentra la derivada de la ecuación general para el diodo semiconductor con respecto a la polarización directa aplicada, y luego se invierte el resultado, se tendrá una ecuación para la resistencia dinámica ó ac en esa región, esto es :

$$\frac{d}{dt} (I) = \frac{d}{dV} [I (e^{kV} - 1)]$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{k}{I_A} (I + I_A)$$

siguiendo unas cuantas manipulaciones básicas de cálculo diferencial se tiene: como  $I_D = I_S$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{k}{I_A} I$$

sustituyendo  $\eta = 1$  para el Ge y el Si en la sección de aumento vertical de las características, obtenemos :

$$k = \frac{11.600}{\eta} = \frac{11.600}{1} = 11.600$$

a temperatura ambiente:

$$I_A = I_C + 273 = 25 + 273 = 298$$

por lo que:

$$\frac{k}{T_k} = \frac{11.600}{298} - 38.93$$

$$\frac{dI}{dV} = -38.93I$$

Invertiendo el resultado para definir una relacion de la resistencia (  $R = V/I$  ) se obtiene:

$$\frac{dV}{dI} = 0.026$$

$$r_{din} = \frac{26mV}{I} \quad \text{en } \Omega$$

### Resistencia en ac promedio

Si la señal de entrada es lo suficientemente grande para producir una gran excursion tal como lo indica la figura 2.21 a la resistencia asociada con el dispositivo para esta region se le llama: **resistencia en ac promedio** por lo tanto, la resistencia determinada por una linea recta dibujada entre dos intersecciones establecidas por unos valores maximos y minimos del voltaje de entrada en forma de ecuacion será:

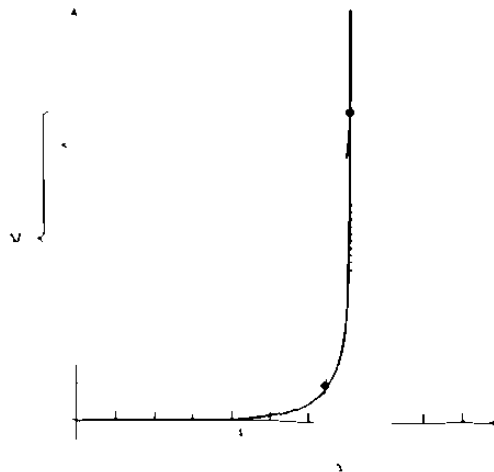


Figura 2.21 Determinacion de la resistencia en ac promedio entre Los limites indicados

$$r_{av} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \text{ p.e. p.e. p.e.}$$

Para la situación presentada en la figura 2.21 se tiene .

$$\Delta I_d = 17 \text{ mA} - 2 \text{ mA}$$

$$\Delta I_d = 15 \text{ mA}$$

$$\Delta V_d = 0.725 \text{ V} - 0.65 \text{ V}$$

$$\Delta V_d = 0.075 \text{ V.}$$

$$r_{av} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.075 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = 5 \Omega$$

$$r_{av} = 5 \Omega$$



Tipo	Función	Características	Determinación gráfica
		$x$ $y$ $u$	
AC	$V$ $6 \text{ V}$ $V$	Límite de potencia Límite de temperatura Límite de Q	
	$V$ $V$	$x$ $x$ $x$ $x$ $x$ $x$ $x$ $x$	

Tabla 2.1 Niveles de resistencia

## CAPITULO 3

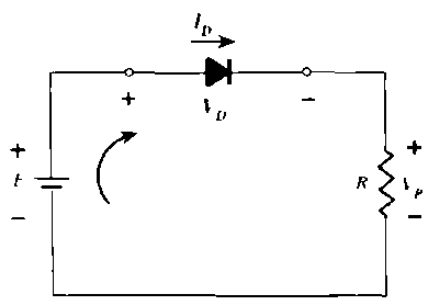
### APLICACIONES DE LOS DIODOS

#### 3.1 ANÁLISIS MEDIANTE LA RECTA DE CARGA

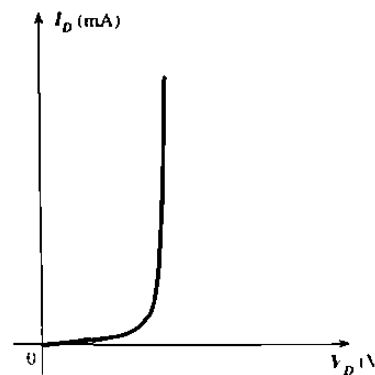
La carga aplicada tendrá un impacto importante en el punto ó región de operación del dispositivo. La intersección de la recta de carga con la curva característica determinara el punto de operación del sistema. A este analisis se le llama **análisis mediante la recta de carga**. La red de la figura 3.1a utiliza un diodo el cuál tiene las características de la figura 3.1b. Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito en serie obtenemos:

$$E - V_D - V_R = 0$$

$$E = V_D + I_D R$$



a



b

Figura 3.1 Configuración de diodo en serie, circuito y curva característica

Las dos variables de la ecuación anterior son  $V_D$  e  $I_D$  y son las mismas que las variables de los ejes del diodo. Las intersecciones de la recta de carga sobre las características pueden determinarse con facilidad si se considera que en cualquier lugar del eje horizontal  $I_D = 0A$  y que en cualquier lugar del eje vertical  $V_D = 0V$ .

Si se establece  $V_D = 0V$  en la misma ecuación y se resuelve para  $I_D$ , se tiene una magnitud de  $I_D$  sobre el eje vertical, por lo tanto:

$$E = V_D + I_D R$$

$$E = 0V + I_D R$$

$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{V_D}{R}$$

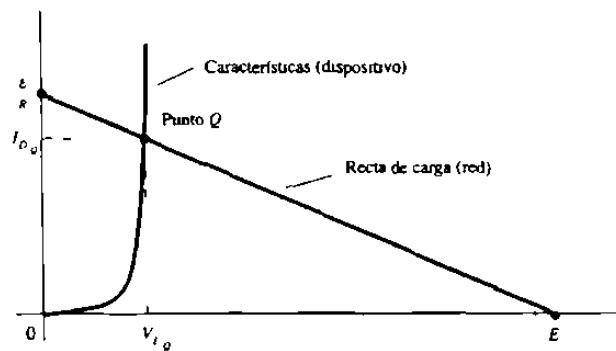


Figura 3.2 Recta de carga y selección del punto de operación

Como lo indica la figura 3.2. Si se establece  $I_D = 0A$  y se resuelve para  $V_D$ , se tiene la magnitud de  $V_D$  sobre el eje vertical. Por lo tanto con  $I_D = 0A$  se convierte en

$$E = V_D + I_D$$

$$E = V_D + 0AR$$

$$V_D = E - I_D R$$

Una línea recta dibujada entre los dos puntos definirá una recta de carga, si se cambia el nivel de la  $R$  ( la carga ) cambiara la intersección sobre el eje vertical. El punto de intersección entre las dos, es el punto de operación para este circuito

Mediante el sencillo dibujo de una línea recta hacia abajo hasta el eje horizontal puede determinarse el voltaje del diodo  $V_{DQ}$  mientras que una línea horizontal a partir del punto de intersección y hasta el eje vertical dará el nivel de  $I_{DQ}$ . Al punto de operación se le llama **punto estable** y refleja sus cualidades de "estable y sin movimiento."

**Ejemplo 3.1** - Para la configuración de diodo en serie de la figura 3.3a y empleando las características del diodo de la figura 3.3b determine:

- $V_{DQ}$  e  $I_{DQ}$
- $V_R$

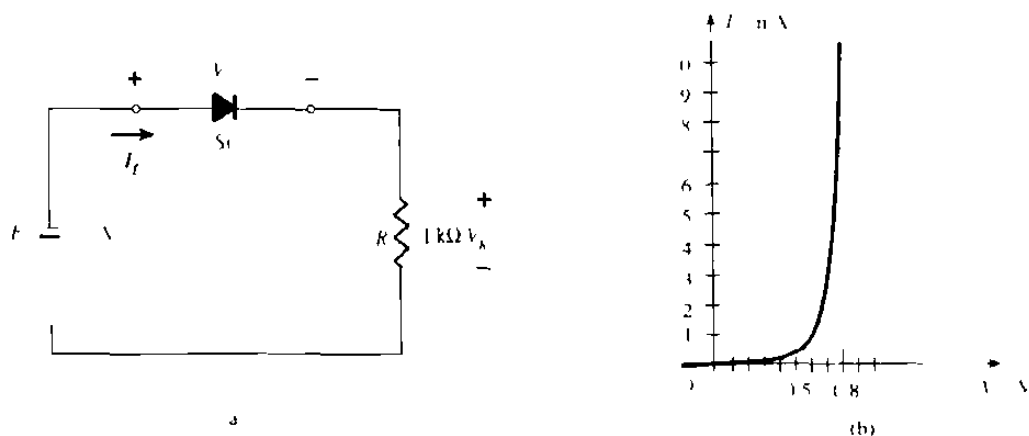


Figura 3.3a y 3.3b Circuito y características del ejemplo 3.1

**Solución:**

$$a) \quad I_D = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10\text{ V} - 0.7\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 9.3\text{ mA}$$

$$I_D = 10\text{ mA}$$

$$V_D = E - I_D R = 10\text{ V} - 9.3\text{ mA} \cdot 1\text{ k}\Omega = 0.7\text{ V}$$

La recta de carga resultante aparece en la figura 3.4. La intersección entre la recta de carga y la curva característica define el punto Q como:

$$V_{DQ} = 0.78 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = 9.25 \text{ mA}$$

$$b) \quad V_R = I_R R = I_{DQ} R = (9.25 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega) = 9.25 \text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 10 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 9.22 \text{ V}$$

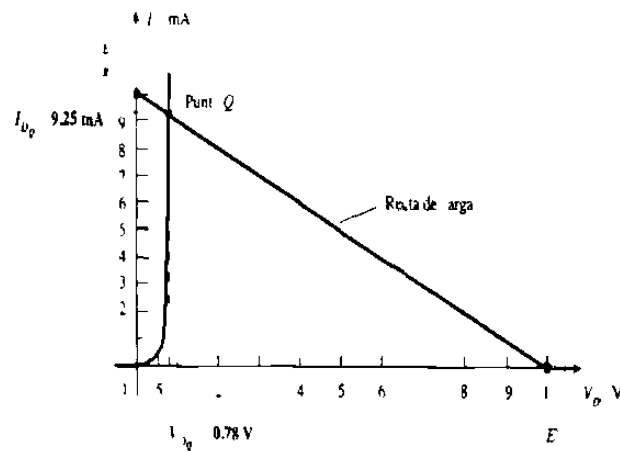


Figura 3.4 Solución del ejemplo 3.1

### 3.2 CIRCUITOS CON CONFIGURACIONES DE DIODOS EN SERIE CON ENTRADAS DE CD

**Ejemplo 3.2** Para el siguiente circuito de la figura 3.5 obtener:

a)  $V_D$

b)  $V_R$

c)  $I_D$



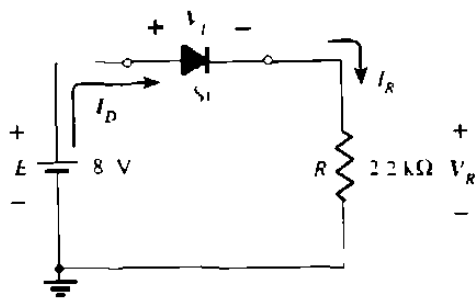


Figura 3.5 Circuito para el ejemplo 3.2

**Solución:**

$$V_D = 0.7 \text{ V}$$

$$V_R = E - V_D = 8 \text{ V} - 0.7 \text{ V} = 7.3 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7.3 \text{ V}}{2.2 \text{ k}\Omega} = 3.32 \text{ mA}$$

**Ejemplo 3.3.-** Determine  $V_O$  e  $I_D$  para el circuito en serie de la figura 3.6

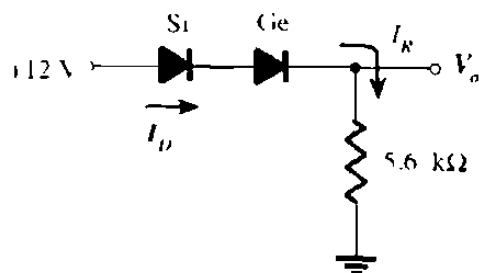


Figura 3.6 Circuito para el ejemplo 3.3.

**Solución:**

$$V_O = E - V_{S1} - V_{Ge} = 12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.3 \text{ V} = 11 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = \frac{V_O}{R} = \frac{11 \text{ V}}{5.6 \text{ k}\Omega} = 1.96 \text{ mA}$$

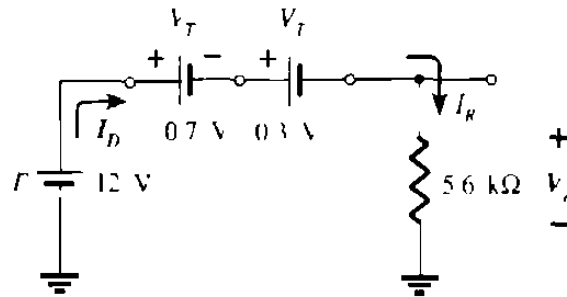


Figura 3.7 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

**Ejemplo 3.4.-** Determine  $I$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ , y  $V_0$  para la configuración de cd en serie de la figura 3.8

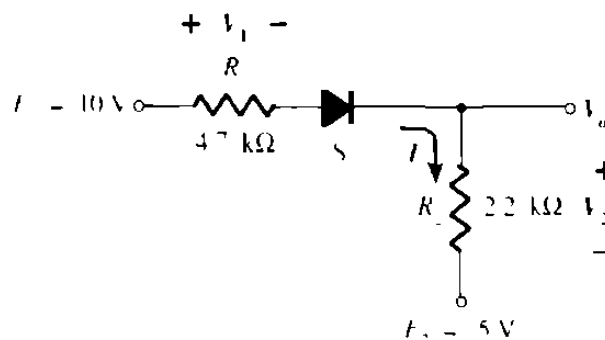


Figura 3.8 Circuito para el ejemplo 3.4

**Solución:-** Se dibujan las fuentes y se determina la dirección de la corriente como se indica en la figura 3.9. Los diodos están en el estado de "conducción" y la notación que aparece en la figura 3.10 se incluye para indicar ese estado.

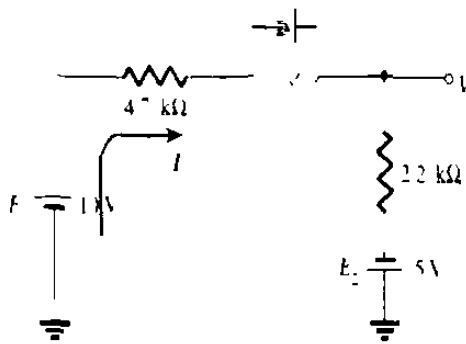


Figura 3.9

Estado del diodo para la red de la figura 3.8

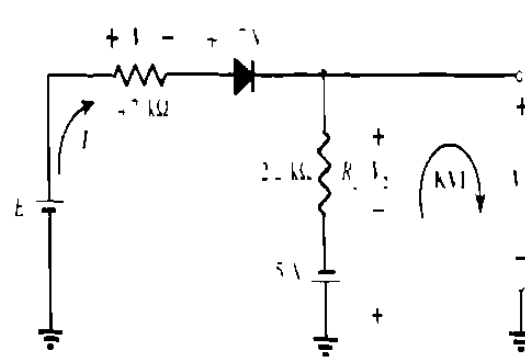


Figura 3.10

Cantidades desconocidas para la red de la figura 3.8

La corriente resultante a través de circuito será:

$$I = (E_1 + E_2 - V_D) / (R_1 + R_2) = (10 \text{ V} + 5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) / (4.7 \text{ k}\Omega + 2.2 \text{ k}\Omega)$$

$$I = 14.3 \text{ V} / 6.9 \text{ k}\Omega = 2.07 \text{ mA}$$

$$V_1 = IR_1 = (2.07 \text{ mA})(4.7 \text{ k}\Omega) = 9.73 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2 = (2.07 \text{ mA})(2.2 \text{ k}\Omega) = 4.55 \text{ V}$$

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff a la sección de la salida en el sentido de las manecillas del reloj tenemos:

$$-I + V_2 - V_D = 0$$

$$V_D = V_2 - I R_2 = 4.55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0.45 \text{ V}$$

### 3.3 CIRCUITOS CON CONFIGURACIÓN DE DIODOS EN PARALELO Y SERIE-PARALELO

**Ejemplo 3.5.-** Determine  $V_O$ ,  $I$ ,  $I_D$  e  $I_{D_2}$  para la configuración de diodo de la figura 3.11

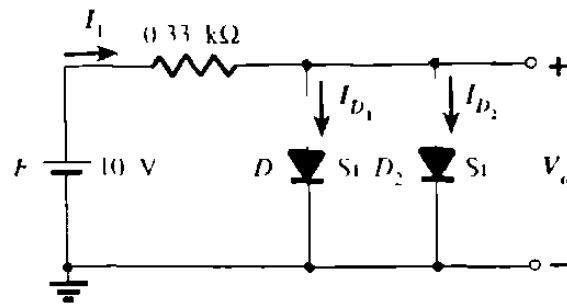


Figura 3.11 Red para el ejemplo 3.3

**Solución:-** para el voltaje  $V_0 = 0.7 \text{ V}$ .

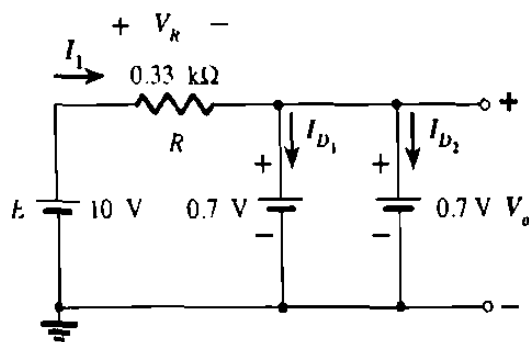


Figura 3.12 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Para la corriente:

$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{E - V_D}{R} = \frac{(10 \text{ V} - 0.7 \text{ V})}{0.33 \text{ k}\Omega}$$

$$I = 28.18 \text{ mA}$$

Suponiendo que los diodos tienen características similares, tenemos.

