

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
Y ELECTRICA**

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**AUTO-
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA**

POR:

ING. JOSE FLORENCIO SILVA GARCIA

T E S I S

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

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

AUTO-

1998
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

TM
25853
25853
25853
25853



1020124766



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ENCUADERNACIONES MODERNAS AMERICANAS
JESUS M. GARCIA 1217 OTE.
COL. SAN JUAN
MONTERREY, N. L. MEXICO
TEL. 374-02-59

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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



AUTO-
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

UANL

POR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
ING. JOSE FLORENCIO SILVA GARCIA [®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

T E S I S

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

EN NICOLAS DE LOS GARZA N.º 2 DICIEMBRE DE 1998



UANL



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

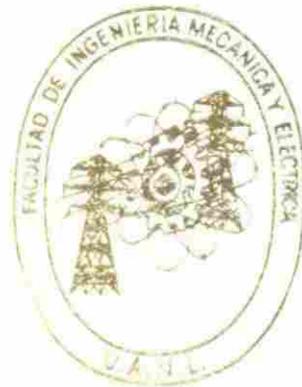
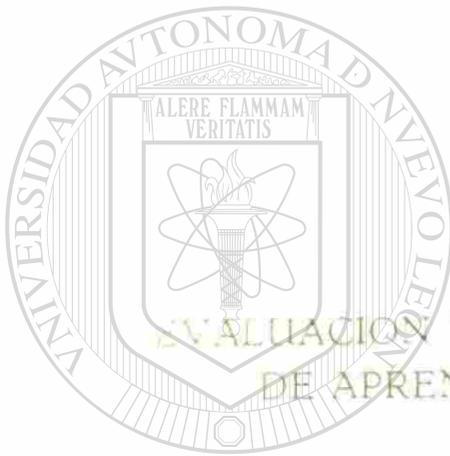
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

**FONDO
TESIS**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

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



AUTO-
EVALUACION Y COMPROBACION DE CALIDAD
DE APRENDIZAJE EN ELECTRONICA

U A N L

PCIR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
ING. JOSÉ FLORENCIO SILVA GARCÍA

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

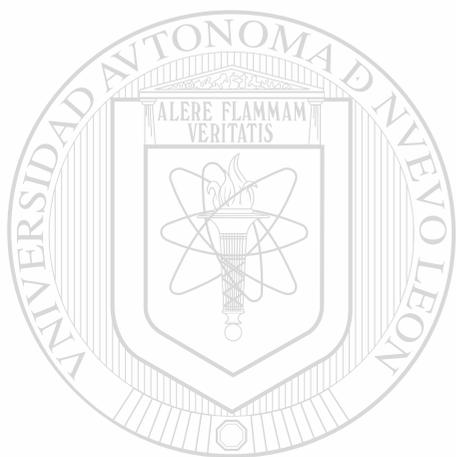
T E S I S

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

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

TM
75853
.M2
FIME
1998
CE

0129-73660



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



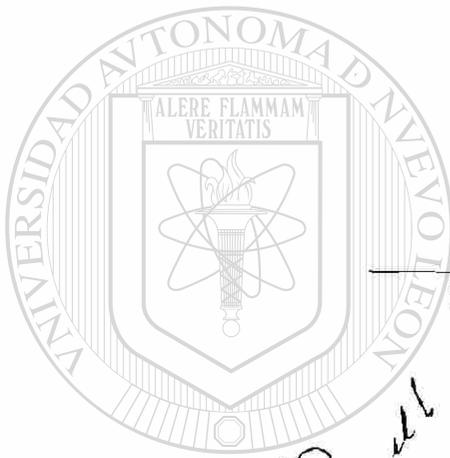
**FONDO
TESIS**

CIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®

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

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



El Comité de Tesis

M.C. José René Medina Cantú
Asesor

M.C. José B. Rivera Martínez
Coasesor

M.C. Leopoldo René Villareal J.
Coasesor

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

SÍNTESIS

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

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

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

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

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

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

CONTENIDO

Prólogo	i
Síntesis	ii
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	3
Capítulo 2 Materiales semiconductores	4
2.1 Introducción	4
2.2 Niveles de energía	7
2.3 Materiales extrínsecos	8
2.4 Diodo semiconductor	11
2.5 Niveles de resistencia	16
Capítulo 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
Capítulo 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 tunel	72
4.6 Fotodiodo	74

