UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MUEVO 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. HUMBERTO FIGUEROA MARTINEZ

TESIS

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

EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDADA DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA AUTO-

M 585 M2 IME 998 53



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. HUMBERTO FIGUEROA MARTINEZ

TESIS

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

TM 28=_ ·M2 + 1 178 152 0124-74260

,

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. HUMBERTO FIGUEROA MARTINEZ

TESIS

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



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. Humberto Figueroa Martínez No. matricula 287953, 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 Kené Medina Cantú

Ásesor

M.C. José D. Rivera Martínez

Coasesor

. Leopoldo René Villareal J

Coasesor

M.C. Roberto Villarreal Garza

Vo.Bo.

División de Estudios de Post-grado

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 ésto se ha creado un exámen 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 exámen, 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 éstos 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

Prólogo		
Sínte	sis	ii
Capitulo 1 Introducción		
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Justificación	2 2 3
1.4	Metodología	3
Capi	tulo 2 Materiales semiconductores	4
2.1	Introducción	4
2.2	Niveles de energia	7
2.3	Materiales extrínsecos	8
2.4	Diodo semiconductor	11
2.5	Niveles de resistencia	16
Cap	itulo 3 Aplicaciones de los diodos	24
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
Capi	itulo 4 Diodos especiales	60
4.1	Diodo ideal	60
4.2	Diodo zener	62
4.3	Diodo schottky	68
4.4	Diodo varactor	70
4.5	Diodo túnel	72
4.6	Fotodiodo	74

Capit	77	
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
Capit	tulo 6 Polarización de los transistores bipolares	91
6.1	Introducción	91
6.2	Punto de operación	91
6.3	Regiones de operación	93
6.4	Diferentes tipos de polarizaciones	93
Capi	tulo 7 Transistores de efecto de campo	123
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
Capi	tulo 8 Polarizaciones del transistor de efecto de campo	151
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
Capi	tulo 9 Pspice	197
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

Capitulo 10 Conclusiones y recomendaciones		225	
10.1 10.2	Conclusiones Recomendaciones	225 226	
Bibliografía		227	
Listado de tablas		228	
Listado de figuras		229	
Glosario de términos		238	
Resumen autobiográfico		239	

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

El campo de la electrónica ha sufrido un notable cambio últimamente. El tubo de vacío 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 algún 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, análisis 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 teórica 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 ó 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 exámen 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 análogica.

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 término **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 término **resistividad** (rho), utilizado para comparar los niveles de resistencia de los materiales. En unidades métricas 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

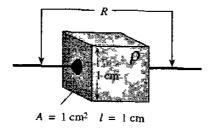


Figura 2.1 Definición de las unidades métricas de resistividad.

$$\rho = \frac{RA}{l} = \frac{(\Omega)(cm^2)}{cm} \Rightarrow \Omega - cm$$

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

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", ésto 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 (ésto es, que continuamente se repite el mismo). A un patrón completo se le llama: cristal 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

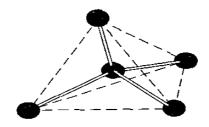


Figura 2.2 Estructura de un solo cristal de germanio y silicio

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 éstos se muestran en la figura 2.3

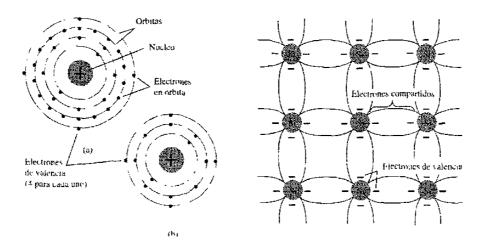


Figura. 2.3 Figura. 2.4

Estructura atómica germanio y silicio Unión covalente del átomo de silicio

El átomo de germanio, tiene 32 electrones en órbita, mientras que el silicio tiene 14 electrones en varias órbitas. 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 electrón dentro de la estructura. En un cristal puro de germanio ó 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 generará una unión más fuerte entre los electrones de valencia y su átomo, pero todavía es posible para los electrones absorber energía cinética y romper ésa 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 1.5×10^{10} 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 2.5x10¹³ 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 electrón 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 electrón en la estructura atómica.

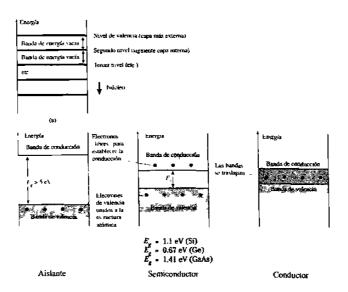


Figura 2.5 Niveles de energía.

٠

La ionización es el mecanismo mediante el cuál 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:

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 joules y que la carga de un electrón = 1.6×10^{-19} couls.

$$W = QV = (1.6x10^{-19}C)(1V)$$

2.3 MATERIALES EXTRÍNSECOS

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.

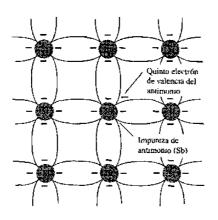
Un material semiconductor que haya sido sujeto al proceso de dopado, se denomina un material extrínseco.

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 ó 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 arsénico, el fósforo. El efecto de éstos elementos impuros se observa en la figura 2.6 y 2.7



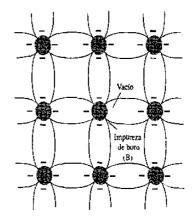


Figura.2.6 Impurezas de boro en el material tipo-p

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 éstos 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 está representado por un pequeño circulo ó signo positivo debido a la ausencia de una carga negativa. Por lo tanto, la vacante resultante aceptará ó 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

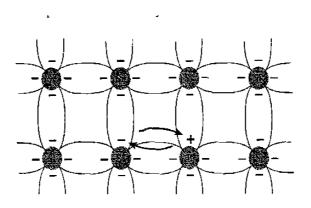


Figura 2.8 Flujo de electrones en función del flujo de huecos

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

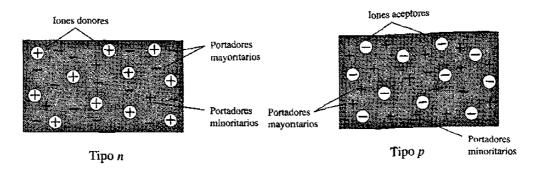


Figura 2.9 a Material tipo-n

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 ésta región de iones positivos y negativos descubiertos se le llama: región de agotamiento, ésto 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

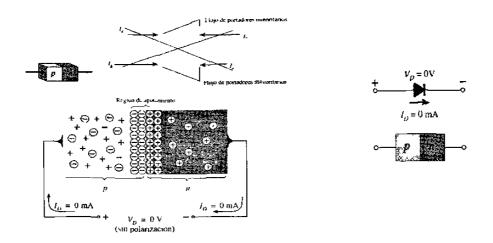


Figura 2.10 Unión p-n sin polarización externa

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 ($V_D < 0 V$)

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 incrementaran en el material tipo-p. Debido a ésto, la región de agotamiento se ampliará y se establecerá una barrera de potencial demasiado grande para ser superada por los portadores mayoritarios.

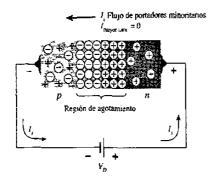


Figura 2.12 Unión p-n con polarización inversa

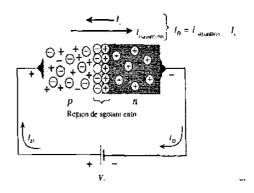


Figura 2.13 Unión p-n con polarización directa

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

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, ésto 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 incremente en magnitud la polarización aplicada, la región de agotamiento continuará disminuyendo su anchura hasta que un flujo de electrones pueda pasar a través de la unión, ésto dá como resultado un incremento exponencial en la corriente, en general el voltaje a través de un diodo de polarización directa será de menos de 1V, ésto se muestra en la figura 2.14

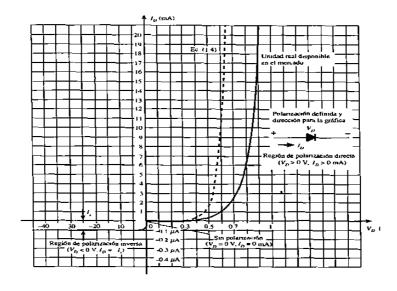


Figura 2.14 Características del diodo semiconductor de silicio

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:

$$I_D = I_S(e^{kV_D/T_K} - 1)$$

dónde Is = corriente de saturación inversa.

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

$$T_K = T_C + 273^0$$

por lo tanto tenemos que:

$$I_D = I_S(e^{kV_D/T_K} - 1)$$

Para valores positivos de V_D el primer término de la ecuación anterior crecerá con mayor rapidez y superará el efecto de segundo término.

El resultado será positivo para los valores positivos de V_D e I_D y crecerá en forma exponencial. Para valores negativos de V_D el primer término disminuirá rápidamente debajo de Is dando como resultado $I_D = -I_S$ 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 más altos, y rangos más amplios de temperatura que los diodos de germanio. El PIV de silicio = 1000V y para el germanio 400V. En las aplicaciones de temperatura el silicio opera alrededor de $200\,^{\circ}C(400\,^{\circ}F)$ y el germanio $100\,^{\circ}C$.