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I}{2} = \frac{28.18 \text{ mA}}{2} = 14.09 \text{ mA}$$

**Ejemplo 3.6** - Determine la corriente  $I$  para la red de la figura 3.13

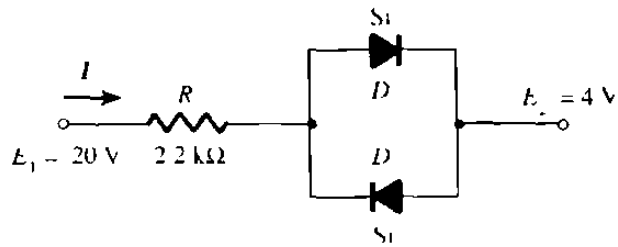


Figura 3.13 Circuito para el ejemplo 3.6

**Solución:-** Se vuelve a dibujar la red como se muestra en la figura 3.14 se observa que la dirección de la corriente resultante es tal que activa el diodo de silicio D1 y desactiva el diodo de silicio D2 por lo tanto la corriente resultante  $I$  será:

$$I = \frac{E_1 - E_2 - V_D}{R} = \frac{(20 \text{ V} - 4 \text{ V} - 0.7 \text{ V})}{2.2 \text{ k}\Omega}$$

$$I = 6.95 \text{ mA}$$

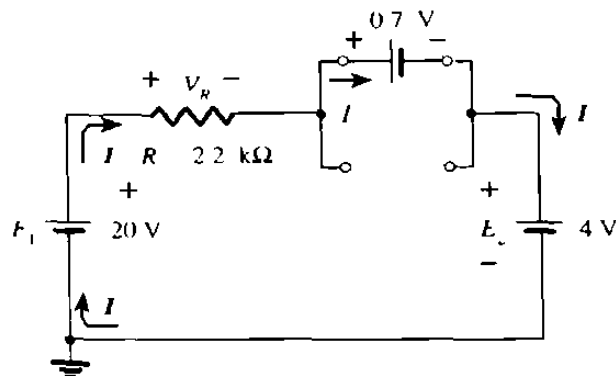


Figura 3.14 Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 3.6

### 3.4 CIRCUITOS CON ENTRADAS SENOIDALES

#### Rectificación de media onda

El análisis de los diodos se ampliará para incluir las funciones variables en el tiempo, tales como la forma de onda senoidal y la onda cuadrada. La red más simple que se examinará con una señal variable en el tiempo aparece en la figura 3.15

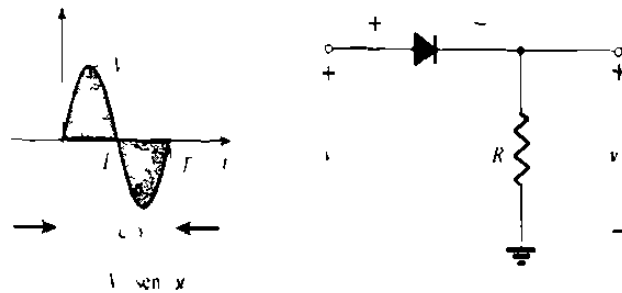


figura 3.15 Circuito rectificador de media onda

Este circuito de la figura es llamado: **rectificador de media onda**, el cual generará una forma de onda  $v_o$ , la cual tendrá un valor promedio de uso particular en el proceso de conversión de ac a cd. Cuando un diodo se usa en el proceso de rectificación, es común que se le llame **rectificador**. Durante el intervalo  $t = 0 \rightarrow T/2$  en la figura 3.15 la polaridad del voltaje aplicado  $v$  es:

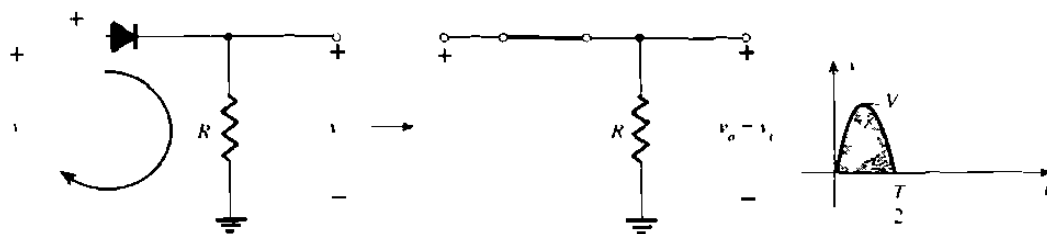


Figura 3.16 Región de conducción ( $0 \rightarrow T/2$ )

como para establecer presion en la direccion que se indica, y encender el diodo con la polaridad indicada arriba del diodo, esto se muestra en la figura 3.16.

Durante el periodo  $T/2 \rightarrow T$ , la polaridad de la entrada  $v$  es como se indica en la figura 3.17 y la polaridad resultante a traves del diodo ideal produce un estado de "apagado" con un equivalente de circuito abierto.

La entrada  $v$  y la salida  $v$  se dibujaron juntas en la figura 3.18 con el proposito de establecer una comparacion. Por lo tanto, la señal de salida  $v$  tiene un area neta positiva arriba del eje sobre un periodo completo, y un valor promedio determinado por:

$$V_{dc} = 0.318 V_m \quad \text{media nd t}$$

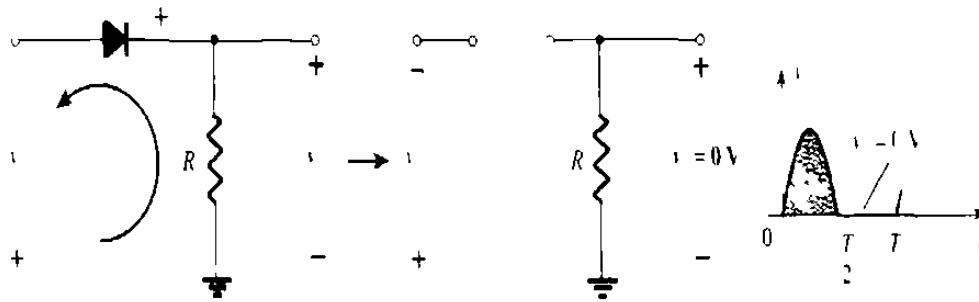


Figura 3.17 Region de no conduccion (  $T/2 \rightarrow T$  )

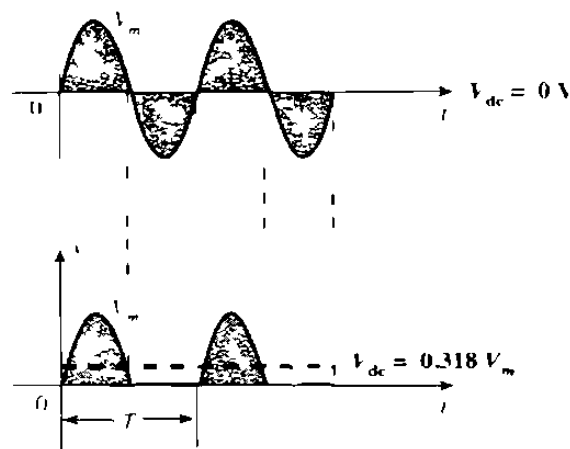


Figura 3.18 Señal rectificada de media onda

El proceso de eliminacion de la mitad de la señal de entrada para establecer un nivel se le llama **rectificador de media onda**.

El efecto del uso de un diodo de silicio con  $V_f = 0.7V$  se señala en la figura 3.19 para la region de polarizacion directa. La señal aplicada debe ser ahora de por lo menos  $0.7V$  antes de que el diodo pueda "encender". Para los niveles de  $v$  menores que  $0.7V$  el diodo aun esta en estado de circuito abierto y  $v = 0$ , como lo indica la misma figura cuando conduce, la diferencia entre  $v_i$  y  $v_o$  se encuentra en un nivel fijo de  $V_f = 0.7V$  y  $v_o = v_i - V_f$  segun se indica en la figura y obtenemos:

$$V_{dc} = 0.318(V_m - V_f)$$

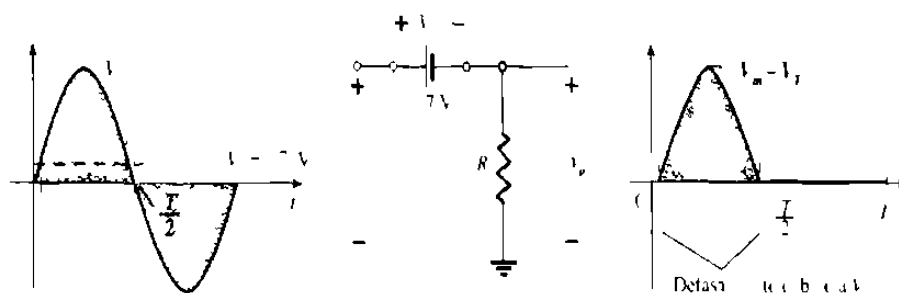


Figura 3.19 Efecto de  $V_f$  sobre la señal rectificada de media onda.

### Ejemplo 3.7.-

- Dibuje la salida  $V_o$  y determine el nivel de cd de la salida para la red de la figura 3.20
- Repetir el inciso ( a ) si el diodo se sustituye por un diodo de silicio.
- Repta los incisos ( a ) y ( b ) si  $V_m$  se incrementa a  $200 V$  y comparar las soluciones



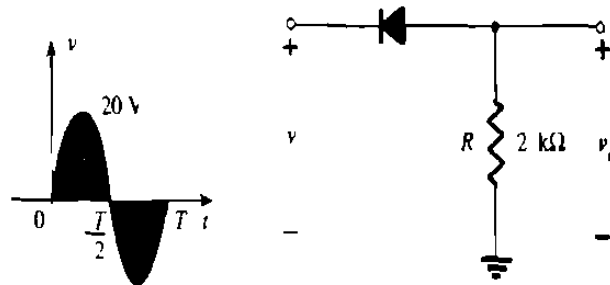


Figura 3.20 Circuito para el ejemplo 3.7

**Solución.-**

( a ) En esta situación el diodo conducirá durante la parte negativa de la entrada, como se ilustra en la figura 3.21 y  $v_o$  aparecerá como se muestra en la misma figura para el periodo completo, el nivel de cd es:

$$V_d = -0.318 V_r = -0.318 ( 20 V ) = -6.36 V$$

El signo negativo indica que la polaridad de la salida es opuesta a la polaridad definida de la figura 3.20.

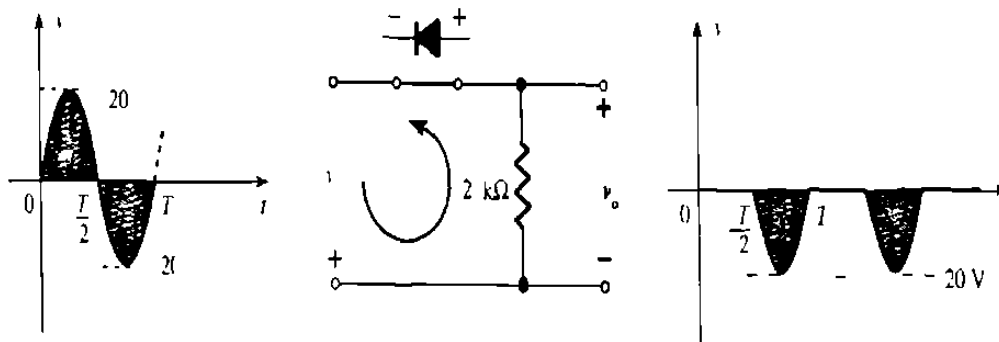


Figura 3.21  $v_o$  resultante para el circuito del ejemplo 3.7

( b ) Al emplear un diodo de silicio, la salida tiene la apariencia de la figura 3.22 y por lo tanto tenemos que :

$$V_{cd} = 0.318 ( V_n - 0.7 \text{ V} ) = 0.318 ( 19.3 \text{ V} ) = 6.14 \text{ V}$$

La caída resultante en el nivel de cd es de 0.22 V.

$$( c ) \quad V_d = 0.318 V_i = 0.318 ( 200 \text{ V} ) = 63.6 \text{ V.}$$

o tambien :

$$V_d = 0.318 ( V_n - V_1 ) = 0.318 ( 200 \text{ V} - 0.7 \text{ V} )$$

$$V_{cd} = (0.318) ( 199.3 \text{ V} ) = 63.38 \text{ V}$$

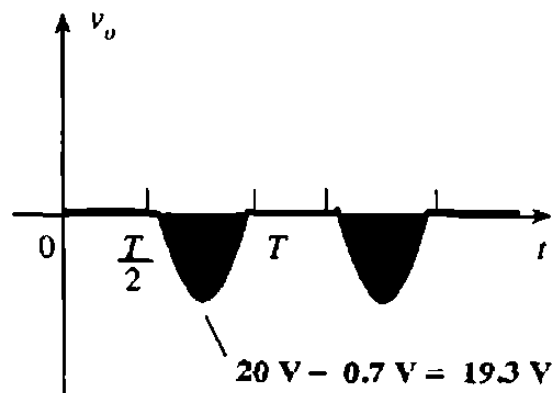


Figura 3.22 Efecto de  $V_1$  sobre la salida de la figura 3.21

La cual es una diferencia que se puede despreciar para la mayoría de las aplicaciones.

### El Voltaje de Pico Inverso PIV ( PRV )

El valor del Voltaje de Pico Inverso ( PIV o PRV ) del diodo es muy importante en el diseño de sistemas de rectificación. Se trata del valor del voltaje que no debe excederse en la región de polarización inversa, pues de otra forma el diodo entrará en la región de avalancha Zener. El valor PIV requerido para el rectificador de media onda puede determinarse a partir de la figura 3.23 esto es:

$$\text{valor PIV} = V_{m \text{ rectificador de media onda}}$$

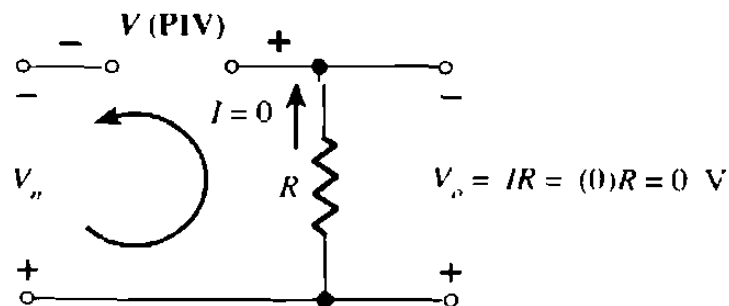


Figura 3.23 Determinación de PIV

### Rectificación de onda completa

- **punte de diodos**

El nivel de  $V_o$  que se obtiene a partir de una entrada senoidal puede mejorar al 100% si se utiliza un proceso que se llama **rectificador de onda completa**. La red más familiar para llevar a cabo tal función aparece en la figura 3.24, con sus cuatro diodos en una configuración en forma de **punte**. Durante el periodo  $t = 0 \rightarrow T/2$  la polaridad de la entrada se muestra en la figura 3.25. Las polaridades resultantes a través de los diodos ideales también se señalan en la figura, para mostrar que  $D_1$  y  $D_3$  están conduciendo, en tanto que  $D_2$  y  $D_4$  se hallan en estado apagado. Esto se observa en la figura 3.26

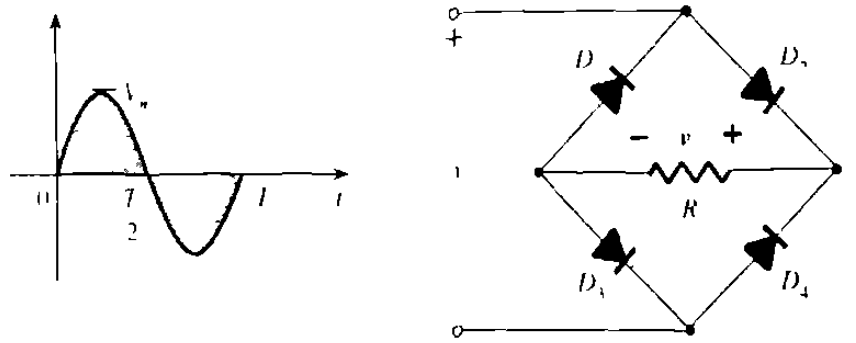


Figura 3.24 Circuito rectificador de onda completa

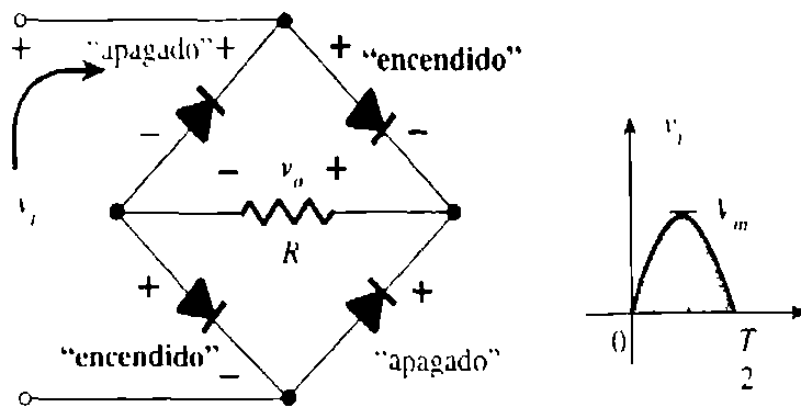


Figura 3.25 Red para el periodo de  $0 \rightarrow T/2$

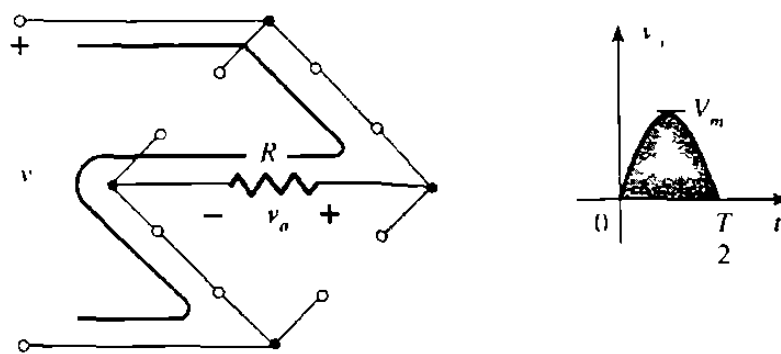


Figura 3.26 Red de conduccion para la region positiva

Para la region negativa de la entrada los diodos conductores son D1y D4 generando la forma de onda de la figura 3.27. La polaridad a traves de la resistencia de carga R es la misma que en la figura 3.25, estableciendo un segundo pulso positivo. Despues de un ciclo completo los voltajes de entrada y de salida se observan en la figura 3.28.