Capítulo 5 Transistores Bipolares 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

Capítulo 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

Capítulo 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

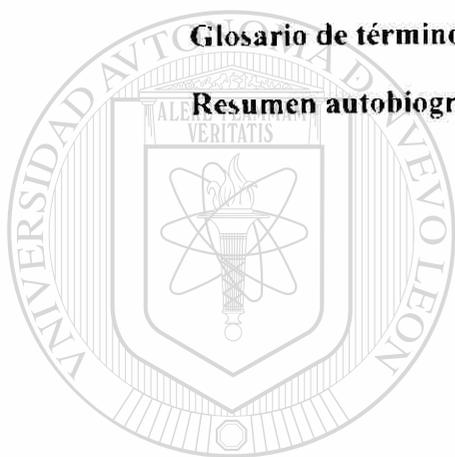
Capítulo 8 Polarizaciones del transistor de efecto de campo 151

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

Capítulo 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

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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 este 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 electronicos.

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

1.3 JUSTIFICACION

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

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

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 electo de campo, así como un software (PSPICE) para simulación de circuitos electricos y electronicos.

La metodología empleada en este trabajo consiste primero en definir sus simbolos 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.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

CAPITULO 2

MATERIALES SEMICONDUCTORES

2.1 INTRODUCCIÓN

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

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

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

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

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

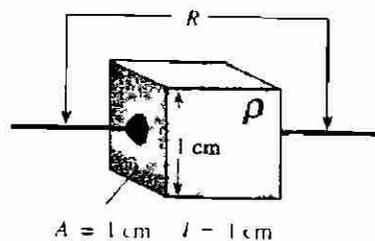


Figura 2.1 Definición de las unidades metricas de resistividad.

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

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

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

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

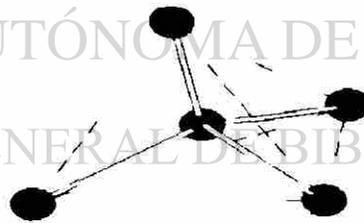


Figura 2.2 L estructura de un solo cristal de germanio y silicio

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

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

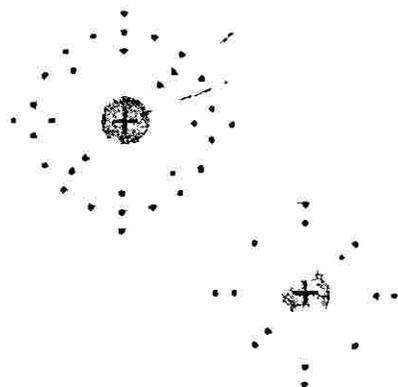


Figura. 2.3

Estructura atómica germanio y silicio

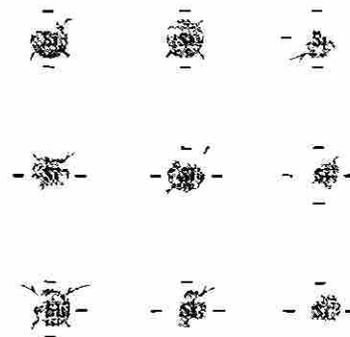


Figura. 2.4

Unión covalente del átomo de silicio

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

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

Una unión de átomos fortalecida por el compartimiento de electrones se denomina: **Enlace covalente**. Este enlace generara una unión más fuerte entre los electrones de valencia y su átomo, pero todavía es posible para los electrones absorber energía cinética y romper 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 1.5×10^1 portadores libres.