Según se observa en la figura 2.15 el silicio requiere de 0.7V para alcanzar la región de conducción y de 0.3V para el germanio. El potencial por el cuál ocurre éste crecimiento se conoce como: potencial de conducción de umbral ó de encendido.

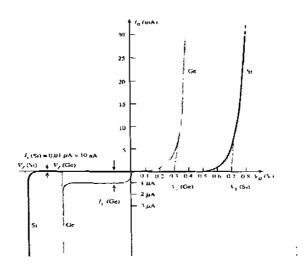


Figura 2.15 Comparación de diodos semiconductores de Si y Ge

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:

$$R_{CD} = V_D / I_D$$

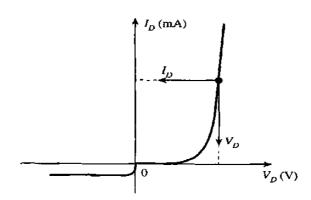


Figura 2.16 Determinación de la resistencia estática

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

a)
$$I_D = 2mA$$

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

c)
$$V_D = -10V$$

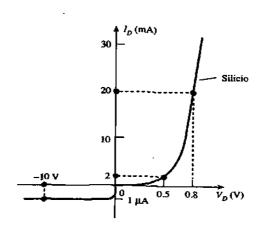


Figura 2.17 Gráfica del ejemplo 2.1

Solución:

a) En
$$I_D = 2mA$$
, $V_D = 0.5V$ de la curva
$$R_{CD} = V_D / I_D$$

$$R_{CD} = 0.5V / 2 \text{ mA} = 250 \Omega$$

b) En
$$I_D = 20$$
mA, $V_D = 0.8$ V de la curva:

c) En
$$V_D = -10V$$
, $I_D = -I_S = -1$ microAmp. de la curva

Resistencia en ac ó dinámica

Si aplicamos una señal senoidal en lugar de una entrada de cd la situación cambiará por completo. La entrada variante desplazará de manera instantánea el punto de operación 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 cuál se deriva de la palabra en inglés quiescente que significa estable ó sin variación.

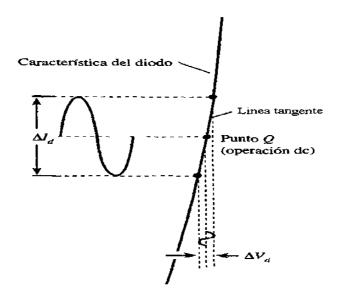


Figura 2.18 Definición de la resistencia dinámica ó en ac

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 ésta región en las características del diodo, por lo tanto:

$$Rdin = \frac{\Delta Vd}{\Delta Id}$$

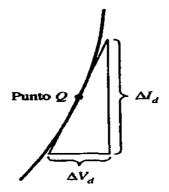


Figura 2.19 Determinación de la resistencia en ac en un punto Q

Mientras mayor sea la pendiente, menor será el valor de ΔV_D para el mismo cambio en ΔI_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

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

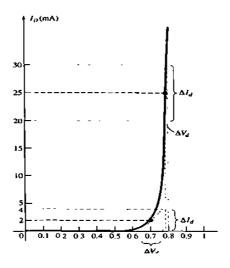


Figura 2.20 Gráfica del ejemplo 2.2

Solución:

a) Para $I_D=2mA$, la línea tangente a $I_D=2mA$ se dibujó 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 $I_D=4$ mA, $V_D=0.76$ V y para $I_D=0$ mA , $V_D=0.65$ 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 dibujó 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 :

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

$$\Delta V_d = 0.8V - 0.78 V = 0.02 V$$

y la resistencia de ca será:

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

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

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

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

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

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

Lo cuál excede la r_d de 2 Ω

Se ha encontrado la resistencia dinámica en forma gráfica, 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, ésto es :

$$\frac{d}{dV_D}(I_D) = \frac{d}{dV} \left[I_S \left(e^{kV_D/T_k} - 1 \right) \right]$$

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{k}{T_K} \left(I_D + I_S \right)$$

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

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{k}{T_K} I_D$$

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:

$$T_K = T_C + 273^\circ = 25^\circ + 273^\circ = 298^\circ$$

por lo que:

$$\frac{k}{T_K} = \frac{11,600}{298} = 38.93$$

$$\frac{dI_D}{dV_D} = 38.93I_D$$

Invirtiendo el resultado para definir una relación de la resistencia (R = V/I) se obtiene:

$$\frac{dV_D}{dI_D} = \frac{0.026}{I_D}$$

$$rdin = \frac{26mV}{I_D} \qquad _{Ge, SL}$$

Resistencia en ac promedio

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

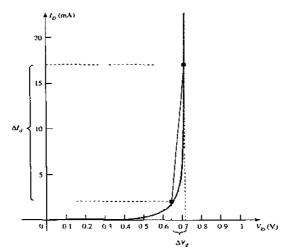


Figura 2.21 Determinación de la resistencia en ac promedio entre Los límites indicados

$$rav = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \mid_{\text{punto por punto}}$$

Para la situación presentada en la figura 2.21 se tiene :

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

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

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

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

$$rav = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.075V}{15mA} = 5\Omega$$

$$rav = 5\Omega$$

Тіро	Есиасібн	Características especiales	Determinación gráfica
DC 0 estática	$R_{D} = \frac{V_{D}}{I_{D}}$	Definida como un punto en las características	$\begin{array}{c} I_D \\ \\ \\ \\ V_D \end{array}$
AC o dinámica	$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$	Definida por una línea tangencial en el punto $oldsymbol{Q}$	$\underbrace{\begin{array}{c}I_{O}\\Q\end{array}}_{\Delta V_{d}}$
ac promedio	$r_{ m ac} = rac{\Delta V_d}{\Delta I_d} \Big _{ m punto a punto}$	Definida por una línea recta entre los límites de operación	ΔI_d

Tabla 2.1 Niveles de resistencia

CAPITULO 3

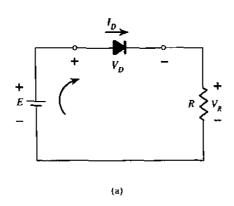
APLICACIONES DE LOS DIODOS

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 determinará el punto de operación del sistema. A éste análisis 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:

$$\mathbf{E} - \mathbf{V}_{\mathbf{D}} - \mathbf{V}_{\mathbf{R}} = 0$$

$$E \approx V_D + I_D R$$



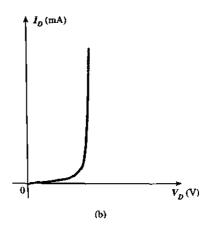


Figura 3.1 Configuración de diodo en serie, circuito y curva característica

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 $I_D = 0$ A y que en cualquier lugar del eje vertical $V_D = 0$ V.

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:

$$E = V_D + I_D R$$

$$E = 0V + I_D R$$

$$I_D = \frac{E}{R} \mid_{VD=0}$$

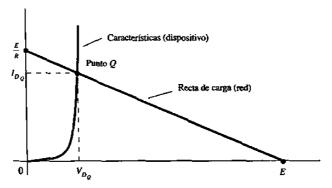


Figura 3.2 Recta de carga y selección del punto de operación

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

$$E = V_D + I_D$$

$$E = V_D + 0AR$$

$$V_D = E|_{ID=0}$$

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

- a) $V_{DQ} e I_{DQ}$
- b) V_{R.}

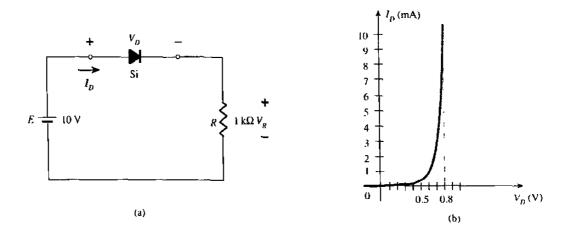


Figura 3.3a y 3.3b Circuito y características del ejemplo 3.1

Solución: a)
$$I_D = E / R \mid_{VD=0} = 10 \text{ V} / 1 \text{ K}\Omega$$

 $I_D = 10 \text{ mA}$
 $V_D = E \mid_{ID=0} = 10 \text{ V}$

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

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

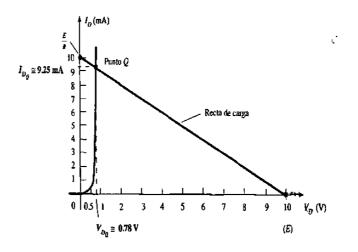


Figura 3.4 Solución del ejemplo 3.1

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

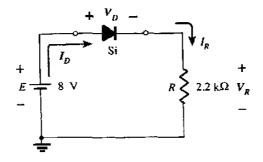


Figura 3.5 Circuito para el ejemplo 3.2

Solución:
$$V_D = 0.7 \; V$$

$$V_R = E - V_D = 8 \; V - 0.7 \; V = 7.3 \; V$$

$$I_D = I_R = V_R \; / \; R = 7.3 \; V \; / \; 2.2 \; K\Omega = 3.32 \; mA$$

Ejemplo 3.3.- Determine Vo e ID para el circuito en serie de la figura 3.6

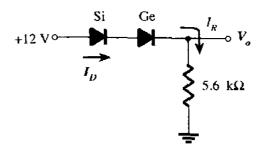


Figura 3.6 Circuito para el ejemplo 3.3.