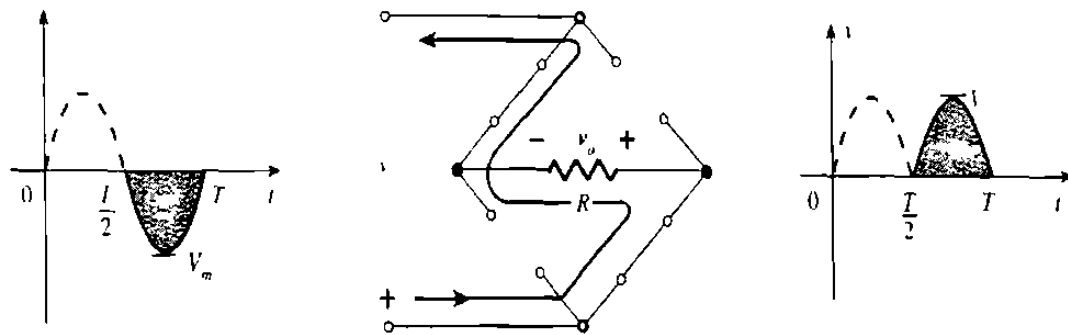


Figura 3.27 Red de conducción para region negativa

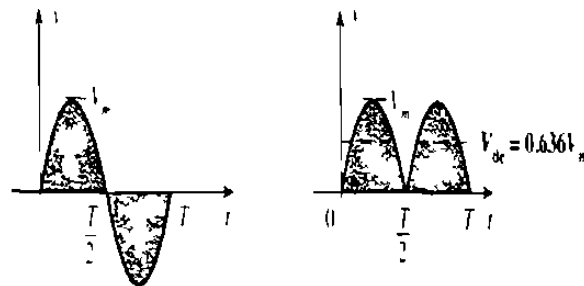


Figura 3.28 Formas de onda de entrada y salida

Ahora para un ciclo completo es el doble en comparación con la obtenida para un sistema de media onda por lo tanto el nivel de cd se ha duplicado, esto es:

$$V_{dc} = 2(0.318V_n)$$

$$V_d = 0.636 V_n \quad \text{onda completa}$$

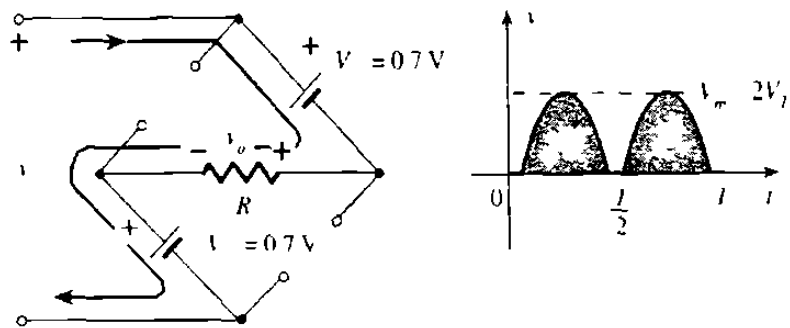


Figura 3.29 Determinación de  $v_{max}$  para la configuración puente

Si se emplean diodos de silicio en lugar de los ideales como se observa en la figura 3.29, esto es:

$$v - V_f - v - V_f = 0$$

$$v_c = v - 2V_f$$

el valor pico para el voltaje de salida  $V$  es por lo tanto:

$$V_{max} = V_n - 2V_f$$

$$V_{dc} = .0636( V_n - 2V_f )$$

**Voltaje de Pico Inverso PIV**

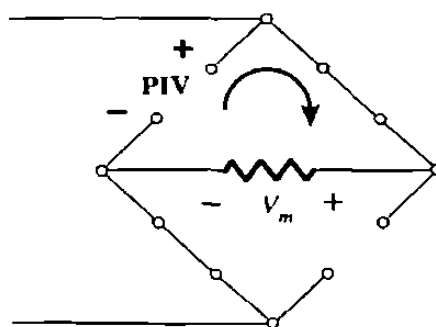


Figura 3.30 Determinación del PIV

El PIV que se requiere para cada diodo ( ideal ) se determina a partir de la figura 3.30 que se obtuvo en el pico de la region positiva de la señal de entrada, el voltaje maximo a traves de R es  $V_T$  y el valor PIV será:

$$PIV > V_T \text{ (rectificador puente de onda completa)}$$

- **derivación central**

Un segundo rectificador de onda completa consta de dos diodos y un transformador con derivacion central, figura 3.31, esto se requiere para establecer la señal de entrada a traves de cada seccion del secundario del transformador. Durante el intervalo positivo de la señal de entrada aplicada al primario del transformador, D1 es un corto circuito y D2 un circuito abierto, el voltaje de salida aparece en la figura 3.32

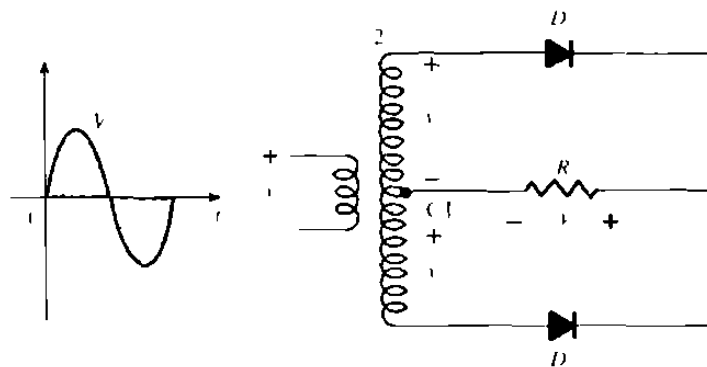


Figura 3.31 Circuito rectificador con derivación central

Durante el intervalo negativo de la señal de entrada se invierten los papeles de los diodos pero manteniendo la misma polaridad para el voltaje a traves de las resistencia de carga R, esto se observa en la figura 3.33

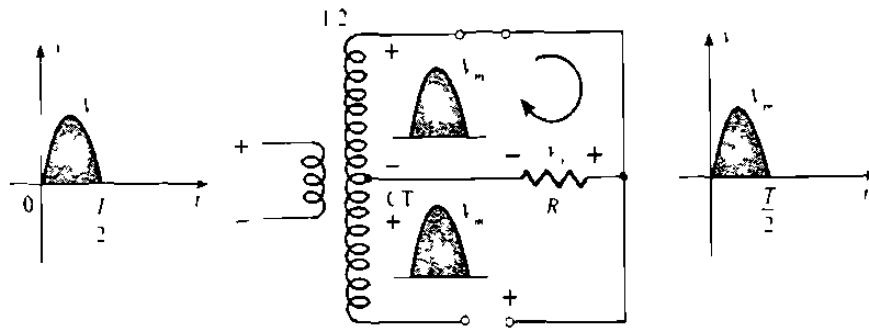


Figura 3.32 Condiciones de la red para la región positiva

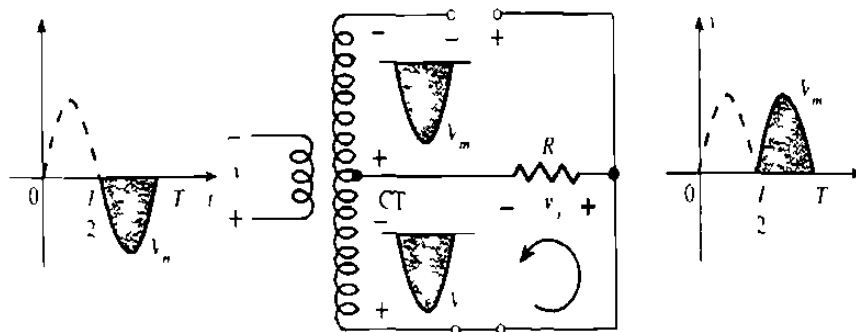


Figura 3.33 Condiciones de la red para la región negativa

### Voltaje de Pico Inverso ( PIV )

$$PIV = V_{c} + V_R + V_m$$

$$V_m + V$$

$$PIV = 2V_m$$

Rectificador de onda completa en puente



**Ejemplo 3.8** - Determine la forma de salida para la red de la figura 3.34 y calcule el nivel de salida de cd y el VPI requerido para cada diodo.

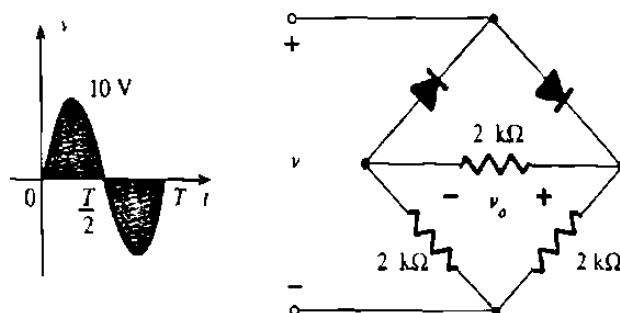


Figura 3.34 Red puente para el ejemplo 3.8

**Solución:**

La red aparecerá como se presenta en la figura 3.35 para la región positiva del voltaje de entrada. Al redibujar la entrada se obtendrá la configuración de la figura 3.36 donde  $v_o = 2 v_i$  o  $V_{o, \text{max}} = 2 (10 \text{ V}) = 20 \text{ V}$ , se muestra en la figura 3.36. En la parte negativa de la entrada se intercambiarán los papeles de los diodos y  $v_o$  aparecerá como se indica en la figura 3.37

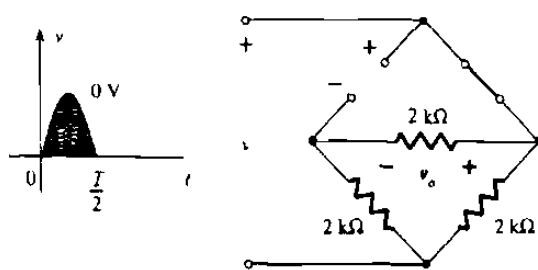


Figura 3.35 Red de la figura 3.34 para la región positiva

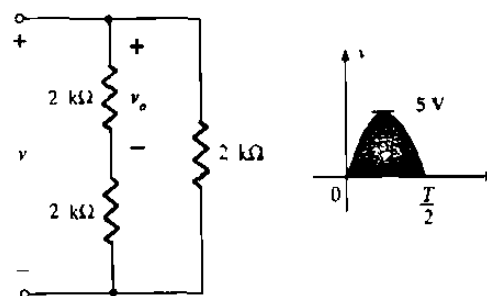


Figura 3.36 Red redibujada de la de la figura 3.35

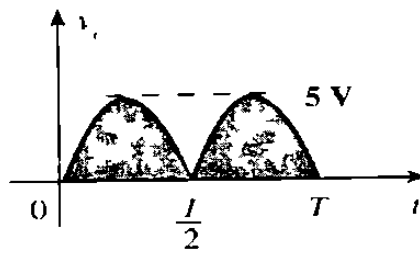


Figura 3 37 Grafica de salida del ejemplo 3.8

El efecto de eliminar los diodos de la configuración puente consistio, en la reduccion del nivel de cd disponible al valor siguiente:

$$V_{cd} = 0.636 ( 5\text{ V} ) = 3.18\text{ V}$$

### 3.5 CIRCUITOS RECORTADORES

Hay una gran variedad de diodos que se llaman "recortadores", éstos tienen la capacidad de recortar una porción de la señal de entrada sin distorsionar la parte restante de la forma de onda alterna. Existen dos categorías generales de recortadores: en **serie** y en **paralelo**. La configuración en serie es donde el diodo está en serie con la carga y la configuración en paralelo tiene un diodo en una trayectoria paralela a la carga.

#### Configuración en serie

Estos son de la misma forma que los rectificadores de media onda (para formas de onda senoidales) y se pueden ver en la figura 3.37. La adición de una fuente de dc como la que se muestra en la figura 3.38 puede tener un efecto pronunciado sobre la salida de un recortador

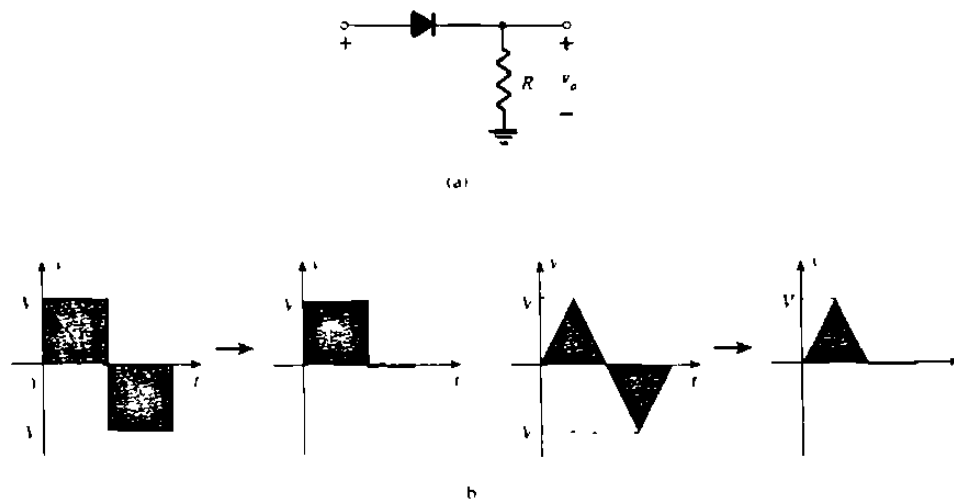


Figura 3.37 Circuitos recortadores en serie

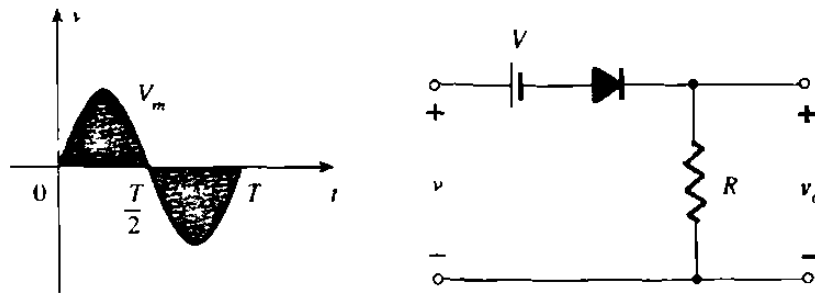


Figura 3.38 Circuito recortador en serie con una fuente de cd.

Para la figura 3.38, la dirección del diodo sugiere que la señal  $v_i$  debe ser positiva para encenderlo. La fuente de cd requiere que sea mayor que el voltaje  $v_i$  para encender el diodo. La región negativa de la señal de entrada está "presionando" al diodo hacia el estado de "apagado", soportado más aun por la fuente de cd.

Se debe estar checando en forma continua las terminales definidas como referencia y la polaridad de  $v_o$ . Para cuando el diodo se encuentra en el estado de corto circuito, como el que se muestra en la figura 3.39, el voltaje de salida  $v_o$ , se puede determinar mediante la aplicación de la ley de voltaje de Kirchhoff, esto es:

$$V - V - v_o = 0 \quad \text{esto es} \quad v_o = V - V$$

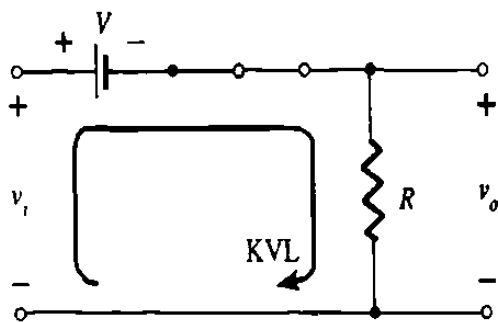


Figura 3.39 Determinación de  $v_o$

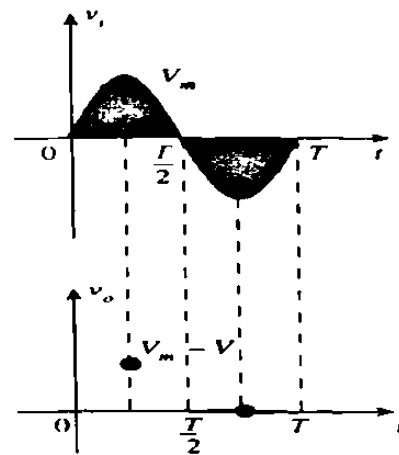


Figura 3.40 Determinación de los niveles de  $v_o$

Se pueden dibujar los voltajes de salida a partir de los puntos de datos resultantes de  $v_i$ . Hay que tomar en cuenta que a un valor instantáneo de  $v_i$  la entrada puede ser tratada como una fuente de dicho valor y el valor de  $v_o$  correspondiente ( el valor instantáneo ) de salida determinada. Por ejemplo, para el caso de  $v_i = V_m$  en la figura 3.38, se analizará la red de la figura 3.41. Para  $V_m = V$  el diodo está en el estado de corto circuito  $v_o = V$ ,  $V$  como en la figura 3.40

Para  $v_i = -V$  los diodos cambian de estado  $v_o = -V_m$ ,  $v_o = 0$  V, y la curva completa para  $v_i$  puede dibujarse como se muestra en la figura 3.43.