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

A los electrones libres localizados en el material que se deben solo a causas naturales se les conoce como **portadores intrínsecos**. El material intrínseco de germanio tiene aproximadamente 2.5×10^7 transmisores libres por centímetro cúbico. El germanio es un mejor conductor a temperatura ambiente.

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

2.2 NIVELES DE ENERGÍA

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

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

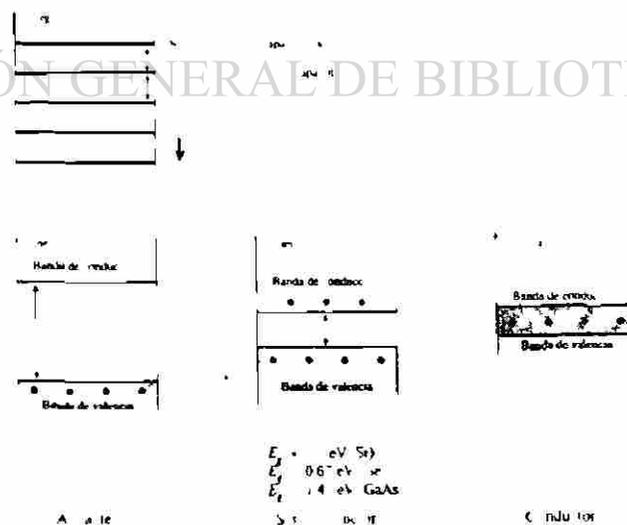


Figura 2,5 Niveles de energía.

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

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

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

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

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

2.3 MATERIALES EXTRÍNSECOS

tipo - n y tipo - p

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

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

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

Material tipo - n

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

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

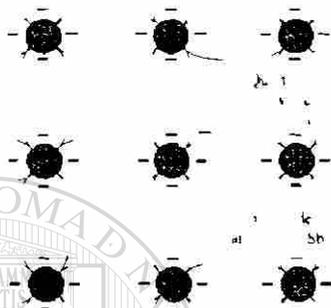


Figura.2.6 Impurezas de boro en el material tipo-p

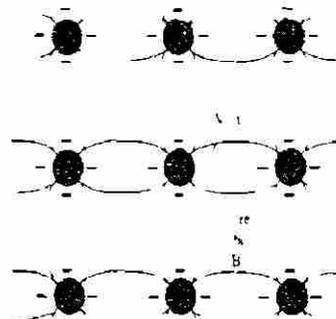


Figura 2.7 Impurezas de antimonio en el material tipo-n

Las cuatro uniones covalentes se encuentran presentes, pero existe un quinto electron debido al átomo de impurezas, éste se encuentra desasociado de cualquier unión covalente. Este electron 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 mas utilizados son: el boro, galio e indio. El efecto de alguno de estos elementos como el boro sobre el silicio se muestra en la figura 2.6