Solución:
$$V_O = E - V_{T1} - V_{T2} = 12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.3 \text{ V} = 11 \text{ V}$$
 $I_D = I_R = V_R / R \approx V_O / R = 11 \text{ V} / 5.6 \text{ K}\Omega = 1.96 \text{ mA}$

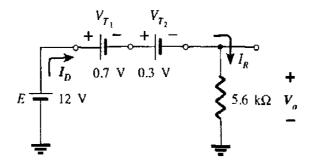


Figura 3.7 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Ejemplo 3.4.- Determine I, V₁, V₂, y V₀ para la configuración de cd en serie de la figura 3.8.

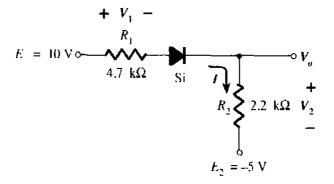
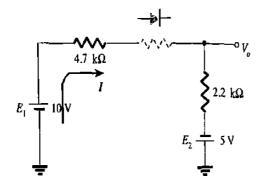


Figura 3.8 Circuito para el ejemplo 3.4

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 ése estado.



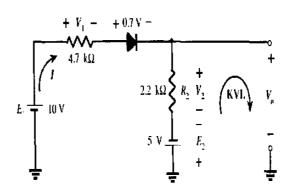


Figura 3.9 Estado del diodo para la red de la figura 3.8

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:

$$-E + V_2 - V_0 = 0$$

 $V_0 = V_2 - E_2 = 4.55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0.45 \text{ V}$

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

Ejemplo 3.5.- Determine V_0 , I_1 , I_{D1} , e I_{D2} para la configuración de diodo de la figura 3.11

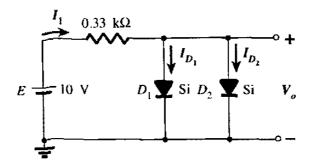


Figura 3.11 Red para el ejemplo 3.3

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

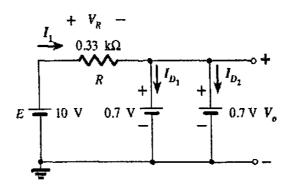


Figura 3.12 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Para la corriente:

$$I_1 = V_R / R = E - V_D / R = (10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) / 0.33 \text{ K}\Omega$$

 $I_1 = 28.18 \text{ mA}$

Suponiendo que los diodos tienen características similares, tenemos:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_1 / 2 = 28.18 \text{ mA} / 2 = 14.09 \text{ mA}$$

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

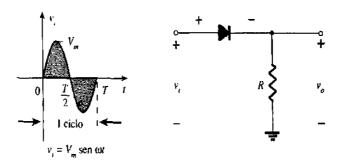


figura 3.15 Circuito rectificador de media onda

Este circuito de la figura es llamado: **rectificador de media onda,** el cuál generará una forma de onda v_0 , la cuál 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_i es:

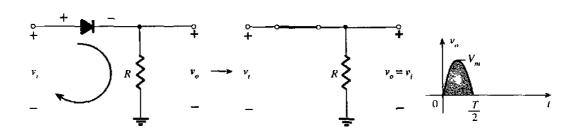


Figura 3.16 Región de conducción $(0 \rightarrow T/2)$

como para establecer presión en la dirección que se indica, y encender el diodo con la polaridad indicada arriba del diodo, ésto se muestra en la figura 3.16.

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

La entrada v_i y la salida v_o se dibujaron juntas en la figura 3.18 con el propósito de establecer una comparación. Por lo tanto, la señal de salida v_o tiene un área neta positiva arriba del eje sobre un período completo, y un valor promedio determinado por:

$$V_{dc} = 0.318 V_m |_{media onda}$$

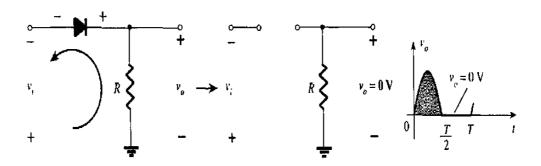


Figura 3.17 Región de no conducción ($T/2 \rightarrow T$)

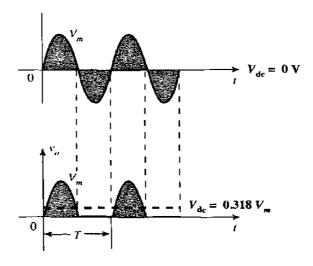


Figura 3.18 Señal rectificada de media onda

El proceso de eliminación 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 $V_T = 0.7V$ se señala en la figura 3.19 para la región de polarización 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_i menores que 0.7V el diodo aún está en estado de circuito abierto y $v_o = 0$, como lo indica la misma figura cuando conduce, la diferencia entre v_o y v_i se encuentra en un nivel fijo de $V_T = 0.7V$ y $v_o = v_i$ - V_T según se indica en la figura y obtenemos:

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

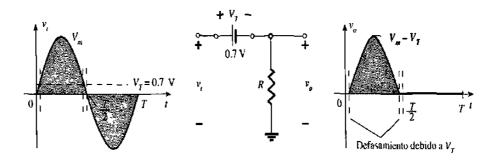


Figura 3.19 Efecto de V_T sobre la señal rectificada de media onda.

Ejemplo 3.7.-

- a) Dibuje la salida V_o y determine el nivel de cd de la salida $\;$ para la red de la figura 3.20
 - b) Repetir el inciso (a) si el diodo se sustituye por un diodo de silicio.
- c) Repita los incisos (a) y (b) si $V_{\rm m}$ se incrementa a 200 V y comparar las soluciones

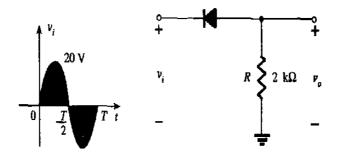


Figura 3.20 Circuito para el ejemplo 3.7

Solución.-

(a) En ésta 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 período completo, el nivel de cd es:

$$V_{cd} = -0.318 V_m = -0.318 (20 V) = -6.36 V$$

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

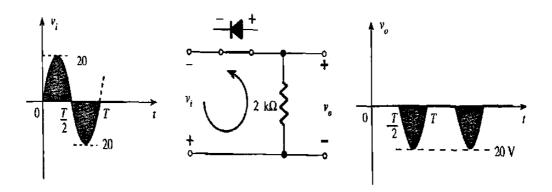


Figura 3.21 vo resultante para el circuito del ejemplo 3.7

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

$$V_{cd} = -0.318 (V_m - 0.7 V) = -0.318 (19.3 V) \approx -6.14 V$$

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

(c)
$$V_{cd} = -0.318 V_m = -0.318 (200 V) = -63.6 V.$$

ó también:

$$V_{ed} = -0.318 (V_m - V_T) = -0.318 (200 V - 0.7 V)$$

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

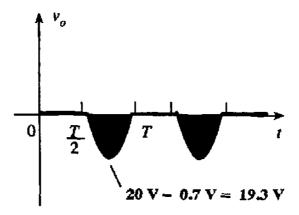


Figura 3.22 Efecto de V_T sobre la salida de la figura 3.21

La cuál 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 ó 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 ésto es:

valor PIV > Vm | rectificador de media onda

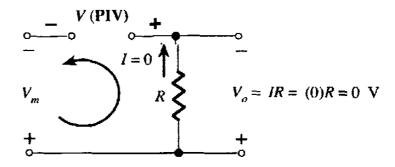


Figura 3.23 Determinación de PIV

Rectificación de onda completa

puente de diodos

El nivel de de 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 **puente**. Durante el período $t = 0 \rightarrow T/2$ 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_2 y D_3 están conduciendo, en tanto que D_1 y D_4 se hallan en estado apagado. Esto se observa en la figura 3.26.