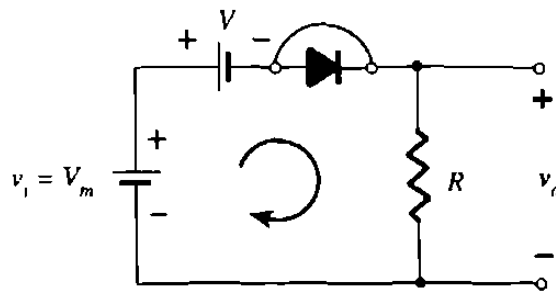


Figura 3.41 Determinación de  $v_o$  cuando  $v_i = V_m$

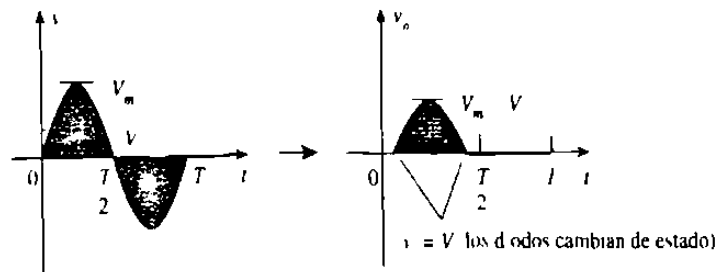


Figura 3.42 Dibujo para  $v_i$

**Ejemplo 3.9.-** Determinar la forma de onda de salida para la red de la figura 3.43

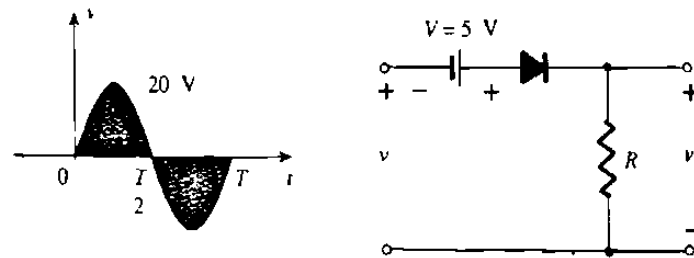


Figura 3.43 Recortador en serie para el ejemplo 3.9

**Solución:**

En este ejemplo el diodo estará en estado "encendido" para la región positiva de  $v_i$ , operará mejor con la ayuda de  $V = 5 \text{ V}$ . La red aparece en la figura 3.44 y  $v_o = v_i + 5 \text{ V}$ . Sustituyendo  $i_d = 0$  para  $v_d = 0$  para los niveles de transición, se obtiene la red de la figura 3.45 y  $v_o = -5 \text{ V}$

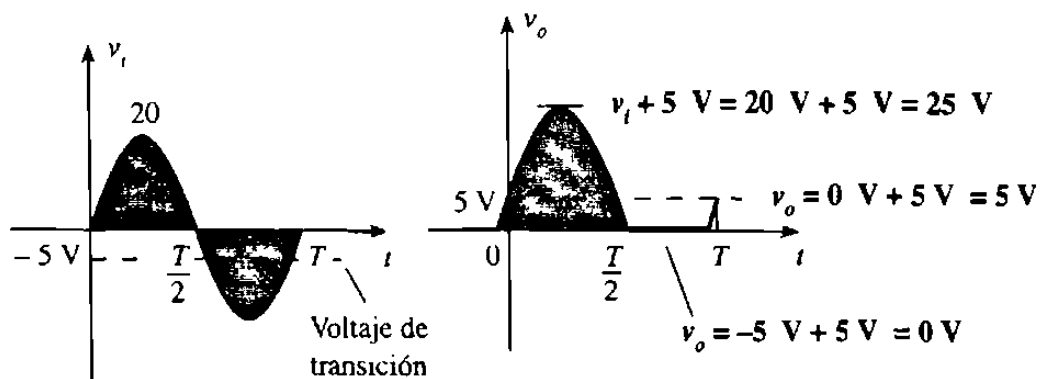


Figura 3.44  $v_i$  con el diodo "encendido"

Figura 3.45 Determinación del nivel de transición de la figura 3.43

Para los valores de  $v$  más negativos que  $-5$  V, el diodo entrara en estado de circuito abierto, mientras que para los voltajes más positivos de  $-5$  V el diodo estará en estado de corto circuito, estos aparecen en la figura 3.46.

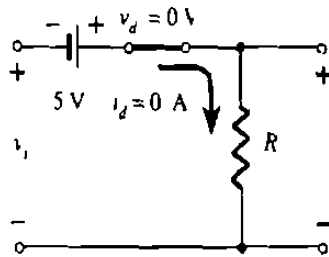


Figura 3.46 Dibujo de  $v$  para el ejemplo 3.9

**Ejemplo 3.10.-** Determinar la forma de onda de salida para la red de la figura 3.47.

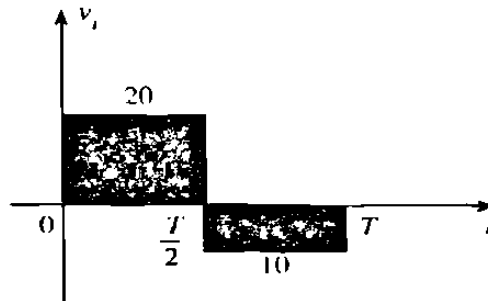


Figura 3.47 Señal aplicada para el ejemplo 3.10

**Solución :-**

Para  $v = 20$  V ( $0 \rightarrow T/2$ ) generará la red de la figura 3.48 el diodo está en el estado de corto circuito y  $v = 20$  V + 5 V = 25 V. Para  $v_i = -10$  V dará como resultado

la figura 3.49, colocando al diodo en "apagado" y  $v_o = i_R R = (0)R = 0$ . este resultado aparece en la figura 3.50.

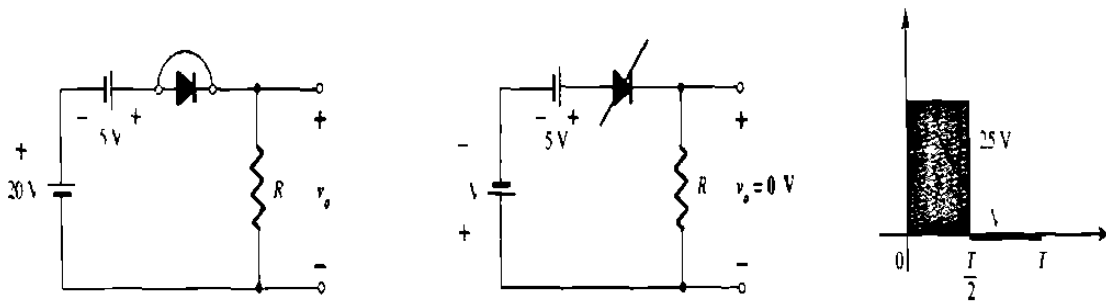


Figura 3.48  $v_a = v_o = +20V$  Figura 3.49  $v_a = v_o = -10V$  Figura 3.50 Dibujo de  $v_o$

**configuración en paralelo**

La red de la figura 3.51 es la mas sencilla de las configuraciones de diodos, en paralelo con la salida. El analisis es muy similar al estudiado anteriormente.

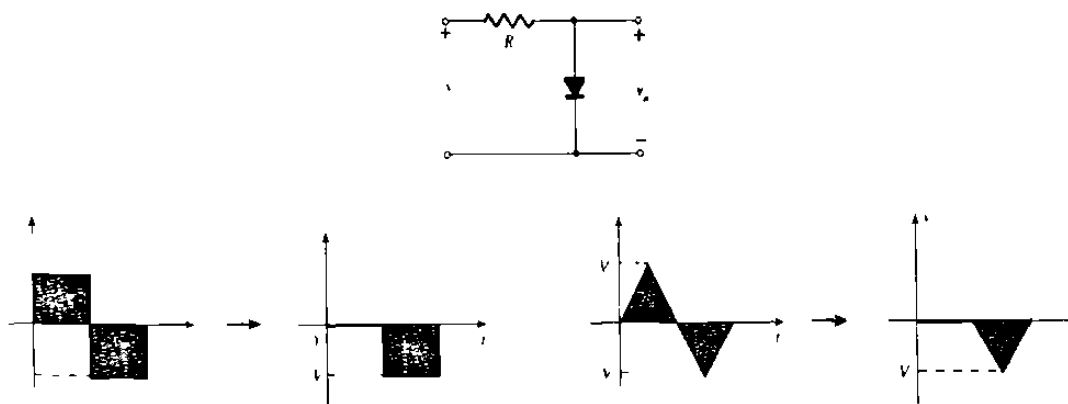


Figura 3.51 Respuesta de un recortador en paralelo



**Ejemplo 3.11.-** Determinar  $v_o$  para la red de la figura 3.52

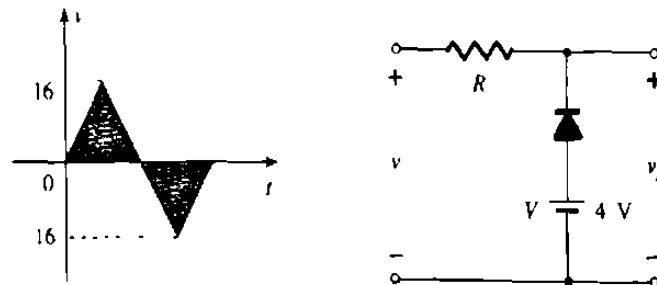


Figura 3.52. Señal de entrada y circuito del ejemplo 3.11

**Solución.-**

La polaridad de la fuente de cd y la dirección del diodo sugieren que el diodo está en estado "encendido" para la región negativa de la señal de entrada. Para esta región la red se muestra en la figura 3.53, donde las terminales definidas para  $v_o$  requieren que  $v_o = V = 4V$ .

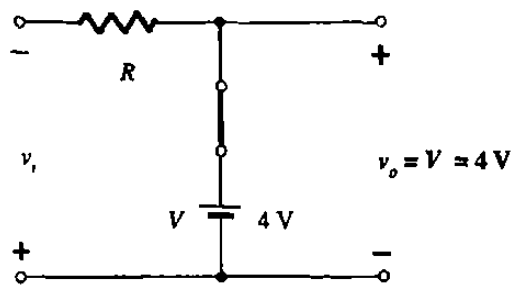


Figura 3.53  $v_o$  para la región negativa de  $v_i$

El estado de transición puede determinarse a partir de la figura 3.54 donde la condición de  $i_D = 0A$  para  $v_i = 0V$  se ha impuesto. El resultado es que  $v_o = V = 4V$ .

Debido a que la fuente se encuentra presionando al diodo para permanecer en estado de circuito cerrado, el voltaje de entrada debe ser mayor a 4 V para que el diodo este en estado de apagado. Cualquier voltaje de entrada menor que 4 V generará un diodo en corto circuito.

Para el estado de circuito abierto la red se muestra en la figura 3.55, donde  $v_R = v_o$ , esto es mostrado en la figura 3.56.

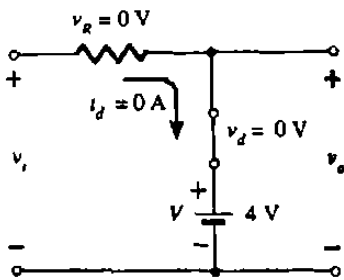


Figura 3.54 Determinación del nivel de transición del ejemplo 3.11

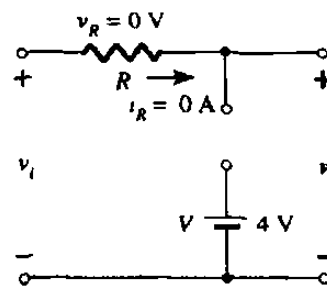


Figura 3.55 Determinación de  $v_i$  para el circuito abierto del diodo

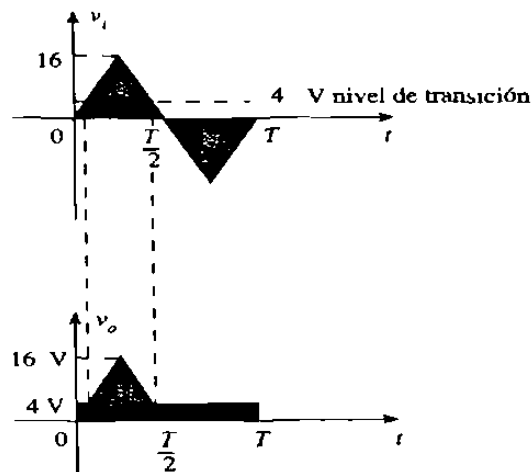


Figura 3.86 Dibujo de  $v_o$  para el ejemplo 3.11

## 2.6 CAMBIADORES DE NIVEL ( SUJETADORES )

Una red de cambiadora de nivel es la que "cambia" una señal a un nivel de cd diferente. La red debe tener un capacitor, un diodo y un elemento resistivo. También se puede tener un nivel de cd independiente para introducir un cambio de nivel adicional de cd.

La magnitud de  $R$  y de  $C$  deben de elegirse de tal forma que la constante de tiempo  $\tau = RC$  sea lo suficientemente grande para asegurar que el voltaje a través del capacitor no se descargue en forma significativa, durante el intervalo en que el diodo no está conduciendo.

En la red de la figura 3.57 se muestra un cambiador de nivel.

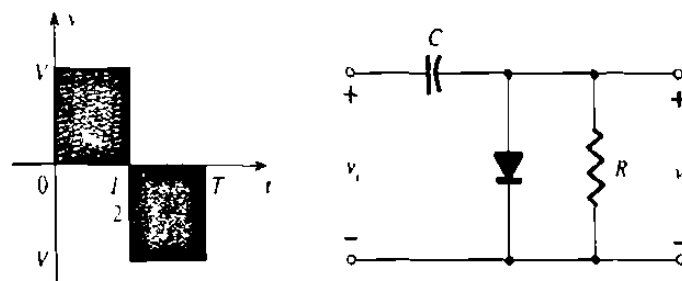


Figura 3.57 Circuito cambiador de nivel

Durante el intervalo de  $0 \rightarrow T/2$  la red se muestra en la figura 3.58, con el diodo en estado de "encendido" efectivamente hace corto circuito el efecto de la  $R$ . Durante este intervalo el voltaje de salida está directamente a través del corto-circuito y  $v_o = 0 \text{ V}$ .

Cuando la entrada cambia al estado de  $-V$ , la red aparece como se muestra en la figura 3.59, con el equivalente de circuito abierto para el diodo determinado por la señal aplicada y el voltaje almacenado a través del capacitor, ambos presionando la corriente a través del diodo desde el cátodo hacia el ánodo.

Ahora la  $R$  se encuentra en la red y la constante de tiempo es lo suficientemente grande para establecer un periodo de descarga  $5\tau$  mucho mayor que el periodo  $T/2 \rightarrow T$ , por lo que el capacitor mantiene toda su carga, y por lo tanto, el voltaje durante este periodo

Debido a que  $v$  está en paralelo con el diodo y la resistencia se puede dibujar en la posición alterna como se muestra en la figura 3.59 dando como resultado:

$$\begin{aligned} -V & \quad V & v & = 0 \\ v & = -2V \end{aligned}$$

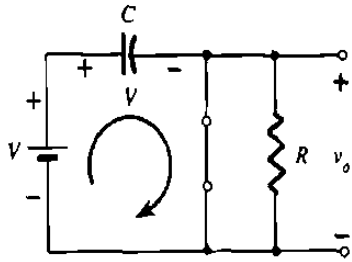


Figura 3.58 Diodo en "encendido"  
capacitor cargando a  $V$  volts

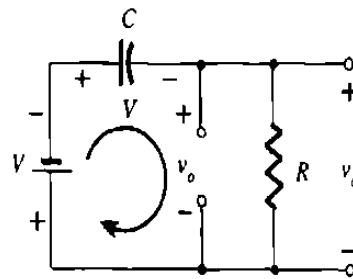


Figura 3.59 Determinación de  $v_o$   
diodo en "apagado"

El signo negativo se debe a que la polaridad de  $2V$  es opuesta a la polaridad definida por  $v_o$ . La forma de onda de salida que resulta aparece en la figura 3.60 junto con la señal de entrada.

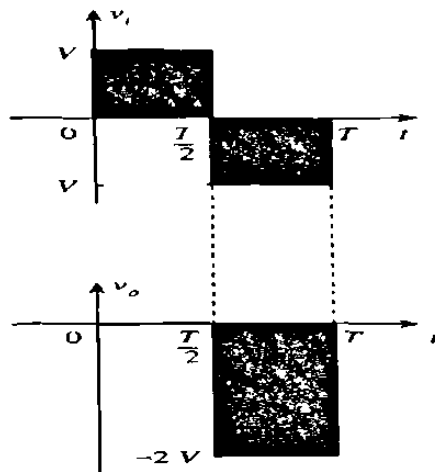


Figura 3.60 Gráfica de  $v_o$  para la red de la figura 3.57

La señal de salida "cambia de nivel" a 0 V durante el intervalo de  $0 \rightarrow T/2$ , pero mantiene la misma excursión de voltaje total ( $2V$ ) que la entrada.

Para una red cambiadora de nivel se debe tener en cuenta lo siguiente:

**La excursión de voltaje total de la señal de salida es igual a la excursión de voltaje total de la señal de entrada.**

Pasos a seguir para analizar las redes cambiadoras de nivel:

1.- iniciar el análisis de las redes mediante la consideración de la parte de la señal de entrada que da polarización directa al diodo.

El paso anterior puede requerir de saltar un intervalo de la señal de entrada.

2.- Durante el período en donde el diodo está en estado "encendido", se asuma que el capacitor se cargara de manera instantánea al nivel de voltaje que determine la red.

3.- Se supondrá que durante el período en que el diodo está en el estado "apagado" el capacitor se mantendrá en el nivel de voltaje que se establece.

4.- A través de todo el análisis debe tenerse un continuo cuidado de la posición y la polaridad de referencia para  $v_c$ , para asegurar que los niveles correctos de  $v_c$  se están obteniendo.

5.- La regla general de que la excursión total de voltaje de salida debe de ser igual a la excursión de voltaje de la señal de entrada.

**Ejemplo 3.12.-** Determinar  $v_c$  para la red de la siguiente figura 3.61 para la entrada que se indica.

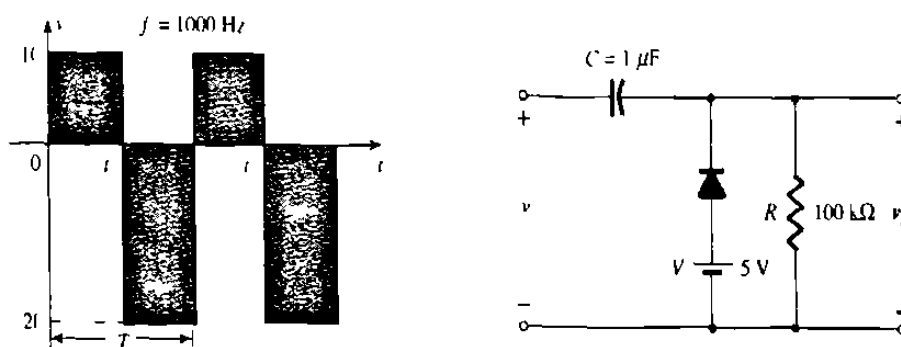


Figura 3.61 Señal de entrada y circuito para el ejemplo 3.12

### Solución:-

Observar que la frecuencia es de 1000 Hz, que resulta en un periodo de 1 ms y un intervalo de 0.5 ms entre niveles. El análisis comenzará con el periodo  $t_1 \rightarrow t_2$  de la señal de entrada, esto es debido a las consideraciones anteriores. Para este intervalo la red se muestra en la figura 3.62. La salida es a través de  $R$ , pero también directamente a través de la batería de 5 V si se sigue la conexión directa entre las terminales definidas para  $v_o$  y las terminales de la batería. El resultado es  $v_o = 5$  V para este intervalo, éste será:

$$-20 \text{ V} + V_C - 5 \text{ V} = 0$$

$$V_C = 25 \text{ V}$$

Por tanto, el capacitor se cargará hasta 25 V, en este caso el diodo no hace cortocircuito con la resistencia  $R$ , pero un circuito equivalente thevenin de la porción de la red que incluye la batería y la resistencia generará  $R_{th} = 0 \Omega$  con un  $V = 5$  V para el periodo  $t_2 \rightarrow t_3$ , la red aparecerá como se muestra en la figura 3.63.