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

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

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

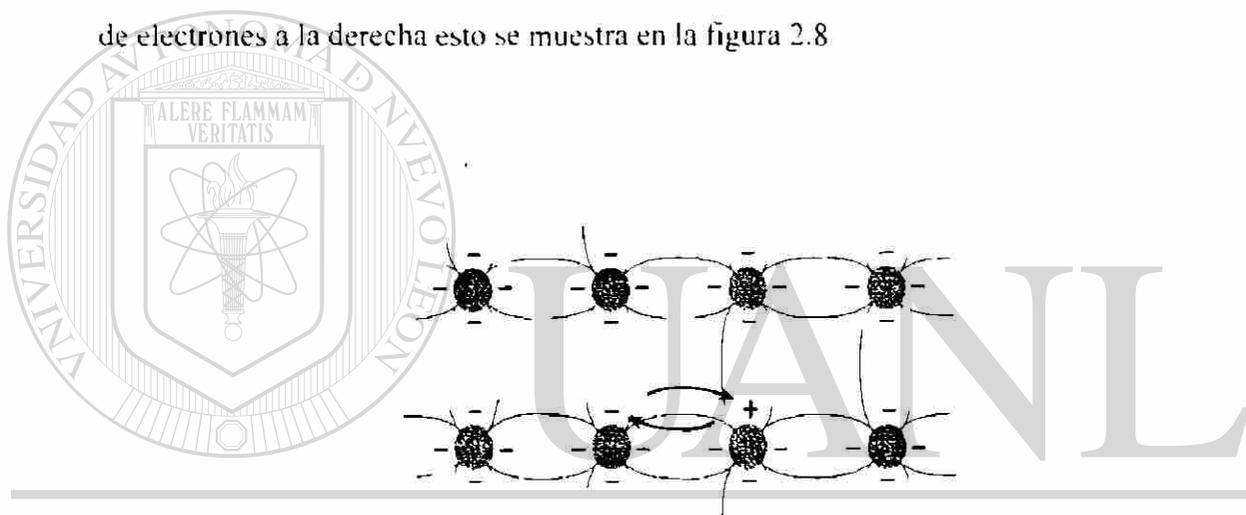


Figura 2.8 Flujo de electrones en función del flujo de huecos

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Portadores mayoritarios y minoritarios

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

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

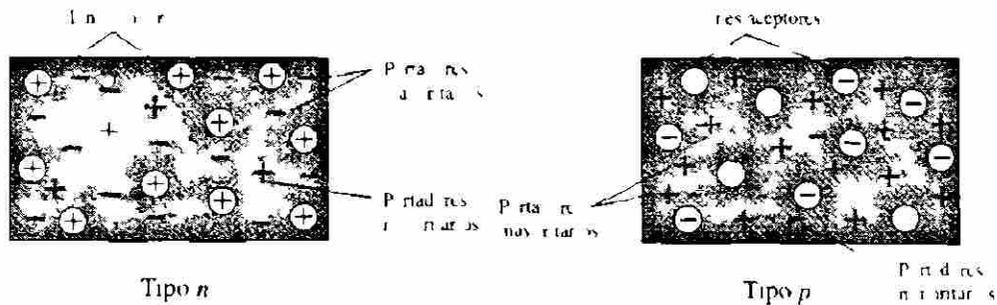


Figura 2.9 a
Material tipo-n

Figura 2.9 b
Material tipo-p

2.4 DIODO SEMICONDUCTOR

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

A esta región de iones positivos y negativos descubiertos se le llama: **región de agotamiento**, esto 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

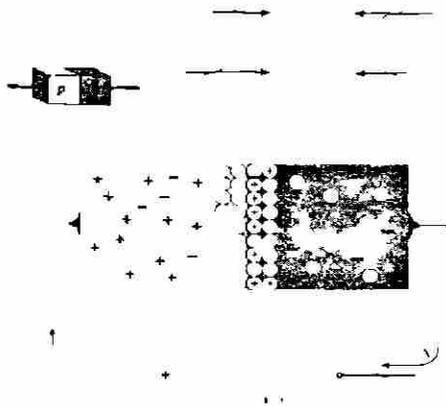


Figura 2.10
Unión p-n sin polarización externa

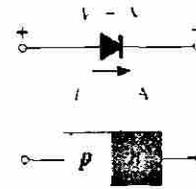


Figura 2.11
Diodo semiconductor sin polarización

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 ($V_D < 0 \text{ V}$)

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

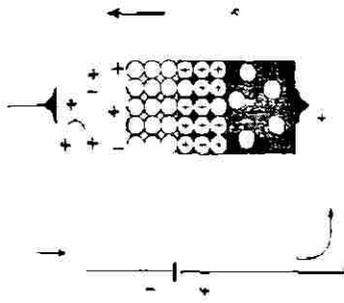


Figura 2.12
Unión p-n con polarización inversa

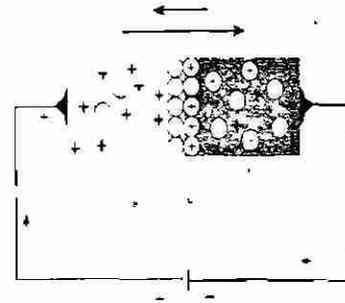


Figura 2.13
Unión p-n con polarización directa

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

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

Polarización Directa ($V_D > 0 V$)