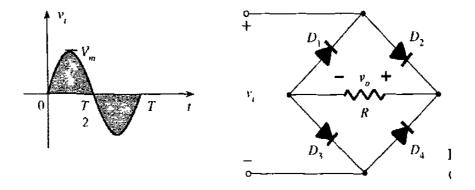


Figura 3.24 Circuito rectificador de onda completa

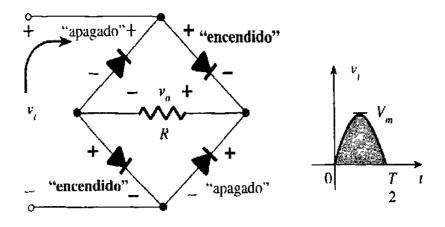


Figura 3.25 Red para el período de $0 \rightarrow T/2$

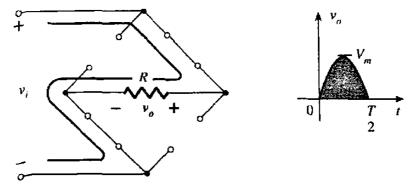


Figura 3.26 Red de conducción para la región positiva

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

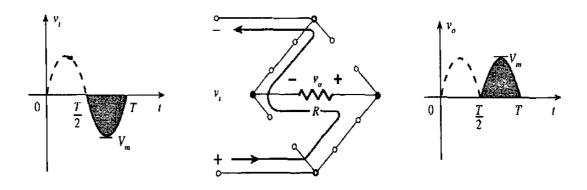


Figura 3.27 Red de conducción para región negativa

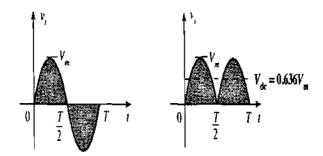


Figura 3.28 Formas de onda de entrada y salida

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, ésto es:

$$V_{dc} = 2(\ 0.318 V_m\)$$

$$V_{dc} = 0.636\ V_m |_{onda\ completa}$$

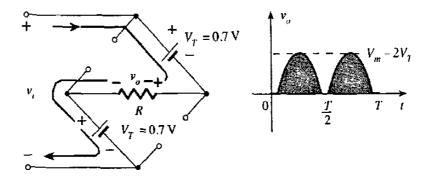


Figura 3.29 Determinación de vomáx para la configuración puente

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

$$v_i - V_T - v_o - V_T = 0$$

 $v_o = v_i - 2V_T$

el valor pico para el voltaje de salida V_{o} es por lo tanto:

$$V_{o \text{ max}} = V_m - 2V_T$$

$$V_{dc} = .0636(V_m - 2V_T)$$

Voltaje de Pico Inverso PIV

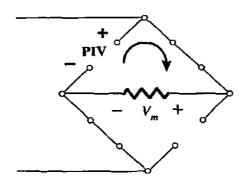


Figura 3.30 Determinación del PIV

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 región positiva de la señal de entrada, el voltaje máximo a través de R es V_m y el valor PIV será:

$$PIV \ge V_m \mid_{rectificador\ puente\ de\ onda\ completa.}$$

• derivación central

Un segundo rectificador de onda completa consta de dos diodos y un transformador con derivación central, figura 3.31, ésto se requiere para establecer la señal de entrada a través de cada sección 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

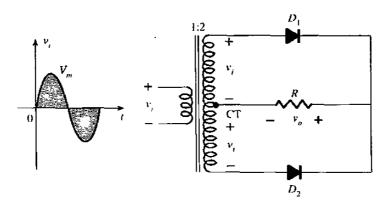


Figura 3.31 Circuito rectificador con derivación central

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 través de las resistencia de carga R, ésto se observa en la figura 3.33

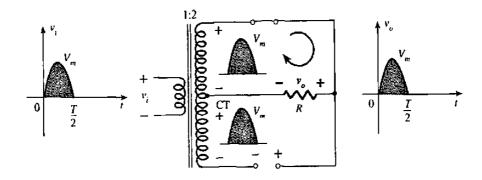


Figura 3.32 Condiciones de la red para la región positiva

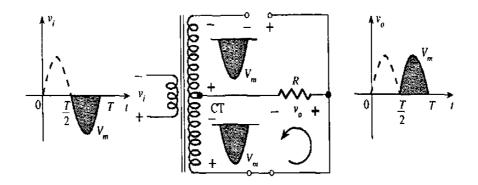


Figura 3.33 Condiciones de la red para la región negativa

Voltaje de Pico Inverso (PIV)

$$PIV = V_{secundario} + V_{R}$$
$$= V_{m} + V$$

 $PIV \geq 2V_{m}|_{\mbox{ Rectificador de onda completa con derivación central.}} \label{eq:piv}$

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.

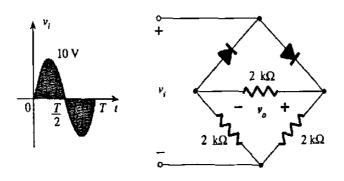


Figura 3.34 Red puente para el ejemplo 3.8

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 $v_0 = \frac{1}{2} v_i$ ó $V_{omáx} = \frac{1}{2} (10 \text{ V}) = 5 \text{ V}$, se muestra en la figura 3.36. En la parte negativa de la entrada se intercambiarán los papeles de los diodos y v_0 aparecerá como se indica en la figura 3.37

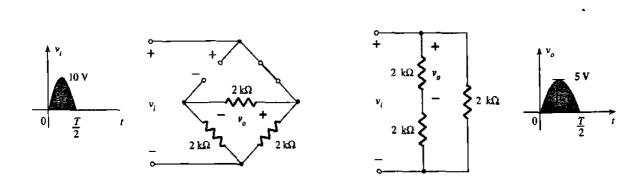


Figura 3.35 Red de la figura 3.34 para la región positiva

Figura 3.36 Red redibujada de la de la figura 3.35

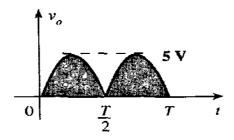


Figura 3.37 Gráfica de salida del ejemplo 3.8

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

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

CAPITULO 3

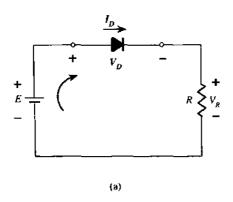
APLICACIONES DE LOS DIODOS

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 determinará el punto de operación del sistema. A éste análisis 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:

$$E - V_D - V_R = 0$$

$$E = V_D + I_D R$$



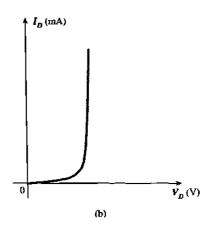


Figura 3.1 Configuración de diodo en serie, circuito y curva característica

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:

$$E = V_D + I_D R$$

$$E \approx 0V + I_DR$$

$$I_{D} = \frac{E}{R} \mid_{VD=0}$$

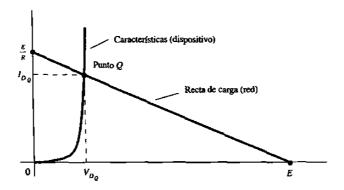


Figura 3.2 Recta de carga y selección del punto de operación

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

$$E = V_D + I_D$$

$$E = V_D + 0AR$$

$$V_D \approx E|_{ID-0}$$

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

- a) $V_{DQ} e I_{DQ}$
- b) V_{R_s}

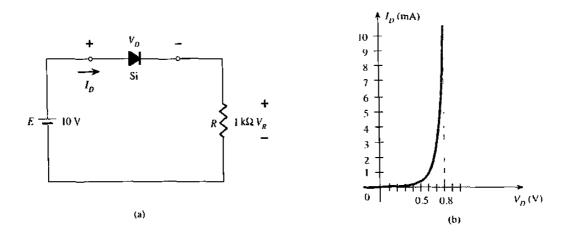


Figura 3.3a y 3.3b Circuito y características del ejemplo 3.1

Solución: a)
$$I_D = E / R \mid_{VD=0} = 10 \text{ V} / 1 \text{ K}\Omega$$

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

$$V_D = E \mid_{ID=0} = 10 \text{ V}$$

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

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

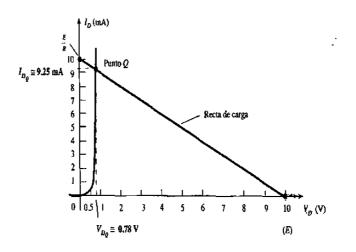


Figura 3.4 Solución del ejemplo 3.1

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

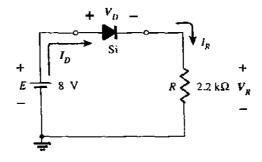


Figura 3.5 Circuito para el ejemplo 3.2

Solución:
$$V_D = 0.7 \ V$$

$$V_R = E - V_D = 8 \ V - 0.7 \ V = 7.3 \ V$$

$$I_D = I_R = V_R \ / \ R = 7.3 \ V \ / \ 2.2 \ K\Omega = 3.32 \ mA$$

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

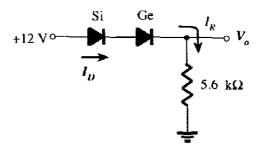


Figura 3.6 Circuito para el ejemplo 3.3.

Solución:
$$V_O = E - V_{T1} - V_{T2} = 12 \text{ V} - 0.7 \text{ V} - 0.3 \text{ V} = 11 \text{ V}$$

$$I_D = I_R = V_R / R = V_O / R = 11 \text{ V} / 5.6 \text{ K}\Omega = 1.96 \text{ mA}$$

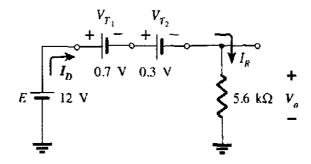


Figura 3.7 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Ejemplo 3.4.- Determine I, V₁, V₂, y V₀ para la configuración de cd en serie de la figura 3.8.