El equivalente de circuito abierto para el diodo eliminará que la batería de 5 V tenga cualquier efecto sobre  $v_o$  esto da como resultado:

$$+ 10 \text{ V} + 25 \text{ V} - v = 0$$

$$v = 35 \text{ V}$$

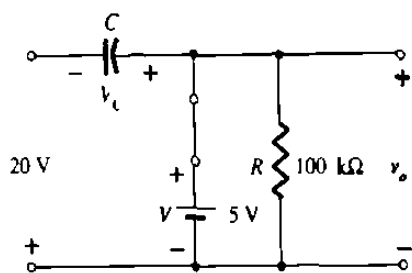


Figura 3.62 Determinación de  $v$  y  $V_c$  con el diodo "encendido"

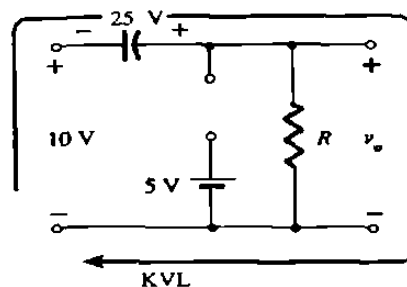


Figura 3.63 Determinación de  $v$  con el diodo "apagado"

La constante de tiempo de red de descarga de la figura 3.63 esta determinada por el producto  $RC$ , esta sera:

$$\tau = RC = (100\text{k}\Omega)(.01\mu\text{F}) = 0.01 \text{ s} = 10 \text{ ms}$$

$$\text{El tiempo total de descarga de } 5\tau = 5(10 \text{ ms}) = 50 \text{ ms}$$

La salida resultante aparece en la figura 3.64 junto con la señal de entrada

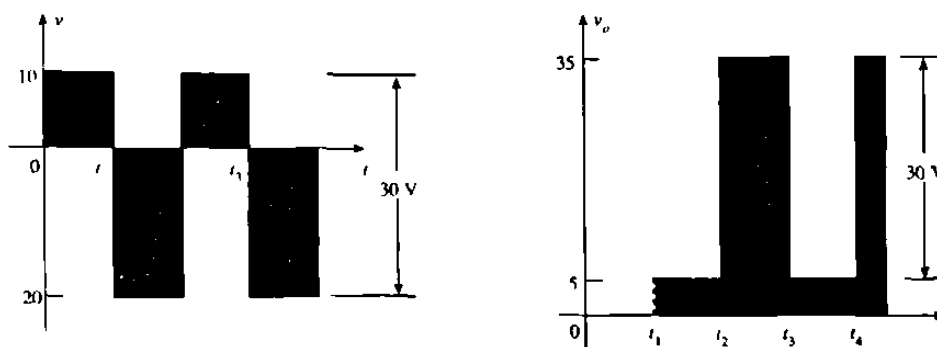


Figura 3.64  $v$  y  $v_o$  para el cambiador de nivel de la figura 3.64

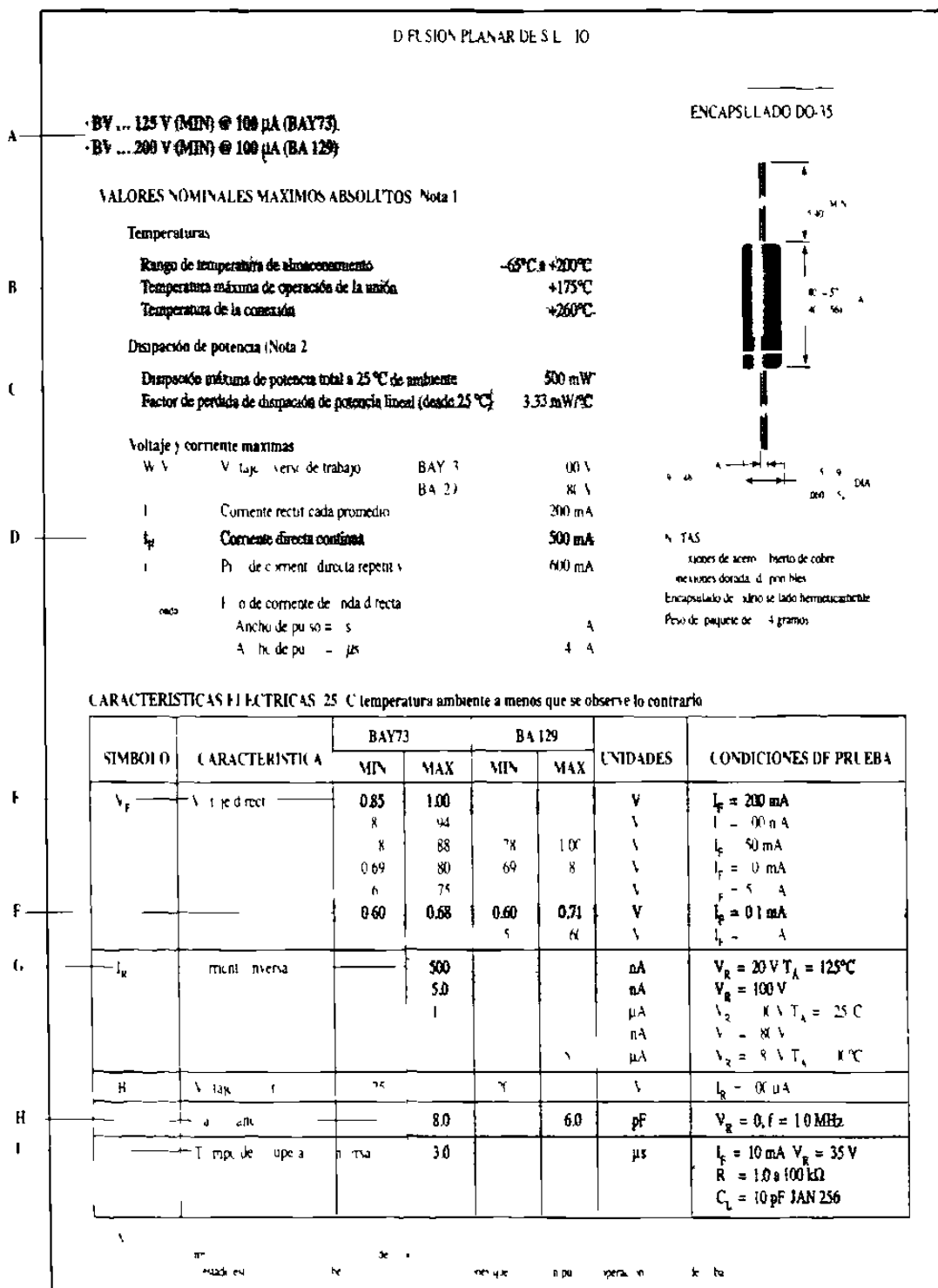


Tabla 3.1 Especificaciones del diodo



# CAPITULO 4

## DIODOS ESPECIALES

### 4.1 DIODO IDEAL

El diodo es de los primeros dispositivos electronicos y el mas sencillo de los dispositivos semiconductores. pero que desarrolla un papel muy importante en los sistemas electronicos.

El diodo ideal es un dispositivo de dos terminales y tiene características que son muy similares a las de un interruptor sencillo, su simbolo y característica se muestran en la figura 4.1

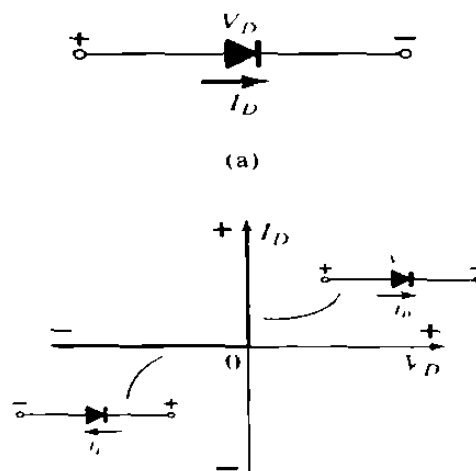


Figura 4.1 Diodo ideal, simbolo, curva característica

De manera ideal, un diodo conducirá corriente en la dirección que define la flecha del símbolo y actuará como un circuito abierto en cualquier intento por establecer corriente en dirección opuesta.

El diodo ideal se comporta como un interruptor, en polaridad directa actua como interruptor cerrado ( conduce corriente ) y en polaridad inversa sera interruptor abierto ( no conduce corriente ).

Un aspecto muy importante es la definicion de los simbolos literales, las polaridades de voltaje y las direcciones de corriente.

La polaridad de voltaje aplicado se muestra en la figura 4.2a la caracteristica que le corresponde se encuentra a la derecha del eje vertical en la figura y si se aplica un voltaje inverso como la figura 4.2b su caracteristica es en la izquierda del eje horizontal en la figura.

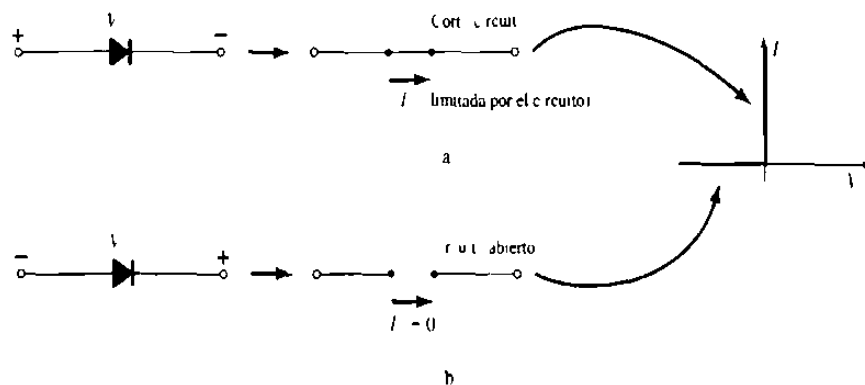


Figura 4.2 a) Estados de conduccion b) no conduccion del diodo ideal

en este trabajo la abscisa ( eje x ) correspondera al eje de voltaje y la ordenada ( eje y ) sera el eje de la corriente.

Uno de los parametros importantes para el diodo es su resistencia en el punto ó region de operación y ésta resistencia directa "Rf" se determina de acuerdo a la ley de Ohm esta será:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{0V}{2,3, m 1, \dots \text{solo un valor positivo}} = 0\Omega \text{ (cortocircuito)}$$

donde  $V_F$  es el voltaje de polarización directo a través del diodo e  $I_F$  es la corriente en sentido directo a través del diodo.

Si se le aplica un potencial negativo tendremos la resistencia de la siguiente forma:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5,20.0 \cdot \text{cualquier} \cdot \text{potencial} \cdot \text{de} \cdot \text{polarización} \cdot \text{inversa}}{0 \cdot \text{mA}} = \infty \Omega$$

donde  $V_R$  es el voltaje de polarización inverso a través del diodo e  $I_R$  es la corriente inversa en el diodo.

En general, es relativamente sencillo determinar si un diodo se encuentra en la región de conducción o en la de no conducción observando tan solo la dirección de la corriente  $I_D$  establecida por el voltaje aplicado.

Para el flujo convencional ( opuesto al de los electrones ) si la corriente resultante en el diodo tiene la misma dirección que la flecha del símbolo de dicho elemento, éste opera en la región de conducción y si la corriente resultante tiene la dirección opuesta estará operando en la región de no conducción.

El propósito principal de presentar las características de un dispositivo ideal es compararlas con variedades comerciales de diodos.

### **circuito equivalente del diodo.**

Un circuito equivalente es una combinación de los elementos escogidos de manera adecuada para representar de la mejor forma las características terminales reales de un dispositivo ó sistema.

En la figura 4.3a se ilustra el circuito equivalente para un diodo de silicio y en la figura 4.3b el circuito equivalente de un diodo ideal.

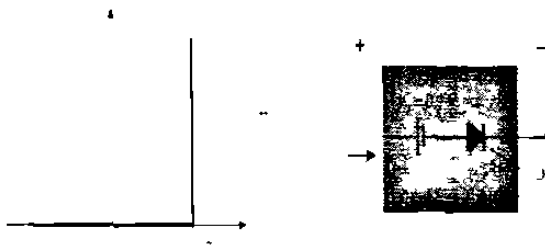


Fig.4.3a Circuito equivalente simplificado para el diodo semiconductor de Si

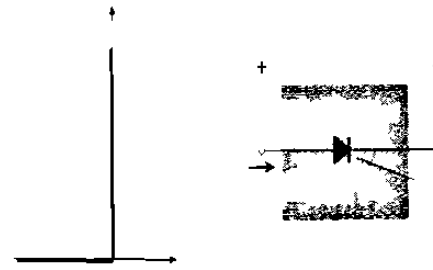
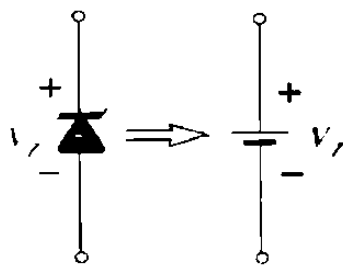


Fig.4.3b Diodo ideal y sus características

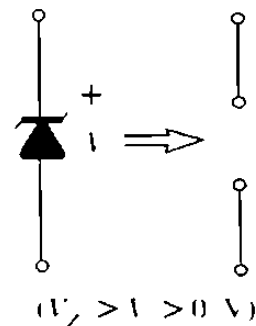
## 4.2 DIODO ZENER

El modelo utilizado para el estado de conducción del diodo zener se muestra en la figura 4.4a y para el estado de no conducción definido por un voltaje menor que  $V_Z$  pero mayor que 0 V con la polaridad indicada se muestra en la figura 4.4b el modelo equivalente Zener es el circuito abierto mostrado en la misma figura.



“encendido”

Figura 4.4a  
Diodo zener “encendido”



“apagado”

Figura 4.4b  
Diodo zener “apagado”

### Región Zener.

Una aplicación de un voltaje demasiado negativo dara como resultado un cambio brusco en las características como se indica en la fig. 4.5. La corriente se incrementa en una proporción muy rápida en dirección opuesta a la de la región de voltaje positivo. Al potencial de polarización inversa que resulta de este dramático cambio en las características se denomina "potencial Zener" y se asigna el símbolo  $V_Z$ .

Al ir incrementando el voltaje negativo, llega a un punto en donde se establece una elevada corriente de **avalancha** y determina la región de **rompimiento de avalancha**. A este cambio en la característica a cualquier nivel se conoce como: **región zener** y a estos diodos que aprovechan esta característica se denominan: **diodos zener**.

El máximo potencial de polarización inversa que puede aplicarse antes de entrar en la región zener se denomina Voltaje de Pico Inverso ( VPI ).

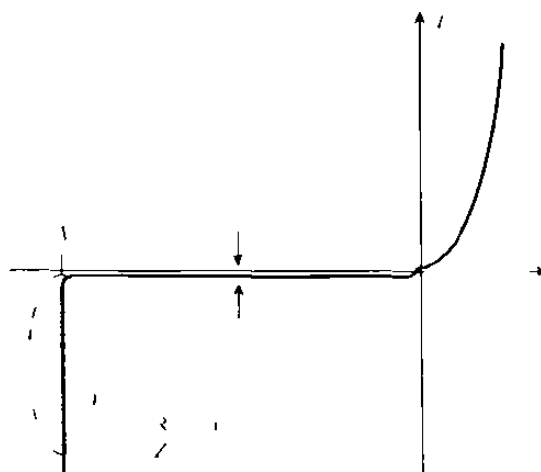


Figura 4.5 Region zener

Una de las redes más sencillas con diodo Zener se presenta en la figura 4.6 el voltaje de cd aplicado esta fijo, al igual que la resistencia de carga  $R_L$  el análisis se puede hacer en dos pasos:

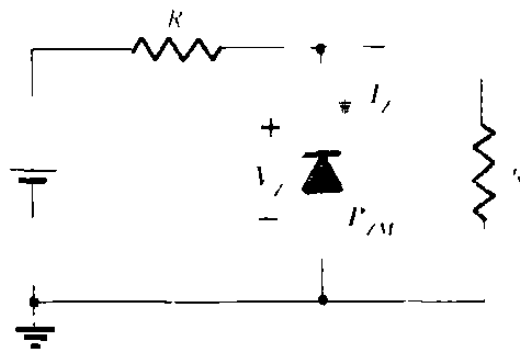


Figura 4.6 Regulador zener basico

1.- Determinese el estado del diodo Zener extrayendolo del circuito y calculando el voltaje a lo largo del circuito abierto resultante. esto se muestra en la figura 4.7 y por divisor de voltaje nos queda:

$$V = V_1 \frac{R}{R + R}$$

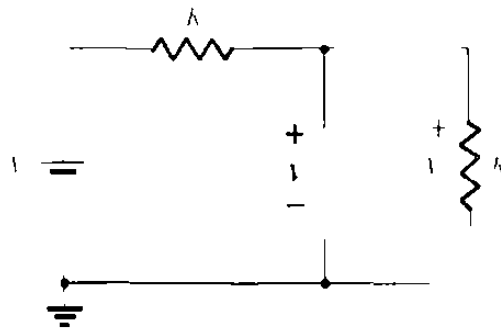


Figura 4.7 Determinacion del estado del diodo zener

Si  $V = V_z$  el diodo Zener esta en estado de conduccion y se representa mediante el modelo equivalente de la fig 4.4a Si  $V < V_z$  el diodo esta en estado de no conduccion y se representa mediante un circuito abierto como en la figura 4.4b

2.- Sustituyase el circuito equivalente apropiado y resuelvase para las incognitas deseadas.

Para el estado de conducción de diodo Zener la red equivalente se muestra en la figura 4.8 por lo tanto los voltajes a través de los elementos en paralelo serán iguales

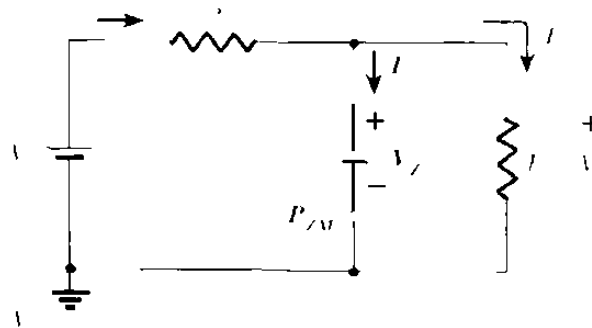


Figura 4.8 Circuito equivalente zener cuando está encendido

$$V_1 = V_Z$$

La corriente del diodo Zener se determina mediante las leyes de Kirchhoff

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$I_Z = I_R - I_L$$

$$I_L = \frac{V_1}{R_L}$$

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V - V_1}{R}$$

La potencia disipada por el diodo Zener sera:

$$P_Z = V_Z I_Z$$

La cual debe ser menor que la  $P_{ZM}$  especificada para el dispositivo ( dada por el fabricante ).