Una condición de polarización directa ó "encendido" se establece al aplicar el potencial positivo al material tipo-p y el potencial negativo al material tipo-n, como se muestra en la figura 2.13

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

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

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

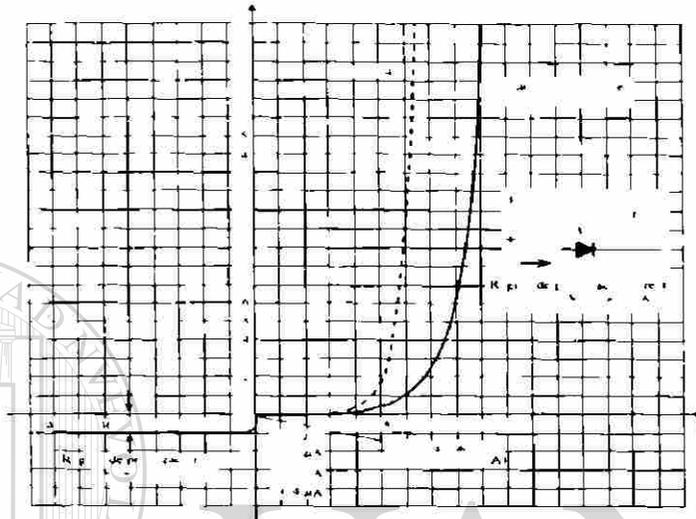


Figura 2.14 Características del diodo semiconductor de silicio

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

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

donde I_s = corriente de saturación inversa.

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

$$T_k = T_c + 273$$

por lo tanto tenemos que:

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

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

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

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

Diodo de silicio con respecto al diodo de germanio

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

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

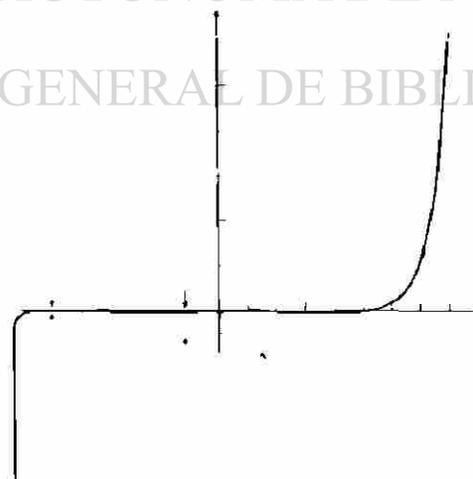


Figura 2.15 Comparación de diodos semiconductores de Si y Ge

2.5 NIVELES DE RESISTENCIA

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

Resistencia de cd ó estática

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

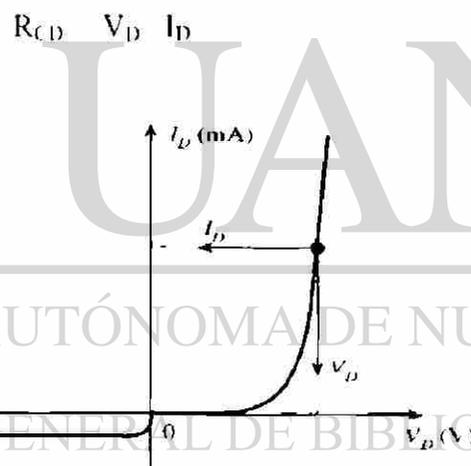


Figura 2.16 Determinación de la resistencia estática

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

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

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

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

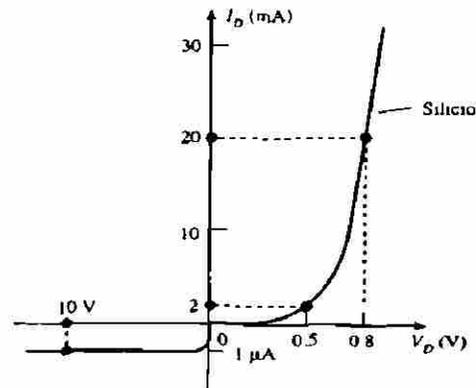
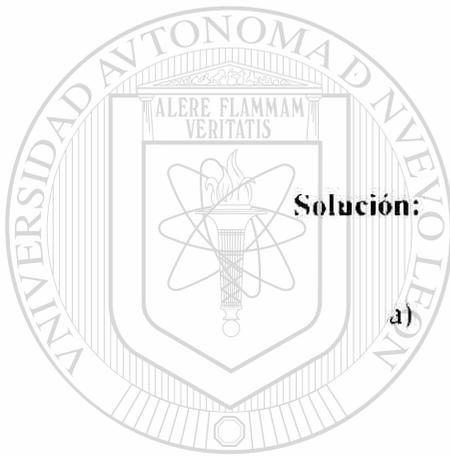


Figura 2.17 Grafica del ejemplo 2.1



Solución:

a)

En $I_D = 2\text{mA}$, $V_D = 0.5\text{V}$ de la curva

$R_{CD} = \frac{V_D}{I_D}$

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

b)

En $I_D = 20\text{mA}$, $V_D = 0.8\text{V}$ de la curva;

c) En $V_D = -10\text{V}$, $I_D = -I_S = -1\text{microAmp}$ de la curva

Resistencia en ac ó dinámica

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

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

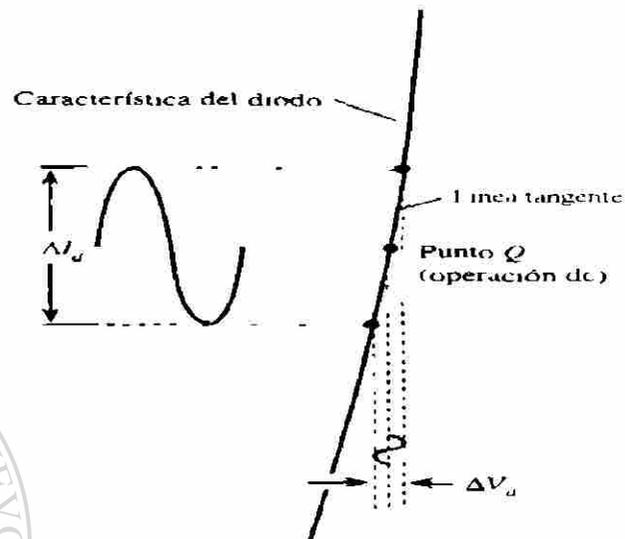


Figura 2.18 Definición de la resistencia dinámica ó en ac

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

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

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

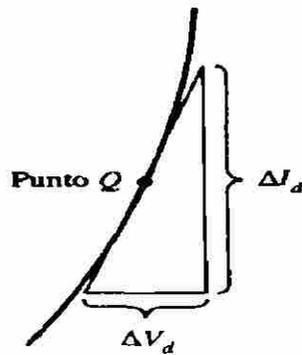


Figura 2.19 Determinación de la resistencia en ac en un punto Q

Mientras mayor sea la pendiente, menor será el valor de 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