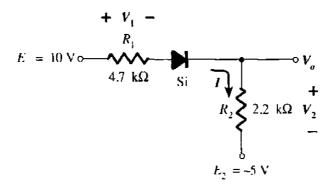
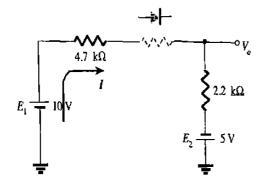


Figura 3.8 Circuito para el ejemplo 3.4

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 ése estado.



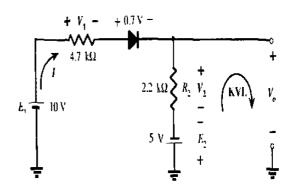


Figura 3.9 Estado del diodo para la red de la figura 3.8

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:

$$-E + V_2 - V_0 = 0$$

 $V_0 = V_2 - E_2 = 4.55 \text{ V} - 5 \text{ V} = -0.45 \text{ V}$

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

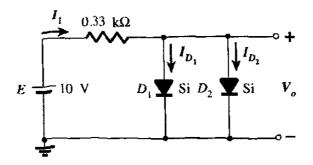


Figura 3.11 Red para el ejemplo 3.3

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

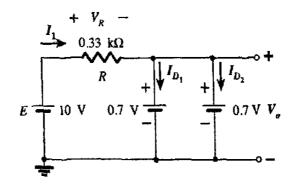


Figura 3.12 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Para la corriente:

$$I_1 = V_R / R = E - V_D / R = (10 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) / 0.33 \text{ K}\Omega$$

 $I_1 = 28.18 \text{ mA}$

Suponiendo que los diodos tienen características similares, tenemos:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_1 / 2 = 28.18 \text{ mA} / 2 = 14.09 \text{ mA}$$

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

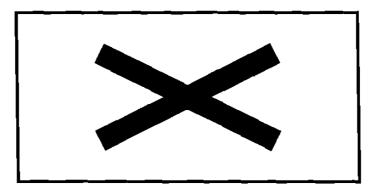


Figura 3.13 Circuito para el ejemplo 3.6

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:

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

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

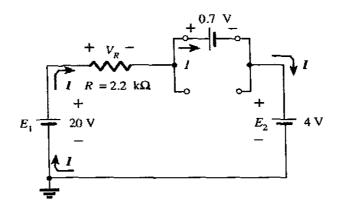


Figura 3.14 Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 3.6

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

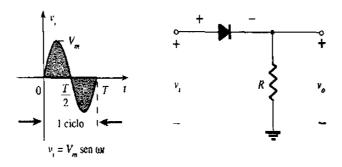


figura 3.15 Circuito rectificador de media onda

Este circuito de la figura es llamado: **rectificador de media onda,** el cuál generará una forma de onda v_0 , la cuál 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_i es:

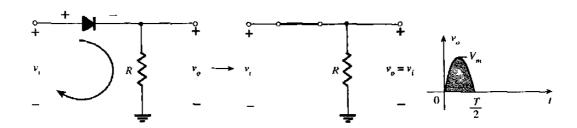


Figura 3.16 Región de conducción $(0 \rightarrow T/2)$

como para establecer presión en la dirección que se indica, y encender el diodo con la polaridad indicada arriba del diodo, ésto se muestra en la figura 3.16.

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

La entrada v_i y la salida v_o se dibujaron juntas en la figura 3.18 con el propósito de establecer una comparación. Por lo tanto, la señal de salida v_o tiene un área neta positiva arriba del eje sobre un período completo, y un valor promedio determinado por:

$$V_{dc} = 0.318 \ V_m \mid_{media \ onda}$$

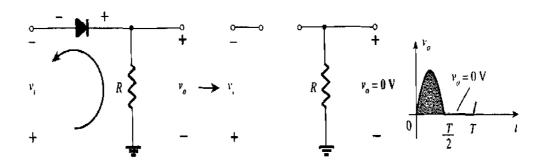


Figura 3.17 Región de no conducción ($T/2 \rightarrow T$)

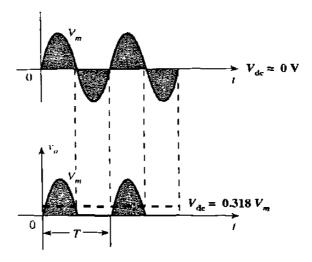


Figura 3.18 Señal rectificada de media onda

El proceso de eliminación 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 $V_T = 0.7V$ se señala en la figura 3.19 para la región de polarización 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_i menores que 0.7V el diodo aún está en estado de circuito abierto y $v_o = 0$, como lo indica la misma figura cuando conduce, la diferencia entre v_o y v_i se encuentra en un nivel fijo de $V_T = 0.7V$ y $v_o = v_i$ - V_T según se indica en la figura y obtenemos:

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

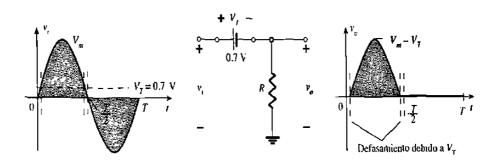


Figura 3.19 Efecto de V_T sobre la señal rectificada de media onda.

Ejemplo 3.7.-

- a) Dibuje la salida V_0 y determine el nivel de cd de la salida para la red de la figura 3.20
 - b) Repetir el inciso (a) si el diodo se sustituye por un diodo de silicio.
- c) Repita los incisos (a) y (b) si $V_{\rm m}$ se incrementa a 200 V y comparar las soluciones

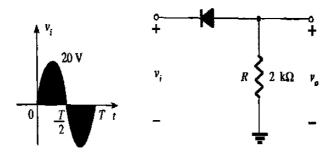


Figura 3.20 Circuito para el ejemplo 3.7

Solución.-

(a) En ésta situación el diodo conducirá durante la parte negativa de la entrada, como se ilustra en la figura 3.21 y v_0 aparecerá como se muestra en la misma figura para el período completo, el nivel de cd es:

$$V_{cd}$$
 = - 0.318 V_m = -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.

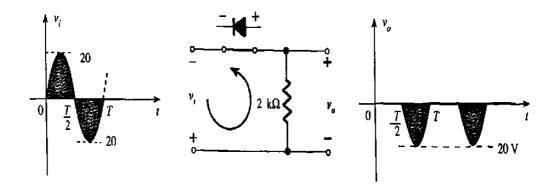


Figura 3.21 vo resultante para el circuito del ejemplo 3.7

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

$$V_{cd} = -0.318 (V_m - 0.7 V) = -0.318 (19.3 V) = -6.14 V$$

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

(c)
$$V_{cd} = -0.318 V_m = -0.318 (200 V) = -63.6 V.$$

ó también:

$$V_{cd} = -0.318 (V_m - V_T) = -0.318 (200 V - 0.7 V)$$

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

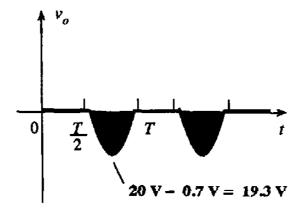


Figura 3.22 Efecto de V_T sobre la salida de la figura 3.21

La cuál 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 ó 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 ésto es:

valor PIV > V_m | rectificador de media onda

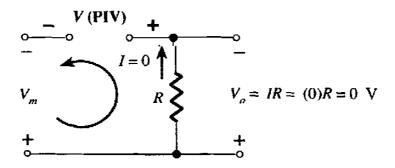


Figura 3.23 Determinación de PIV

Rectificación de onda completa

puente de diodos

El nivel de de 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 **puente**. Durante el período $t = 0 \rightarrow T/2$ 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_2 y D_3 están conduciendo, en tanto que D_1 y D_4 se hallan en estado apagado. Esto se observa en la figura 3.26.