Los diodos Zener se utilizan con mas frecuencia en redes como **regulador** o como un voltaje de **referencia**.

**Ejemplo 4.1** a) Para la red de la figura 4.9 determinar  $V_1$ ,  $V_R$ ,  $I_Z$ , y  $P_Z$

b) Repetir el mismo inciso ( a ) con una  $R_L = 3 \text{ k}\Omega$ .

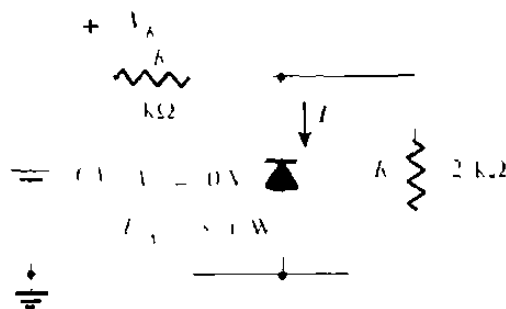


Figura 4.9 Circuito del ejemplo 4.1

**Solución:**

La red se traza como se indica en la figura 4.10 y aplicando la ecuación obtenemos:

$$V = \frac{R_L I}{R + R_L} = \frac{1.2k\Omega(16V)}{1k\Omega + 1.2k\Omega} = 8.73 \text{ V}$$

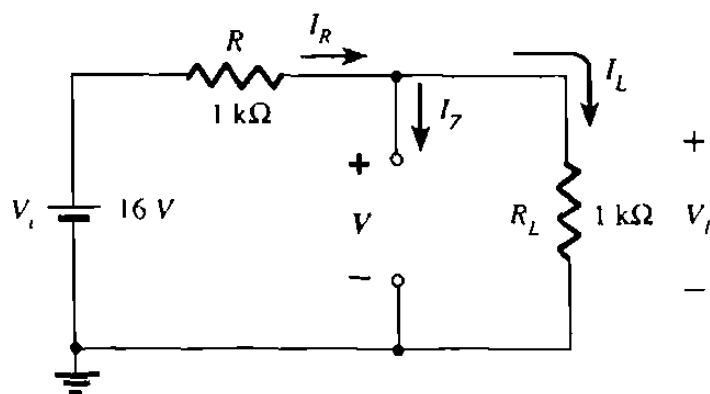


Figura 4.10 Circuito equivalente del ejemplo 4.1

Puesto que  $V = 8.73 \text{ V}$  es menor que  $V_D = 10 \text{ V}$ , el diodo está en el estado de no conducción como se muestra en las características de la figura 4.11



sustituyendo el circuito abierto equivalente se obtendra la misma red de la figura 4.10 en donde hallamos que:

$$V_1 = V - 8.73 \text{ V}$$

$$V_R = V - V_1 = 16 \text{ V} - 8.73 \text{ V} = 7.27 \text{ V}$$

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

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

Aplicando la siguiente ecuacion llegaremos a:

$$V = \frac{R_1 V_1}{R_1 + R_2} = \frac{3k\Omega(16V)}{1k\Omega + 3k\Omega} = 12 \text{ V}$$

ya que 12 V es mayor que  $V_Z = 10 \text{ V}$ , el diodo esta en estado de conduccion y se tendra la red de la figura 4.12 encontramos:

$$V_1 = V_Z = 10 \text{ V}$$

$$V_R = V_1 - V_1 = 16 \text{ V} - 10 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

$$I_1 = \frac{V_R}{R_2} = \frac{6V}{3k\Omega} = 3.33 \text{ mA}$$

$$I_R = \frac{V_1}{R_1} = \frac{10V}{1k\Omega} = 10 \text{ mA}$$

$$\text{de modo que : } I_Z = I_R - I_1$$

$$I_Z = 10 \text{ mA} - 3.33 \text{ mA}$$

$$I_Z = 6.67 \text{ mA}$$

La potencia disipada será:

$$P_Z = V_Z I_Z = (10 \text{ V})(6.67 \text{ mA}) = 66.7 \text{ mW}$$

Lo cual es menor que el valor especificado de  $P_{ZM} = 30 \text{ mW}$

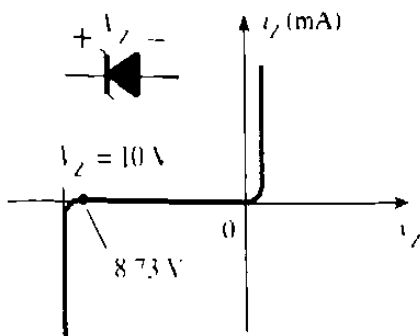


Figura 4.11  
Punto de operación resultante del ejemplo 4.1

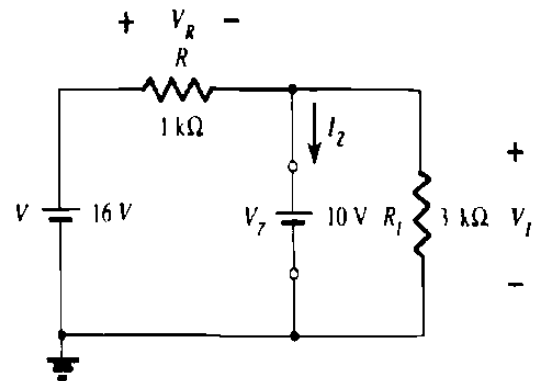


Figura 4.12  
Determinación de V para el regulador del ejemplo 4.1

### 4.3 DIODOS DE BARRERA SCHOTTKY

Un dispositivo de portadores de alta energía. En el que se crea una unión semiconductor de metal en la forma que se muestra en la figura 4.13.

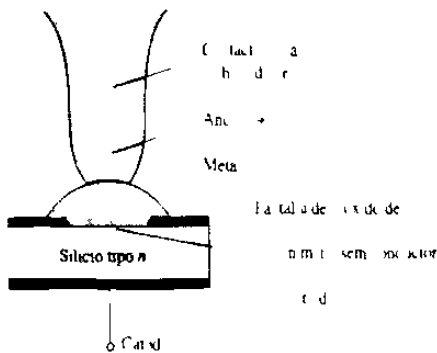


Figura.4.13  
Diodo de portadores calientes o de barrera de superficie

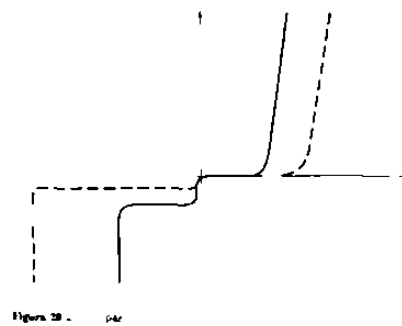


Figura.4.14  
Comparación de curvas del diodo Schottky y del union p-n

El semiconductor es por lo general silicio de tipo-n (aunque en ocasiones se utiliza silicio tipo-p) en tanto que se emplea un "anfitrión" de diferentes metales como el

molibdeno, platino, cromo, o tungsteno. Diferentes técnicas de construcción darán como resultado un aumento de rango de frecuencia. La construcción del diodo Schottky produce una región de unión más uniforme, así como una mayor solidez, en comparación con el diodo de punto de contacto.

Cuando se unen los materiales, los electrones en el material semiconductor de silicio tipo-n fluyen de inmediato hacia el metal adyacente, estableciendo un denso flujo de portadores mayoritarios. Puesto que los portadores inyectados tienen un nivel de energía cinética sumamente alto en comparación con los electrones del metal, comúnmente reciben el nombre de "portadores de alta energía". Los diodos Schottky son únicos por el hecho de que la conducción se debe por completo a los portadores mayoritarios.

La aplicación de una polarización directa como se muestra en la figura 4.14 reducirá la intensidad de la barrera negativa mediante la atracción del potencial positivo aplicado en los electrones de esta región. La barrera en la unión para un diodo Schottky es menor que la de un dispositivo de unión p-n tanto en la región de polarización directa como en la inversa. Este es un efecto deseable en la región de polarización directa, pero sumamente indeseable en la región de polarización inversa.

Una de las principales aplicaciones es en las fuentes de poder conmutadas que operan en el intervalo de frecuencias de 20 KHz ó más.

La ausencia de portadores a cualquier nivel apreciable en el diodo Schottky da como resultado un tiempo de recuperación inverso de niveles mucho más inferiores. Esta es la razón principal de por qué los diodos Schottky son tan eficaces en frecuencias que se aproximan a 20 GHz, donde el dispositivo debe cambiar de estado a un ritmo muy alto.

El circuito equivalente para el dispositivo ( con valores típicos ) así como el símbolo que se emplea comúnmente, se presentan en las figuras 4.15 y 4.16

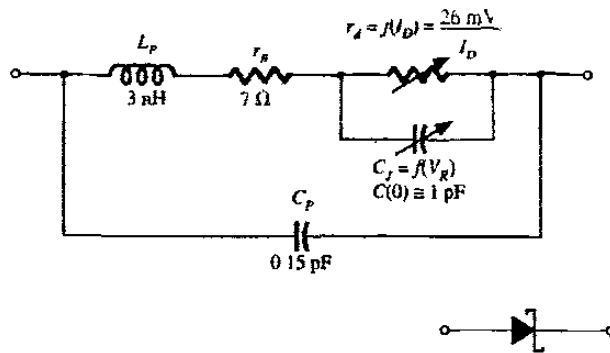


Figura.4.15  
Circuito equivalente diodo Schottky

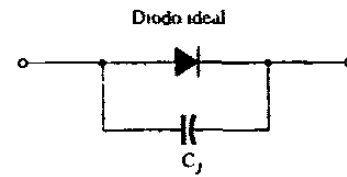


Figura.4.16  
Circuito equivalente aproximado

La  $L_p$  y la  $C_p$  son valores del encapsulado y la  $r_R$  es la resistencia en serie, la cual incluye la resistencia de contacto y la de volumen. La resistencia  $r_d$  y la capacitancia  $C_j$  son valores definidos mediante ecuaciones.

#### 4.4 DIODOS VARACTORES (VARICAP)

Los diodos varactores llamados también varicap (diodo con capacitancia-voltaje variable) ó sintonizadores son semiconductores dependientes del voltaje, capacitores variables. Su modo de operación depende de la capacitancia que existe en la unión p-n cuando el elemento está polarizado inversamente. En condiciones de polarización inversa, se estableció que hay una región sin carga en cualquiera de los lados de la unión que en conjunto forman la región de agotamiento y definen su ancho  $W_d$ . La capacitancia de transición ( $C_T$ ) establecida por la región sin carga se determina mediante:

$$C \propto \frac{1}{W}$$

donde  $\epsilon$  es la permitividad de los materiales semiconductores.  $A$  es el area de la unión **p-n** y  $W_d$  el ancho de la region de agotamiento. Conforme aumenta el potencial de polarización inversa, se incrementa el ancho de la region de agotamiento, lo que a su vez reduce la capacitancia de transición. En la figura 4.17 se muestran las curvas características de un diodo varicap. En la figura 4.18 se presentan los simbolos empleados más comunmente para el diodo varicap y una primera aproximacion para su circuito equivalente en la región de polarizacion inversa. Puesto que nos encontramos en la region de polarizacion inversa, la resistencia  $R_R$  en el circuito equivalente es muy grande en la magnitud ( los valores comunes son de  $1\text{ M}\Omega$  o mayores ) en tanto que  $R$  la resistencia geométrica del diodo es, como indica en la figura 4.18 sumamente pequeña. La magnitud de  $C$  variara aproximadamente 2 a  $100\text{ pF}$ , dependiendo del varicap que se considere.

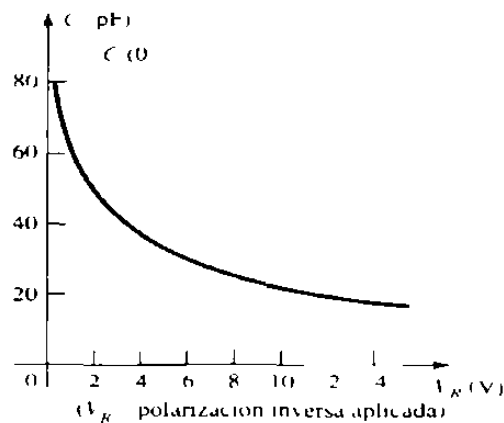


Figura.4.17 Características del varicap

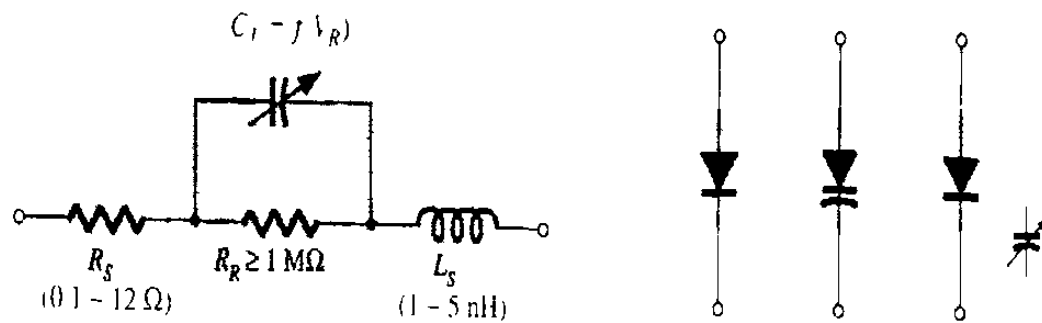


Figura.4.18 Circuito equivalente en la region de polarizacion inversa y simbolos

Si el dispositivo opera a altas frecuencias es necesario incluir la inductancia  $L_s$ , esto dará como resultado una frecuencia limite. La frecuencia resonante del dispositivo se determina mediante:  $f_r = 1 / 2\pi \sqrt{LC}$  y afecta el intervalo de aplicacion.

Algunas de las áreas de aplicacion de alta frecuencia ( de acuerdo a como las definen los niveles de capacitancia pequeños ) incluyen los moduladores de FM, los dispositivos de control automatico de frecuencia, los filtros pasabanda ajustables y los amplificadores paramétricos.

## 4.5 DIODO TUNEL

La caracteristica de éste dispositivo, que se muestra en la figura 4.19 es diferente de las correspondientes a cualquiera de los diodos estudiados hasta este punto en lo que se refiere a que tienen una region de resistencia negativa. En esta region, un incremento en el voltaje terminal causa una reduccion de la corriente en el diodo.

El diodo tunel se fabrica dopando el material semiconductor que formara la union **p-n** en un nivel de cien a miles de veces mayor que un diodo semiconductor tipico

Esto producirá una región de agotamiento bastante reducida del orden de magnitud de  $10^{-6}$  cm o por lo común alrededor de 1/100 del ancho de esta región para un diodo semiconductor común. Es en ésta delgada región de agotamiento donde muchos portadores pueden "pasar a través de un túnel" en vez de intentar superarla a potenciales de polarización directa bajos que explican el pico en la curva de la figura 4.19. Con fines comparativos, la característica de un diodo semiconductor típico se ha superpuesto a la característica del diodo túnel de la figura 4.19.

La reducida región de agotamiento produce portadores que la atraviesan perforándola a altas velocidades, éste diodo es utilizado en aplicaciones de alta velocidad como en las computadoras en donde se requieren tiempos de conmutación del orden de nanosegundos o picosegundos.

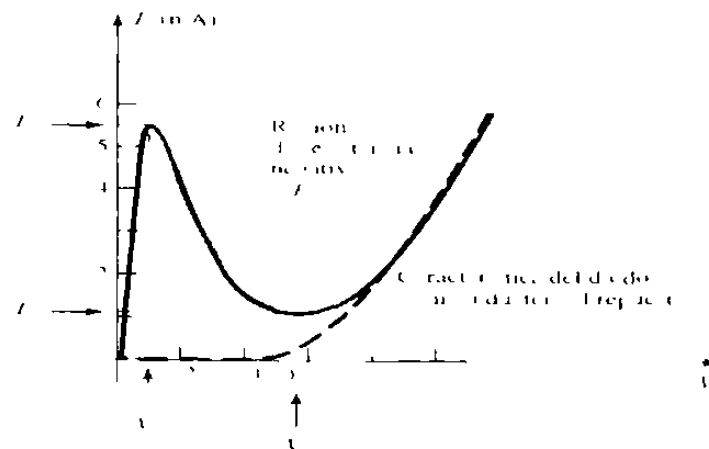


Figura 4.19 Características del diodo túnel

El circuito equivalente del diodo túnel en la región de resistencia negativa se presenta en la figura 4.20 con los símbolos que se emplean con mayor frecuencia para dichos dispositivos. El inductor  $L_s$  se debe principalmente a las terminales. El resistor  $R_s$  es producto de las terminales del contacto óhmico en la unión del semiconductor y de los propios materiales semiconductores, la capacitancia  $C$  es la capacitancia de difusión de la unión y la  $R$  es la resistencia negativa de la región. La resistencia negativa encuentra aplicaciones en los circuitos osciladores.

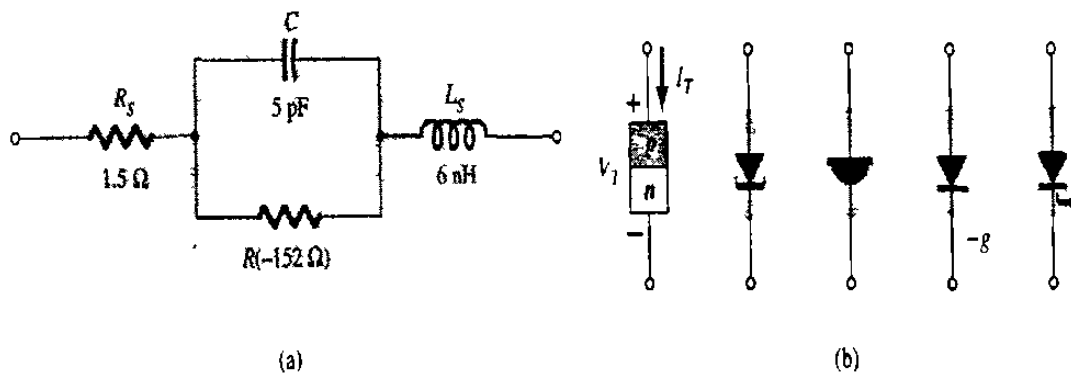


Figura. 4.20 Circuito equivalente y simbolos del diodo tunel

## 4.6 FOTODIODOS

El fotodiodo es un dispositivo semiconductor llamado también dispositivo optoelectrónico de unión p-n cuya región de operación está limitada a la región de polarización inversa. El arreglo de la polarización básica, la construcción y el símbolo correspondiente al dispositivo aparecen en la figura 4.21.