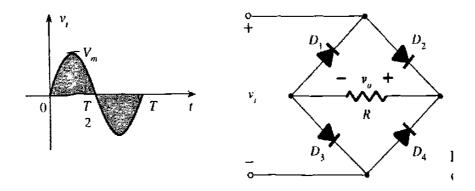


Figura 3.24 Circuito rectificador de onda completa

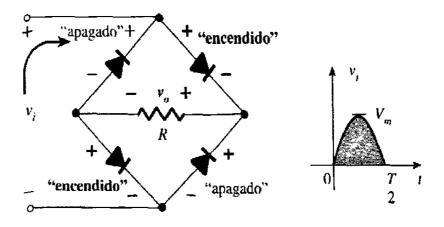


Figura 3.25 Red para el período de $0 \rightarrow T/2$

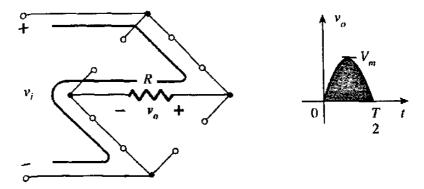


Figura 3.26 Red de conducción para la región positiva

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

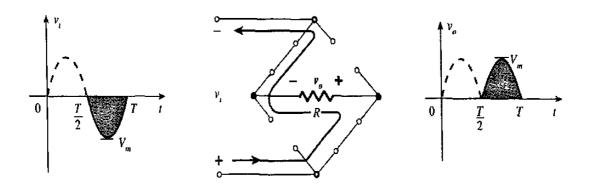


Figura 3.27 Red de conducción para región negativa

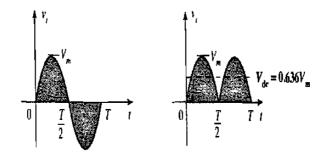


Figura 3.28 Formas de onda de entrada y salida

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, ésto es:

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

 $V_{dc} = 0.636 |V_m|_{onda completa}$

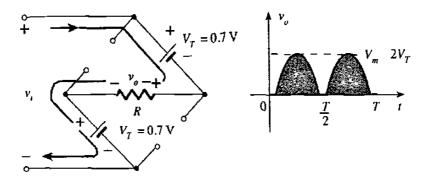


Figura 3.29 Determinación de vomáx para la configuración puente

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

$$v_i - V_T - v_o - V_T = 0$$

 $v_o = v_i - 2V_T$

el valor pico para el voltaje de salida V_{o} es por lo tanto:

$$V_{\text{o máx}} = V_{\text{m}} - 2V_{T}$$

$$V_{\text{dc}} = .0636 (\ V_{\text{m}} - 2V_{T}\)$$

Voltaje de Pico Inverso PIV

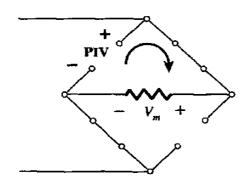


Figura 3.30 Determinación del PIV

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 región positiva de la señal de entrada, el voltaje máximo a través de R es V_m y el valor PIV será:

• derivación central

Un segundo rectificador de onda completa consta de dos diodos y un transformador con derivación central, figura 3.31, ésto se requiere para establecer la señal de entrada a través de cada sección 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

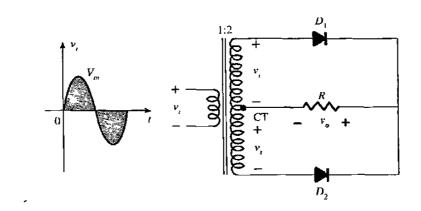


Figura 3.31 Circuito rectificador con derivación central

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 través de las resistencia de carga R, ésto se observa en la figura 3.33

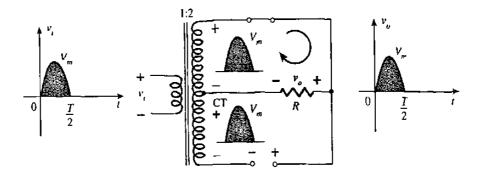


Figura 3.32 Condiciones de la red para la región positiva

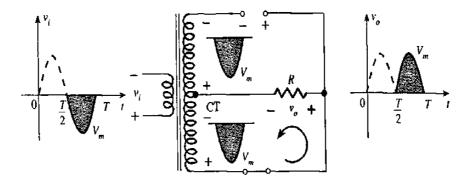


Figura 3.33 Condiciones de la red para la región negativa

Voltaje de Pico Inverso (PIV)

$$PIV = V_{secundario} + V_{R}$$
$$= V_{m} + V$$

 $PIV \geq 2V_{\text{ml}} \left| \text{ Rectificador de onda completa con derivación central.} \right.$

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.

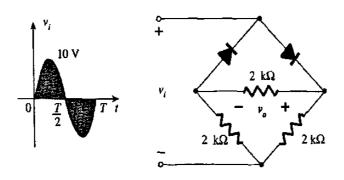


Figura 3.34 Red puente para el ejemplo 3.8

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 $v_0 = \frac{1}{2} v_i$ ó $V_{omáx} = \frac{1}{2} (10 \text{ V}) = 5 \text{ V}$, se muestra en la figura 3.36. En la parte negativa de la entrada se intercambiarán los papeles de los diodos y v_0 aparecerá como se indica en la figura 3.37

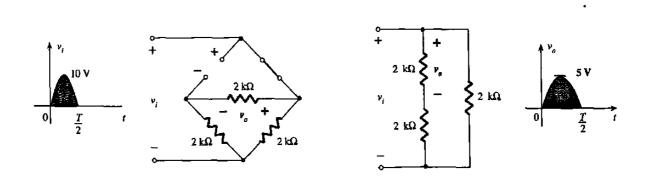


Figura 3.35 Red de la figura 3.34 para la región positiva

Figura 3.36 Red redibujada de la de la figura 3.35

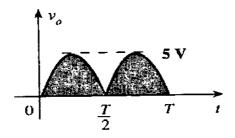


Figura 3.37 Gráfica de salida del ejemplo 3.8

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

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

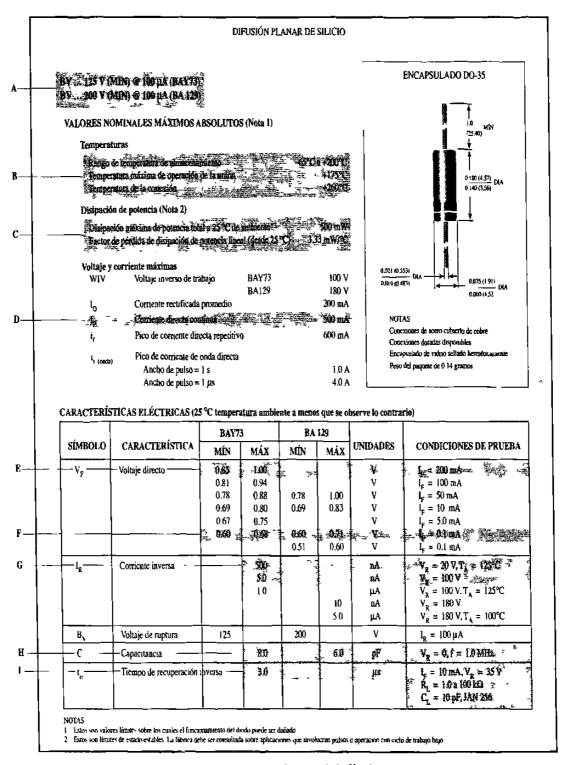


Tabla 3.1 Especificaciones del diodo

CAPITULO 4

DIODOS ESPECIALES

4.1 DIODO IDEAL

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

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

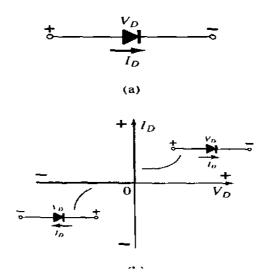


Figura 4.1 Diodo ideal, símbolo, curva característica

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 actúa como interruptor cerrado (conduce corriente) y en polaridad inversa será interruptor abierto (no conduce corriente).

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

La polaridad de voltaje aplicado se muestra en la figura 4.2a la característica 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 característica es en la izquierda del eje horizontal en la figura.

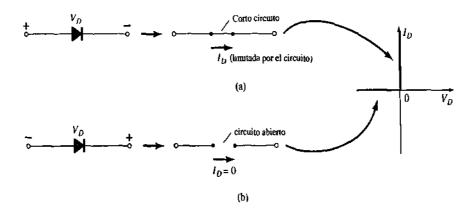


Figura 4.2 a) Estados de conducción b) no conducción del diodo ideal

en éste trabajo la abscisa (eje x) corresponderá al eje de voltaje y la ordenada (eje y) será el eje de la corriente.

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

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} = \frac{0V}{2.3, mA, ..., s\'olo \cdot un \cdot valor \cdot positivo} = 0\Omega \text{ (corto circuito)}$$

dónde 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:

$$R_{R} = \frac{V_{R}}{I_{R}} = \frac{-5,-20, 6 \cdot cualquier \cdot potencial \cdot de \cdot polarización \cdot inversa}{0 \cdot mA} = \infty \Omega$$

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 ó 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.

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

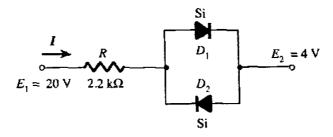


Figura 3.13 Circuito para el ejemplo 3.6

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:

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

 $I = 6.95 \text{ mA}$

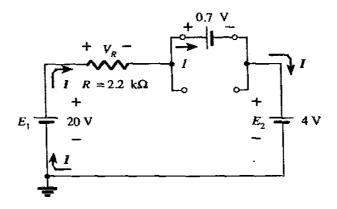


Figura 3.14 Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 3.6

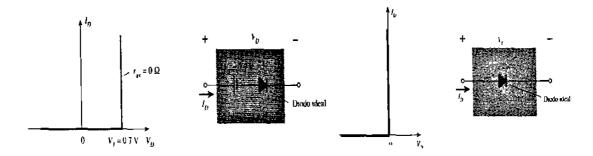
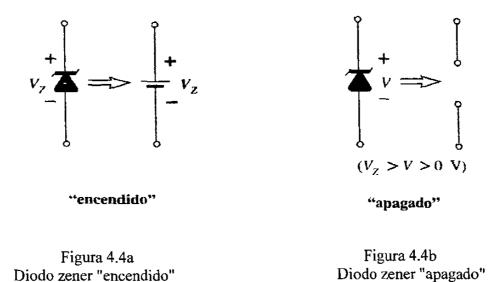


Fig.4.3a Circuito equivalente simplificado para el diodo semiconductor de Si

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.



Región Zener.

Una aplicación de un voltaje demasiado negativo dará 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 éste 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 avalanacha. A éste cambio en la característica a cualquier nivel se conoce como: región zener. y a éstos diodos que aprovechan ésta 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).

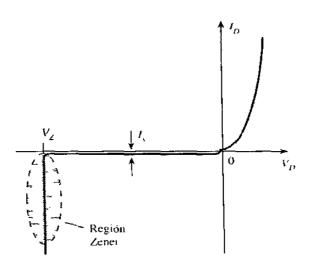


Figura 4.5 Región zener

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

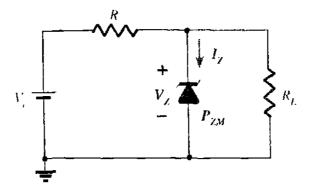


Figura 4.6 Regulador zener básico

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

$$V = V_L = \frac{V_i R_L}{R_L + R}$$

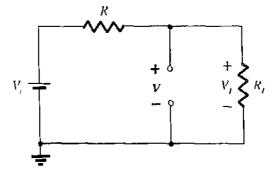


Figura 4.7 Determinación del estado del diodo zener

Si $V > V_Z$ el diodo Zener está en estado de conducción y se representa mediante el modelo equivalente de la fig 4.4a Si $V < V_Z$ el diodo está en estado de no conducción y se representa mediante un circuito abierto como en la figura 4.4b

 Sustitúyase el circuito equivalente apropiado y resuélvase para las incógnitas 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

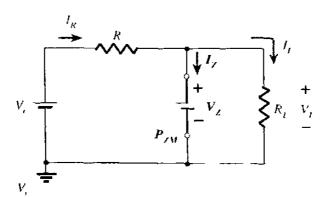


Figura 4.8 Circuito equivalente zener cuando está encendido

$$V_L = V_Z$$

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

$$I_R = I_Z + I_L$$

$$I_Z = I_R - I_L$$

$$I_L = V_L/R_L$$

$$I_R = V_R/R = V_i - V_L/R$$

La potencia disipada por el diodo Zener será:

$$P_7 = V_7 I_7$$

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

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

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

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

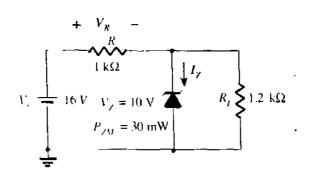


Figura 4.9 Circuito del ejemplo 4.1

Solución:

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

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

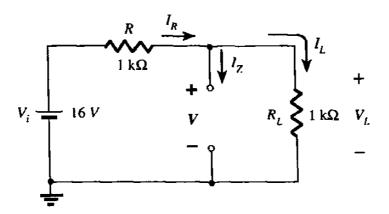


Figura 4.10 Circuito equivalente del ejemplo 4.1

Puesto que V = 8.73 V es menor que $V_Z = 10$ 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 obtendrá la misma red de la figura 4.10 en dónde hallamos que:

$$V_L = V = 8.73 \text{ V}$$

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

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

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

Aplicando la siguiente ecuación llegaremos a:

$$V = \frac{R_t V_t}{R + R_t} = \frac{3k\Omega(16V)}{1k\Omega + 3k\Omega} = 12 \text{ V}$$

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

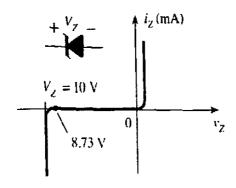
$$V_L = V_Z = 10 \text{ V}$$
 $V_R = V_i - V_L = 16 \text{ V} - 10 \text{ V} = 6 \text{ V}$
 $I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{10V}{3k\Omega} = 3.33 \text{ mA}$
 $I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6V}{1k\Omega} = 6 \text{ mA}$

de modo que : $I_Z = I_R - I_L$
 $I_Z = 6 \text{ mA} - 3.33 \text{ mA}$
 $I_Z = 2.67 \text{ mA}$

La potencia disipada será:

$$P_Z = V_Z I_Z = (10 \text{ V})(2.67 \text{ mA}) = 26.7 \text{ mW}$$

Lo cuál es menor que el valor especificado de P_{ZM} = 30 mW



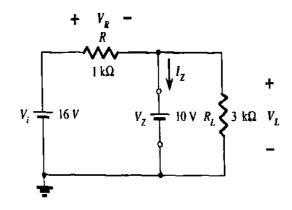
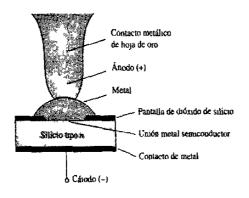


Figura 4.11
Punto de operación resultante del ejemplo 4.1

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 semiconductora de metal en la forma que se muestra en la figura 4.13.



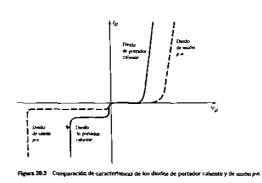


Figura.4.13
Diodo de portadores calientes ó de barrera de superficie

Figura.4.14
Comparación de curvas del diodo Schottky
y del unión 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, ó 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 dá como resultado un tiempo de recuperación inverso de niveles mucho más inferiores. Esta es la razón principal de por que 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 figura 4.15 y 4.16

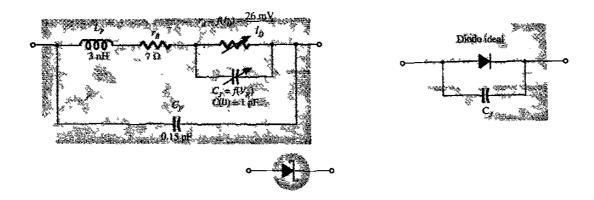


Figura.4.15 Circuito equivalente diodo Schottky

Figura.4.16 Circuito equivalente aproximado

La Lp y la Cp son valores del encapsulado y la r_B es la resistencia en serie, la cuál incluye la resistencia de contacto y la de volúmen. 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 esta 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:

$$C_T = \in \frac{A}{W_d}$$

donde \in es la permitividad de los materiales semiconductores, A es el área de la unión **p-n** y W_d el ancho de la región de agotamiento. Conforme aumenta el potencial de polarización inversa, se incrementa el ancho de la región 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 símbolos empleados más comúnmente para el diodo varicap y una primera aproximación para su circuito equivalente en la región de polarización inversa. Puesto que nos encontramos en la región de polarización inversa, la resistencia R_R en el circuito equivalente es muy grande en la magnitud (los valores comúnes son de 1 $M\Omega$ ó mayores) en tanto que R_s la resistencia geométrica del diodo es, como indica en la figura 4.18 sumamente pequeña. La magnitud de C variará aproximadamente 2 a 100 pF, dependiendo del varicap que se considere.

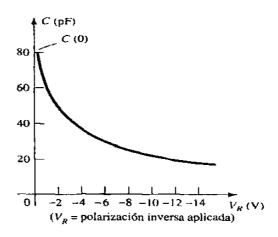


Figura.4.17 Características del varicap

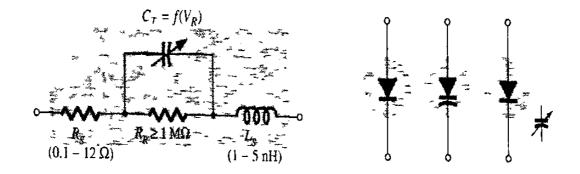


Figura.4.18 Circuito equivalente en la región de polarización inversa y símbolos

Si el dispositivo opera a altas frecuencias es necesario incluir la inductancia L_S ésto dará como resultado una frecuencia límite. La frecuencia resonante del dispositivo se determina mediante: $f_0 \approx 1/2\pi$ LC y afecta el intervalo de aplicación.

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

4.5 DIODO TUNEL

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

El diodo túnel se fabrica dopando el material semiconductor que formará la unión **p-n** en un nivel de cien a miles de veces mayor que un diodo semiconductor típico.

Esto producirá una región de agotamiento bastante reducida del orden de magnitud de 10⁻⁶ cm ó 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 ó picosegundos.

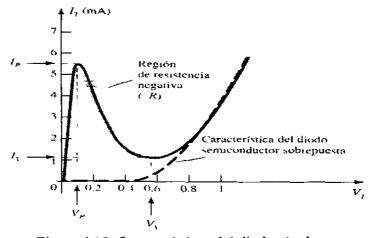


Figura 4.19 Características del diodo túnel

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.