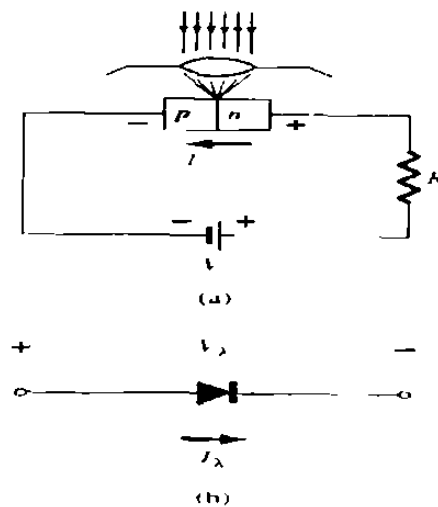


Figura 4.21 Polarización básica, construcción y símbolo del fotodiodo



La aplicación de luz en la unión dará como resultado una transferencia de energía de las ondas luminosas incidentes ( en forma de fotones ) a la estructura atómica, lo que origina un número incrementado de portadores minoritarios y un mayor nivel de corriente inversa.

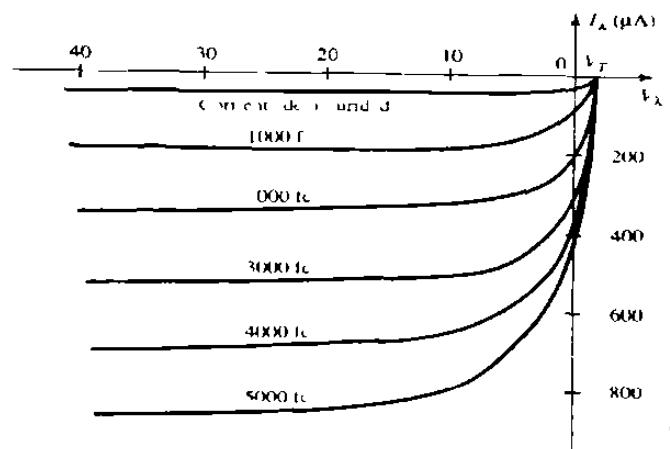


Figura 4.22 Características del fotodiodo

Esto se muestra claramente en la figura 4.22 para diferentes niveles de intensidad, un aumento en la intensidad luminosa dará como resultado un incremento similar en la corriente inversa como se muestra en la figura 4.23. Este dispositivo puede emplearse para aplicaciones de conteo ó conmutación a altas velocidades.

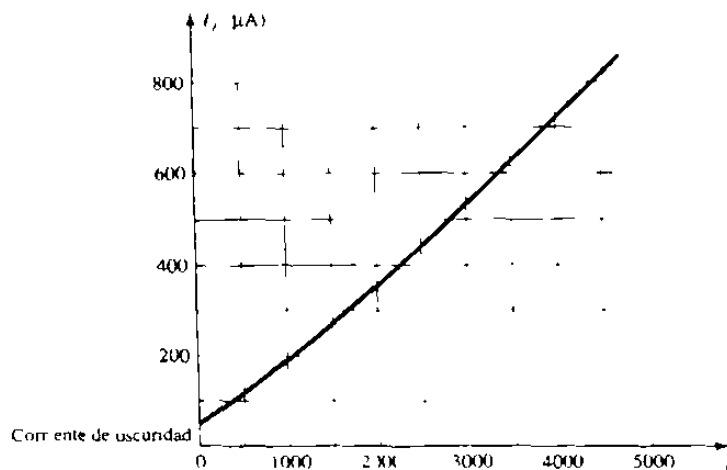


Figura 4.23 Características de fe para el fotodiodo

# CAPITULO 5

## TRANSISTORES BIPOLARES

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Las ventajas que presenta éste dispositivo **transistor** de estado solido de tres terminales respecto al bulbo se manifiestan de inmediato: es mas pequeño y ligero no requiere de calentamiento ó disipacion de calor, su construccion es resistente y es mas eficiente debido a que consume menos potencia y sus voltajes de operación son mas bajos. Estos dispositivos constan de por lo menos de tres terminales la cual una de ellas controla el flujo de electrones de las otras dos terminales.

### 5.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS TRANSISTORES

El transistor consta de tres capas las cuales dos de ellas son de material tipo-**n** y una capa tipo-**p** ó bien dos capas de material tipo-**p** y una del tipo-**n**. Al primero se le llama transistor **npn** y al segundo transistor **pnp** los dos se muestran en la figura 5.1a y 5.1b con su polarización adecuada.

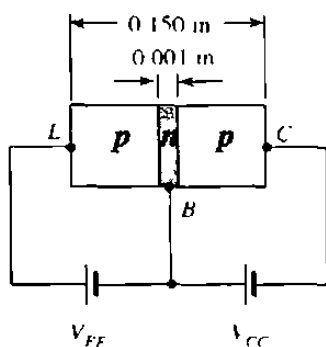


Figura 5.1a Transistor tipo pnp

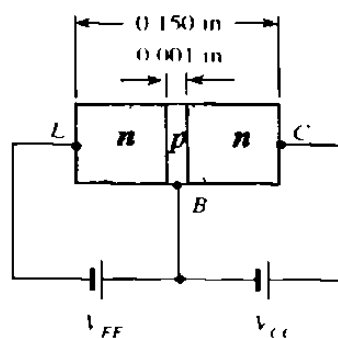


Figura 5.1b Transistor tipo npn

La capa de **emisor** se encuentra fuertemente dopada, la **base** ligeramente dopada y el **colector** solo muy poco dopada. El dopado de la capa central es también mucho menor que el dopado de las capas exteriores ( casi siempre 10:1 o menos ). Este nivel bajo de dopado disminuye la conductividad ( aumenta la resistencia ) de este material al limitar el número de portadores "libres".

Las terminales se indican mediante las literales **E** para el emisor, **C** para el colector y **B** para la base. La abreviatura **BJT** significa: Transistor Bipolar de Unión. El término bipolar refleja el hecho de que los huecos y los electrones participan en el proceso de inyección hacia el material polarizado en forma opuesta. Si solo se utiliza un portador ( electrón ó hueco ) es llamado un dispositivo **unipolar**.

### 5.3 OPERACIÓN DEL TRANSISTOR

En la figura 5.2 se dibujó de nuevo el transistor pnp sin la polarización base-colector. Existe una similitud con la polarización directa del diodo, el espesor de la región de agotamiento se redujo debido a la polarización aplicada esto da como resultado un flujo muy considerable de portadores mayoritarios desde el material tipo-p hacia el tipo-n.

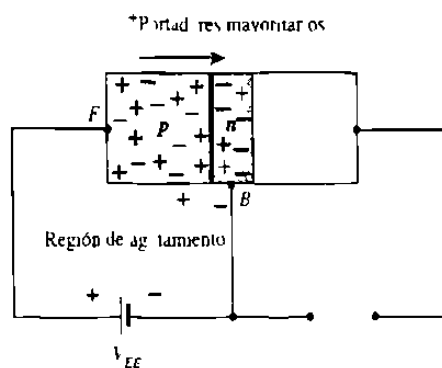


Figura 5.2 Unión con polarización directa de un transistor pnp

Si se elimina la polarización base-emisor del transistor pnp de la fig. 5.1a como se muestra en la figura 5.3 existe una similitud con la polarización inversa del diodo, aquí el flujo de portadores mayoritarios es cero dando como resultado solo un flujo de portadores minoritarios, por lo tanto:

**Una unión p-n de un transistor tiene polarización inversa, mientras que la otra tiene polarización directa**

En la figura 5.4 ambos potenciales están aplicados a un transistor pnp los espesores de las regiones de agotamiento indican cuál tiene polarización directa y cuál tiene polarización inversa, habrá una gran difusión de portadores mayoritarios a través de la unión p-n con polarización directa hacia el material tipo-n.

La magnitud de la corriente de base casi siempre se encuentra en el orden de microamperes, comparado con los miliamperes para las corrientes de emisor y del colector. La mayor cantidad de éstos portadores mayoritarios se difundirá a través de la unión con polarización inversa, hacia el material tipo-p conectado a la terminal de colector, mostrado en la figura 5.4. Esta razón de la facilidad con la cuál los portadores mayoritarios pueden atravesar la unión con polarización inversa es que los portadores mayoritarios inyectados aparecerán como portadores minoritarios en el material tipo-n, esto es, tuvo lugar una **inyección** de portadores minoritarios al material de la región de la base tipo-n.

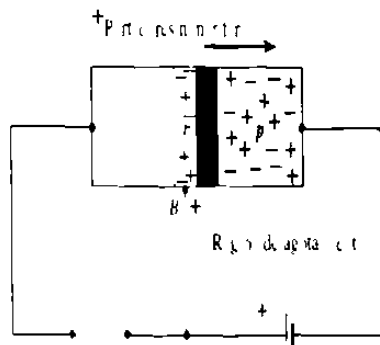


Figura 5.3 Unión con polarización inversa de un transistor pnp

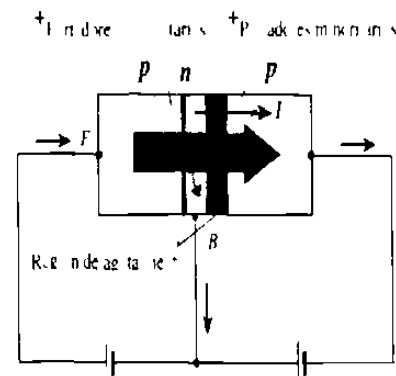


Figura 5.4 Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios

Al aplicar la ley de corrientes de Kirchhoff al transistor en la figura 5.4 como si fuera un solo nodo obtenemos:

$$I_E = I_C + I_B$$

Esto es que la corriente de emisor es la suma de las corrientes de colector y de la base.

## 5.4 CONFIGURACIÓN DE BASE COMÚN

La terminología de la base comun se deriva de hecho que la base es comun tanto a la entrada como en la salida de la configuración, por lo regular la base es la terminal mas cercana a, ó que se encuentra en el potencial de tierra.

Respecto al flujo de electrones, se utiliza el flujo convencional, y las flechas en los simbolos electronicos tienen una dirección definida para esta convencion.

**La flecha** en el simbolo gráfico define la dirección de la corriente del emisor (flujo convencional ) a través del dispositivo.

Para describir en su totalidad el comportamiento de un dispositivo de tres terminales, como los amplificadores de base comun de la figura 5.5a y 5.5b se requiere de dos conjuntos de características, uno para el punto de excitacion o parametros de entrada y el otro para el lado de la salida.

En la figura 5.6 se muestra el conjunto de graficas de entrada para el amplificador base comun relacionando la corriente de entrada  $I_E$  con un voltaje de entrada  $V_{BE}$  para varios niveles de voltaje de salida  $V_{CE}$ .

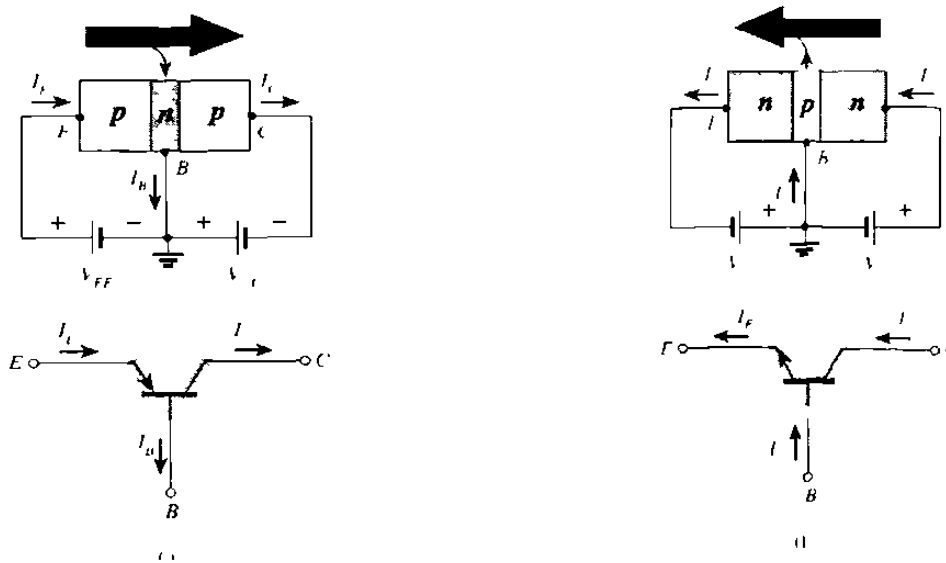


Figura 5.5a y b Circuitos de configuración base común pnp y npn respectivamente

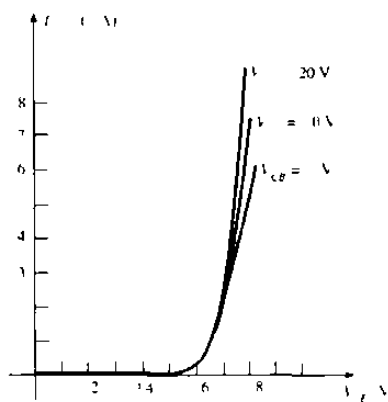


Figura 5.6 Características de entrada del base común

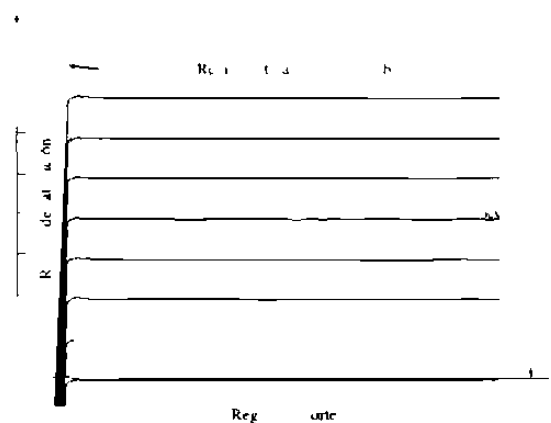


Figura 5.7 Características de salida del base común

El conjunto de salida relacionara la corriente de salida  $I_C$  con un voltaje de salida  $V_{CB}$  para varios niveles de corriente de entrada  $I_E$  según se muestra en la figura 5.7

Este conjunto de características de la salida o colector tiene tres regiones **región de saturación ( RS )**. La region normal activa es la que se utiliza para los basicas de interes las cuales son: **región normal activa ( RNA )** **región de corte ( RC )**, amplificadores lineales ( sin distorsion ).

**En la región normal activa la unión base-colector se polariza inversamente, mientras que la unión base-emisor se polariza directamente.**

En la figura 5.7 la corriente de emisor se incrementa por arriba de cero, la corriente del colector aumenta a una magnitud igual a la corriente de emisor determinada esta por las relaciones basicas de corriente del transistor, ésto es:

$$I_C = I_E$$

**En la región de corte, tanto la unión base-colector como la unión base-emisor de un transistor tienen polarización inversa.**

La región de saturacion se define como la region a la izquierda de las características de  $V_{CB} = 0V$ .

**En la región de saturación, tanto la unión base-colector como la unión base-emisor están en polarización directa.**

Una vez que el transistor se encuentra en estado de "encendido" el voltaje base-emisor sera:

$$V_{BE} = 0.7 V$$

### **Alfa**

En el modo de cd los niveles de  $I_C$  e  $I_E$  debido a los portadores mayoritarios se encuentran relacionados por una cantidad llamada **Alfa** ( $\alpha$ )

$$\alpha = I_C / I_E$$

### Polarización de base común

La polarización correcta de la configuración de base común en la región normal activa se determina rápido si se utiliza la aproximación  $I_C \approx I_E$  suponiendo que  $I_B \approx 0$  microAmp. El resultado es la configuración de la figura 5.8 para el transistor pnp.

La flecha del símbolo define la dirección del flujo convencional para  $I_E \approx I_C$  luego se insertan las fuentes de cd con la polaridad correspondiente que soportaran la dirección resultante de la corriente.

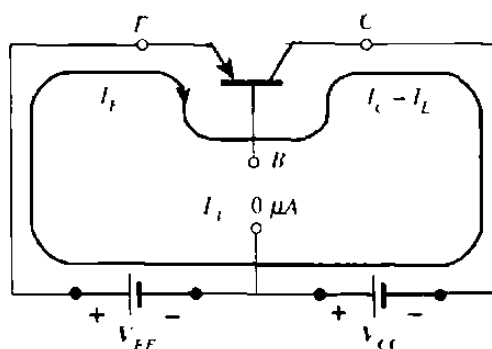


Figura 5.8 Polarización del transistor pnp en base común

### Acción amplificadora del transistor en base común

Para la configuración de base común, la resistencia de entrada determinada por la figura 5.6 es muy pequeña y varía entre 10 y 100 ohms

La resistencia de salida según las curvas de la figura 5.7 es muy alta ( mientras mas horizontales sean las curvas, mayor resistencia ) y varía entre  $50k\Omega$ ,  $1M\Omega$   $100k\Omega$  para el transistor de la figura 5.9



La diferencia en cuanto a resistencias se debe a la unión con polarización directa entre la base-emisor y la unión con la polarización inversa entre base-colector. Utilizando  $20\Omega$  para la resistencia de entrada se encuentra que:

$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200mV}{20\Omega} = 10mA$$

$$\text{como: } I_c = I_i$$

$$I_i = I_c = 10mA$$

$$V_i = I_i R$$

$$V_i = (10mA)(5k\Omega)$$

$$V_i = 50V$$

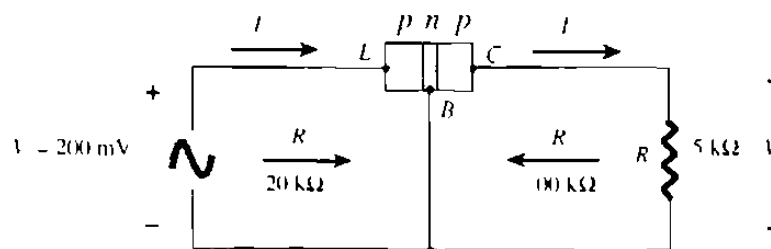


Figura 5.9 Acción básica de amplificación de voltaje de base común

la amplificación de voltaje será:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{50V}{200mV} = 250$$

Los valores típicos de amplificación de voltaje varían entre 50 y 300 y la amplificación de corriente es menor que uno. La acción básica de amplificación se produjo mediante la **transferencia** de una corriente  $I$  desde un circuito de baja resistencia a uno de alta.

**transferencia + resistor      transistor**

## 5.4 CONFIGURACIÓN DE EMISOR COMÚN

Esta configuración es la que se encuentra mas a menudo y se le denomina configuración de emisor comun debido a que el emisor es comun o hace referencia a las terminales tanto de entrada como de salida en la figura 5.10 se muestra esta configuración para los dos tipos de transistores. Las corrientes de emisor, colector y base se muestran en su direccion convencional para la corriente.

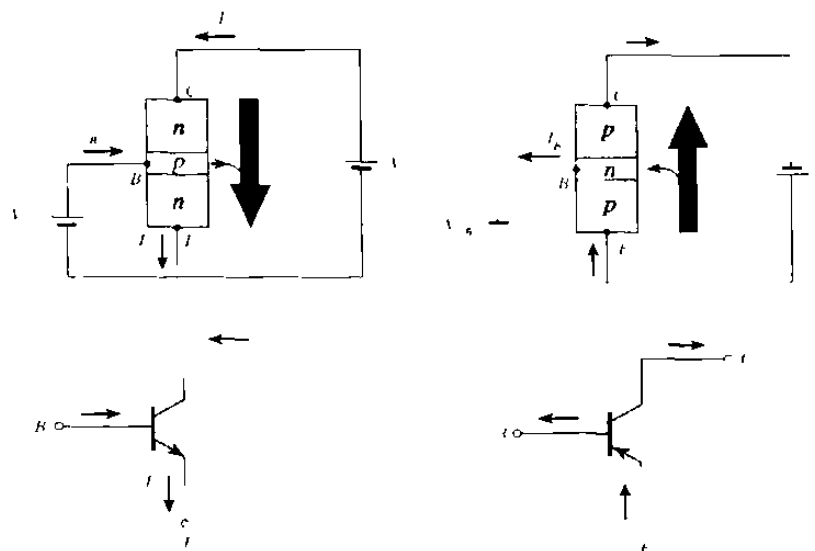


Figura 5.10 Notacion y simbolos de la configuración emisor comun en un npn y pnp

Las características de salida son una grafica de la corriente de salida  $I_C$  en funcion del voltaje de salida  $V_{CE}$  para un rango de valores de corriente de entrada  $I_B$  y las características de entrada son una grafica de la corriente de entrada  $I_B$  en funcion del voltaje de entrada  $V_{BE}$  para un rango de voltajes de salida  $V_{CE}$ .

En la figura 5.11a y 5.11b la magnitud de  $I_B$  se encuentra en microamperes, comparado con los miliamperes de  $I_C$ . Aqui las curvas de  $I_B$  no son tan horizontales

como en la configuración de base común, esto indica que el voltaje del colector al emisor tendrá influencia sobre la magnitud de la corriente de colector. La región normal activa de la configuración de emisor común se emplea para la amplificación de voltaje, corriente o potencia.

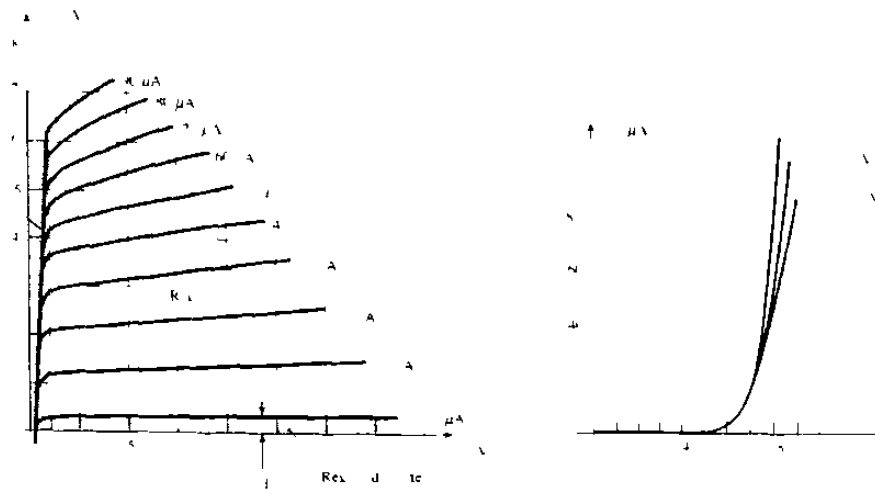


Figura 5.11a y b Características de salida y entrada para el emisor común

### Beta ( $\beta$ )

Los niveles de  $I_C$  e  $I_B$  se relacionan mediante una cantidad llamada **Beta** y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Para los dispositivos prácticos, el nivel de  $\beta$  suele tener un rango entre 50 y 400 con la mayoría en el rango medio. Para un dispositivo con una  $\beta = 200$ , la corriente del colector equivale a 200 veces la magnitud de la corriente de base.

En las hojas de especificaciones  $\beta$  se incluye como  $h_{FE}$ . El nombre formal para  $\beta$  es: **factor de amplificación de corriente directa de emisor común.**

Se puede desarrollar una relación entre  $\beta$  y  $\alpha$  empleando las relaciones básicas:

$$\beta = I_C / I_B \quad I_B = I_C / \beta \quad \alpha = I_C / I_E \quad \text{se tiene que :} \quad I_E = I_C / \alpha$$

sustituyendo en:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C / \alpha = I_C + I_C / \beta$$

dividiendo ambos lados de la ecuación por  $I_C$  se obtiene:

$$1 / \alpha = 1 + 1 / \beta$$

$$\beta = \alpha\beta + \alpha = (\beta + 1)\alpha$$

$$\alpha = \beta / (\beta + 1)$$

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha)$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

## 5.5 CONFIGURACIÓN DE COLECTOR COMÚN

La última configuración es la de colector común mostrada en la figura 5.12. Esta configuración es empleada para acoplamientos de impedancia ya que tiene una elevada impedancia de entrada y una baja impedancia de salida.

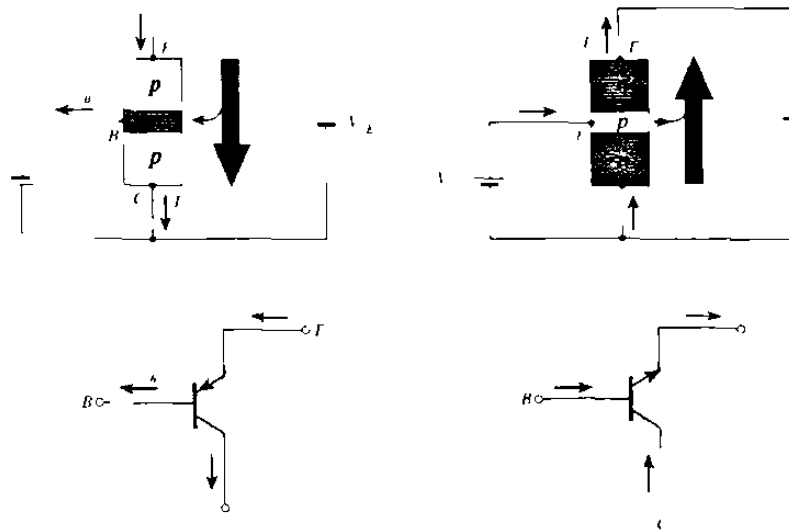


Figura 5.12 Notación y símbolos de la configuración colector común

Para propósitos prácticos las características de salida de la configuración de colector común son las mismas que las de la configuración de emisor común, esto es que se va a graficar una corriente  $I_C$  contra un voltaje  $V_{CE}$  para un intervalo de valores de  $I_B$ .

## 5.6 LÍMITES DE OPERACIÓN

Para cada transistor existe una región de operación sobre las características, la cual asegura que los valores nominales máximos no sean excedidos y la señal de salida exhibe una distorsión mínima, esto se observa en la figura 5.13

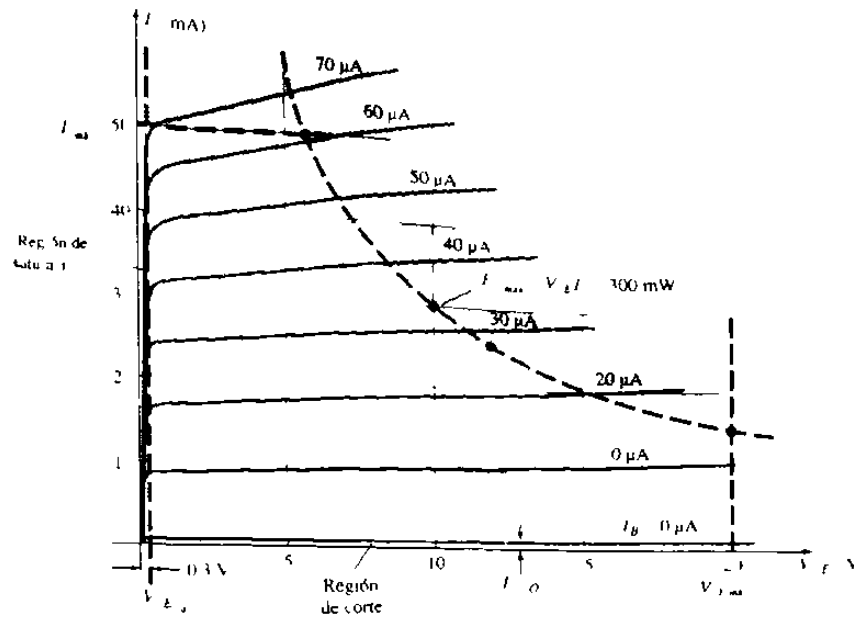


Figura 5.13 Grafica de la región lineal de operación para un transistor

Para el transistor de ésta figura la  $I_{C_{max}}$  es de 50mA, y el  $V_{CE_{max}}$  es de 20 volts.

El máximo nivel de disipación se define como  $P_{C_{max}}$ , por lo tanto:

$$P_{C_{max}} = V_{CE} I_C$$

$$P_{C_{max}} = V_{CE} I_C = 300 \text{ mW}$$

Esto ocurre en cualquier punto sobre las características, el producto de  $V_{CE}$  e  $I_C$  debe ser igual a 300 mW por lo tanto:

$$V_{CE} I_C = 300 \text{ mW}$$

$$V_{CE} (50 \text{ mA}) = 300 \text{ mW}$$

$$V_{CE} = 300 \text{ mW} / 50 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 6 \text{ V}$$

Como resultado encontramos que si  $I_C = 50 \text{ mA}$  el voltaje  $V_{CE} = 6 \text{ V}$  sobre la curva de disipación de potencia. Si ahora elegimos para  $V_{CE}$  su valor máximo de  $20 \text{ V}$  tenemos:

$$(20 \text{ V}) I_C = 300 \text{ mW}$$

$$I_C = 300 \text{ mW} / 20 \text{ V}$$

$$I_C = 15 \text{ mA}$$

si se escoge un valor intermedio de  $I_C = 25 \text{ mA}$  obtenemos:

$$V_{CE} (25 \text{ mA}) = 300 \text{ mW}$$

$$V_{CE} = 300 \text{ mW} / 25 \text{ mA}$$

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

Si las curvas de características no están disponibles ó no aparecen en la hoja de especificaciones uno debe estar seguro de que  $I_C$  y  $V_{CE}$  y su producto caigan dentro de los valores máximos especificados por el fabricante.

# CAPITULO 6

## POLARIZACIÓN DE LOS TRANSISTORES BIPOLARES

### 6.1 INTRODUCCION

El análisis ó diseño de cualquier amplificador electrónico tiene dos componentes: la parte de cd. y la correspondiente a ca.

El nivel de cd de operación de un transistor se controla por varios factores, incluyendo el rango de posibles puntos de operación sobre las características del dispositivo.

Las relaciones básicas importantes para el transistor son:

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = I_C$$

$$I_C = \beta I_B$$

En la mayoría de los casos la corriente de base  $I_B$  es la primera cantidad que se determina. Una vez que la  $I_B$  se conoce las relaciones anteriores pueden aplicarse para encontrar las restantes cantidades.

### 6.2 PUNTO DE OPERACIÓN

El término polarización se refiere a la aplicación de voltajes de cd para establecer un nivel fijo de corriente y voltaje. estos establecen un **punto de operación** sobre las



características. El cuál define la region que se empleara para la amplificacion de una señal aplicada.

Tambien se le conoce como: **punto estable** ( abreviado punto **Q** ) y significa quieto, inmovil, inactivo. La figura 6.1 muestra una caracteristica general de salida de un dispositivo con cuatro puntos de operacion indicados.

El circuito de polarización se puede diseñar para establecer la operacion del dispositivo en cualquiera de éstos puntos dentro de la region normal activa. Los valores nominales maximos se indican en la figura 6.1

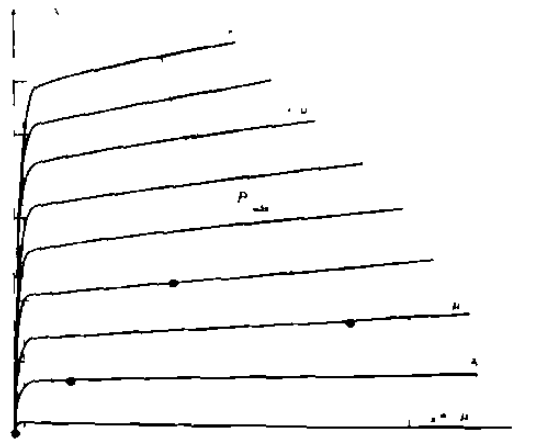


Figura 6.1 Puntos de operacion dentro de los limites de operacion del transistor

Por una linea horizontal para la corriente de colector maxima  $I_{Cmax}$  y por una linea vertical para el voltaje de colector-emisor maximo  $V_{CEmax}$ , la maxima potencia de operación maxima se define por la curva  $P_{Cmax}$ . En el extremo inferior se localizan la region de corte y la region de saturacion.

Fuera de éstos puntos limites maximos causaria el acortamiento de la vida de servicio del dispositivo, ó bien su destruccion. El punto Q depende a menudo del uso que se dara al circuito.

### 6.3 REGIONES DE OPERACIÓN

Para que un BJT este polarizado en la **región de operación lineal** ó **activa** debe cumplirse con lo siguiente:

- 1 - La union de base a emisor debe estar polarizada directamente.
- 2.- La union de base a colector debe estar polarizada inversamente

Para que un BJT opere en la **región de corte** será necesario:

- 1.- La union de base a emisor debe estar polarizada inversamente
- 2.- La union de base a colector debe estar polarizada inversamente

Para que un BJT opere en la **región de saturación** sera necesario:

- 1.- La union de base a emisor debe estar polarizada directamente
- 2.- La union de base a colector debe estar polarizada directamente

### 6.4 DIFERENTES TIPOS DE POLARIZACIÓN

#### CIRCUITO DE POLARIZACIÓN FIJA

En la figura 6.2 se emplea una red con un transistor **nnp**, las ecuaciones y los calculos se aplican en forma correcta por igual a un transistor **pnnp** con solo cambiar todas las direcciones de corriente y polaridades de voltaje. Para el analisis de cd, la red puede aislarse de los niveles de ca indicados, remplazando los capacitores por un circuito abierto equivalente. Además, la fuente de cd  $V_{CC}$  puede dividirse en un par de fuentes como se observa en la figura 6.3 para permitir una separacion de los circuitos de entrada y salida.

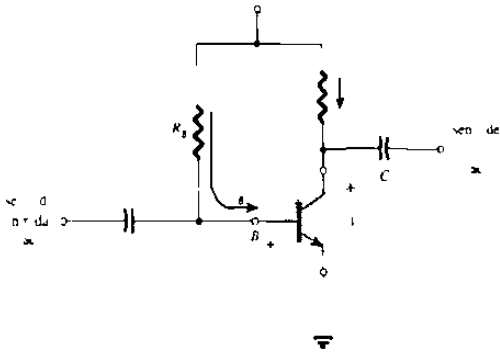


Figura 6.2 Circuito de polarización fija

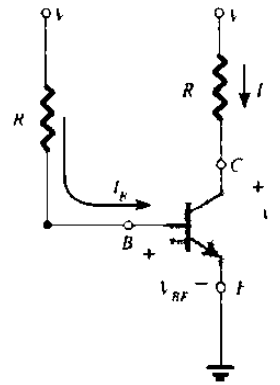


Figura 6.3 Equivalente del circuito de la figura 6.2

### Polarización directa de base-emisor

Considerar primero la malla del circuito base-emisor mostrado en la figura 6.4 y al escribir la ecuación de voltaje de Kirchhoff para la malla se obtiene:

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

por lo tanto:

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

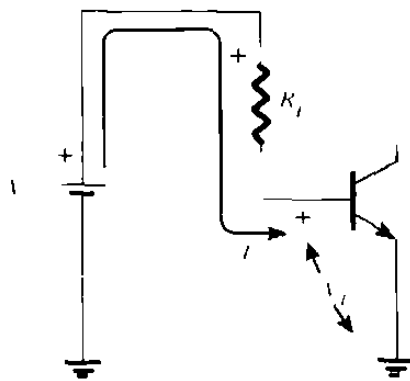


Figura 6.4 Circuito para la malla base emisor

Puesto que la fuente de voltaje  $V_{CC}$  y el voltaje de base a emisor  $V_{BE}$  son constantes, la selección de una resistencia de base  $R_B$ , establece el nivel de la corriente de base para el punto de operación.

### Malla de colector-emisor

Observamos que la corriente de base se controla por el nivel de  $R_B$  e  $I_C$  se relaciona con  $I_B$  por una constante ( $\beta$ ), la magnitud de  $I_C$  no es una función de la resistencia  $R_C$ . El cambio de  $R_C$  a cualquier nivel no afectará el nivel de  $I_B$  o  $I_C$  en tanto que se encuentre en la región activa del dispositivo, de cualquier manera el cambio de  $R_C$  determinará la magnitud de  $V_{CE}$  y el cual es un parámetro importante. Aplicando la ley de Kirchhoff a la figura 6.5 obtenemos :

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

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

$$V_{CE} = V_C - V_E$$

Donde  $V_{CE}$  es el voltaje de colector a emisor y  $V_C$  y  $V_E$  son los voltajes de colector a tierra y el voltaje de emisor a tierra.

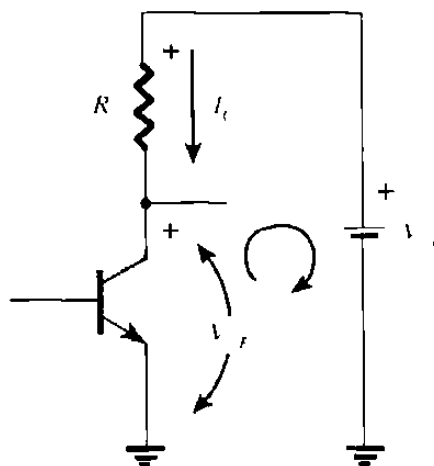


Figura 6.5 Circuito de malla colector emisor