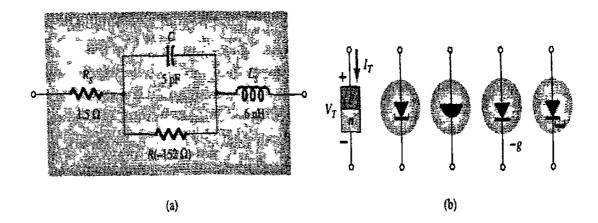


Figura. 4.20 Circuito equivalente y símbolos del diodo túnel

4.6 FOTODIODOS

El fotodiodo es un dispositivo semiconductor llamado también dispositivo optoelectrónico de unión p-n cuya región de operación esta 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

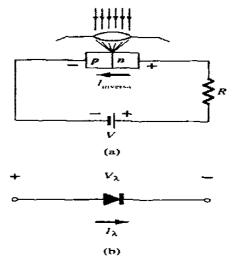


Figura 4.21 Polarización básica, construcción y símbolo del fotodiodo

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.

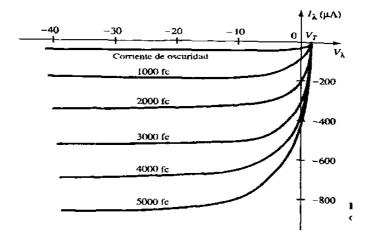


Figura 4.22 Características del fotodiodo

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.

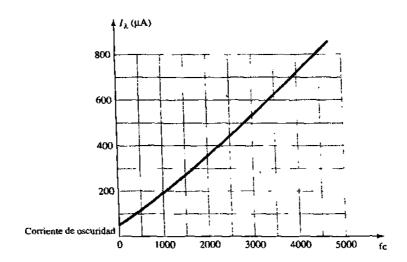


Figura 4.23 Características de fc para el fotodiodo

CAPITULO 5

TRANSISTORES BIPOLARES

5.1 INTRODUCCIÓN

Las ventajas que presenta éste dispositivo **transistor** de estado sólido de tres terminales respecto al bulbo se manifiestan de inmediato: es más pequeño y ligero no requiere de calentamiento ó disipación de calor, su construcción es resistente y es más eficiente debido a que consume menos potencia y sus voltajes de operación son más bajos. Estos dispositivos constan de por lo menos de tres terminales la cuál 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 cuáles 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.

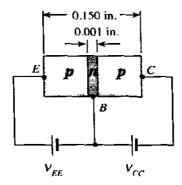


Figura 5.1a Transistor tipo pnp

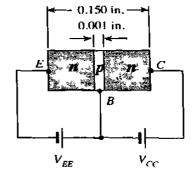


Figura 5.1b Transistor tipo npn

La capa de **emisor** se encuentra fuertemente dopada, la **base** ligeramente dopada y el **colector** sólo muy poco dopada. El dopado de la capa central es también mucho menor que el dopado de las capas exteriores (casi siempre 10:1 ó menos). Este nivel bajo de dopado disminuye la conductividad (aumenta la resistencia) de éste 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 sólo 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 basecolector. Existe una similitud con la polarización directa del diodo, el espesor de la región de agotamiento se redujo debido a la polarización aplicada ésto dá como resultado un flujo muy considerable de portadores mayoritarios desde el material tipo-p hacia el tipo-n.

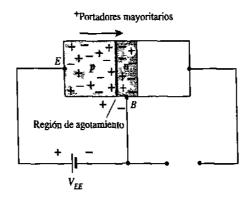


Figura 5.2 Unión con polarización directa de un transistor pnp

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 sólo 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, ésto es, tuvo lugar una **inyección** de portadores minoritarios al material de la región de la base tipo-n.

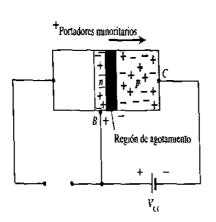


Figura 5.3 Unión con polarización inversa de un transistor pnp

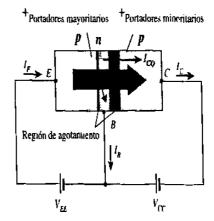


Figura 5.4 Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios

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

$$I_{\rm E} = I_{\rm C} + I_{\rm B}$$

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 común se deriva de hecho que la base es común tanto a la entrada como en la salida de la configuración, por lo regular la base es la terminal más 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 símbolos electrónicos tienen una dirección definida para ésta convención.

La flecha en el símbolo gráfico define la dirección de la corriente del emisor (flujo convencional) a través del dispostivo.

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

En la figura 5.6 se muestra el conjunto de gráficas de entrada para el amplificador base común relacionando la corriente de entrada I_E con un voltaje de entrada V_{BE} para varios niveles de voltaje de salida V_{CB} .

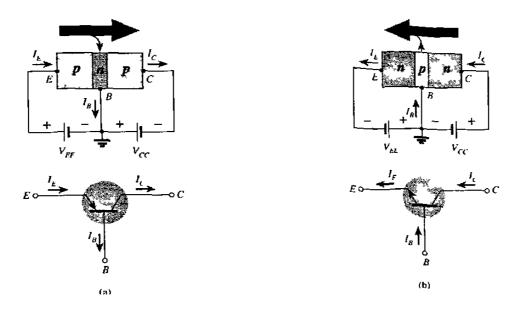


Figura 5.5a y b Circuitos de configuración base común pnp y npn respectivamente

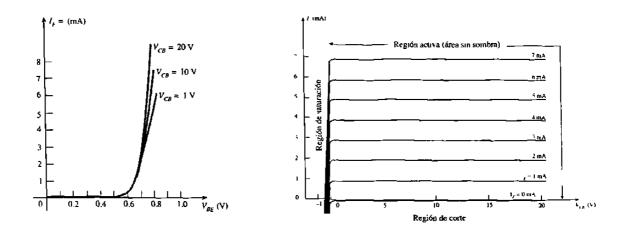


Figura 5.6 Características de entrada del base común

Figura 5.7 Características de salida del base común

El conjunto de salida relacionará 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 caracacterísticas de la salida ó colector tiene tres regiones región de saturación (RS). La región normal activa es la que se utiliza para los básicas de interés las cuáles son: región normal activa (RNA) región de corte (RC), amplificadores lineales (sin distorsión).

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 ésta por las relaciones básicas de corriente del transistor, ésto es:

$$I_C = I_E$$

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

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

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

Una vez que el transistor se encuentra en estado de "encendido" el voltaje baseemisor será:

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

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** (α)

$$\alpha = I_C/I_E$$

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 $I_C = I_E$ suponiendo que $I_B = 0$ 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 $I_E = I_C$ luego se insertan las fuentes de cd con la polaridad correspondiente que soportarán la dirección resultante de la corriente.

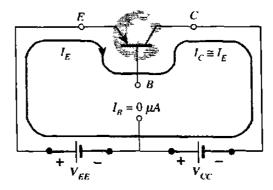


Figura 5.8 Polarización del trasnsistor pnp en base común

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 más 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 20Ω para la resistencia de entrada se encuentra que:

$$Ii = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200mV}{20\Omega} \approx 10 \text{ mA}$$

$$como: I_C = I_E$$

$$I_L = I_i = 10 \text{ mA}$$

$$V_L = I_L R$$

$$V_L = (10 \text{ mA}) (5 \text{ k}\Omega)$$

$$V_L = 50 \text{ V}$$

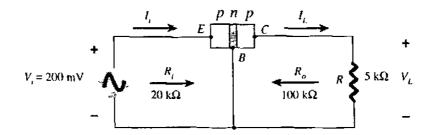


Figura 5.9 Acción básica de amplificación de voltaje de base común

la amplificación de voltaje será:

$$A_{v} = \frac{V_{L}}{V_{i}} = \frac{50V}{200mV} = 250$$

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 más a menudo y se le denomina configuración de emisor común debido a que el emisor es común ó hace referencia a las terminales tanto de entrada como de salida en la figura 5.10 se muestra ésta configuración para los dos tipos de transistores. Las corrientes de emisor, colector y base se muestran en su dirección convencional para la corriente.

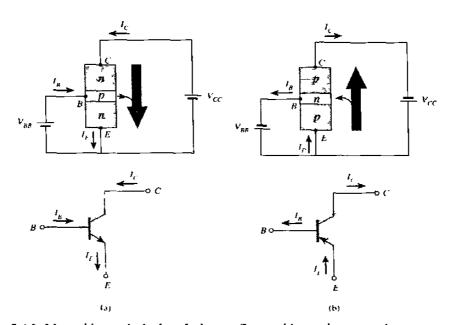


Figura 5.10 Notación y símbolos de la configuración emisor común en un npn y pnp

Las características de salida son una gráfica de la corriente de salida I_C en función del voltaje de salida V_{CE} para un rango de valores de corriente de entrada I_B y las características de entrada son una gráfica de la corriente de entrada I_B en función 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. Aquí las curvas de I_B no son tan horizontales