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

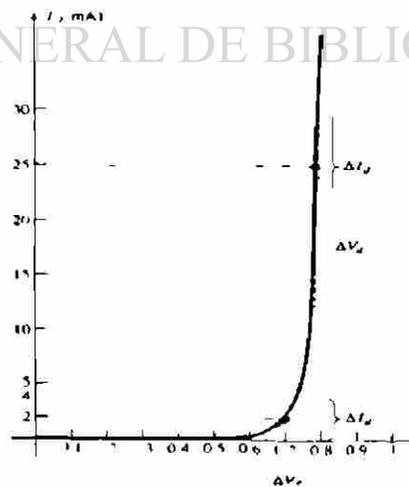


Figura 2.20 Gráfica del ejemplo 2.2

Solución:

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

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

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

y la resistencia de ca será:

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

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

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

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

y la resistencia de ca sera:

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

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

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

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

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

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

I_D o cual excede la r_d de 2Ω

Se ha encontrado la resistencia dinámica en forma grafica, pero existe una definicion basica en el calculo diferencial que establece:

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

Si se encuentra la derivada de la ecuacion general para el diodo semiconductor con respecto a la polarizacion directa aplicada, y luego se invierte el resultado, se tendra una ecuacion para la resistencia dinamica ó ac en esa region, esto es :

$$\frac{dI}{dV} = \frac{d}{dV} [I (e^{\eta V} - 1)]$$

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

siguiendo unas cuantas manipulaciones básicas de calculo diferencial se tiene:
como $I_D = I_A$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

a temperatura ambiente:

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

por lo que:

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

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

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

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

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

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

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:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

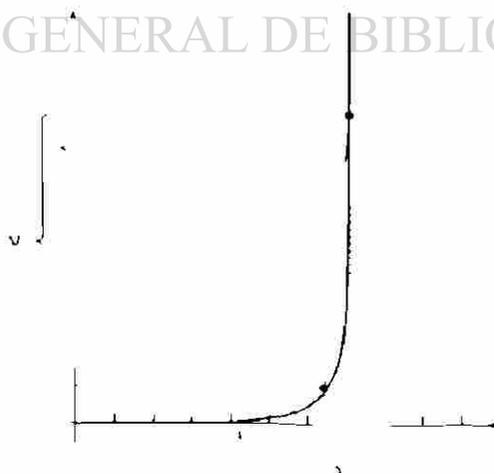


Figura 2.21 Determinación de la resistencia en ac promedio entre los límites indicados

$$r_{av} = \frac{\Delta I'}{\Delta I} \text{ por el punto } I'$$

Para la situación presentada en la figura 2.21 se tiene .

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

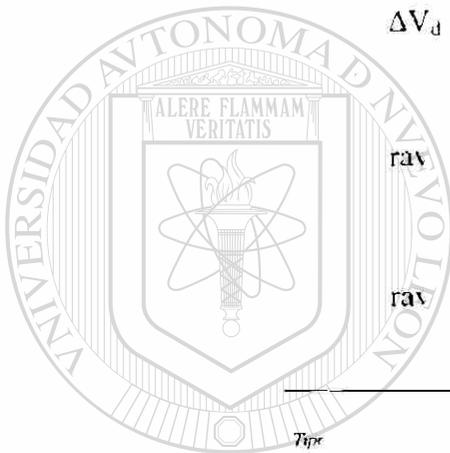
$$\Delta I_d = 15 \text{ mA}$$

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

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

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

5Ω



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

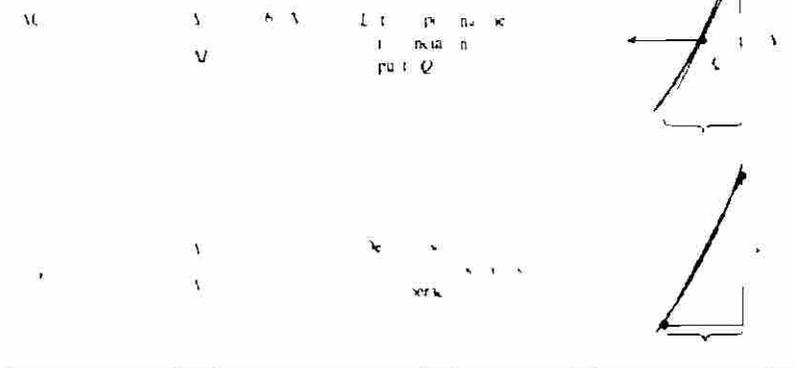


Tabla 2.1 Niveles de resistencia

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 este 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:

$$E - V_D - V_R = 0$$

$$E = V_D + I_D R$$

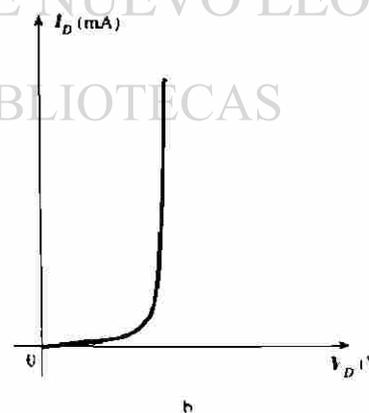
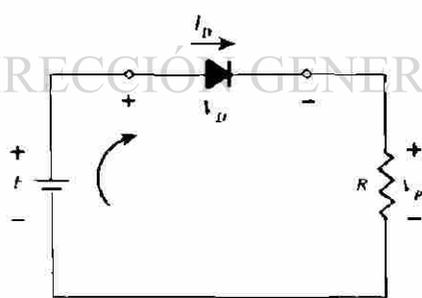


Figura 3.1 Configuración de diodo en serie, circuito y curva característica

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:

$$E = V_D + I_D R$$

$$E = 0V + I_D R$$

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

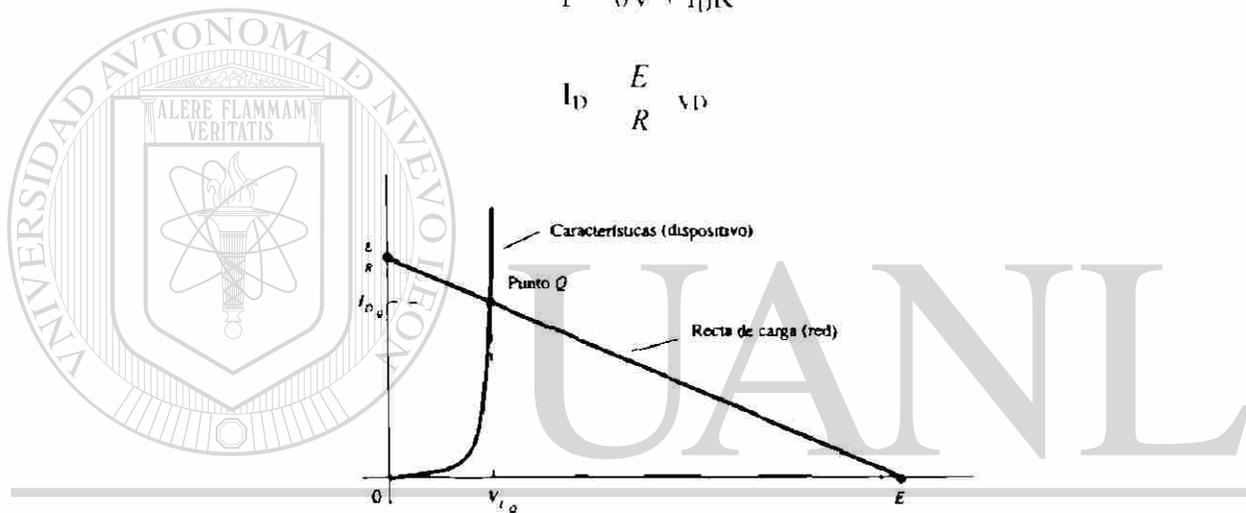


Figura 3.2 Recta de carga y selección del punto de operación

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

$$E = V_D + I_D$$

$$E = V_D + 0AR$$

$$V_D = E - I_D R$$

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

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

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

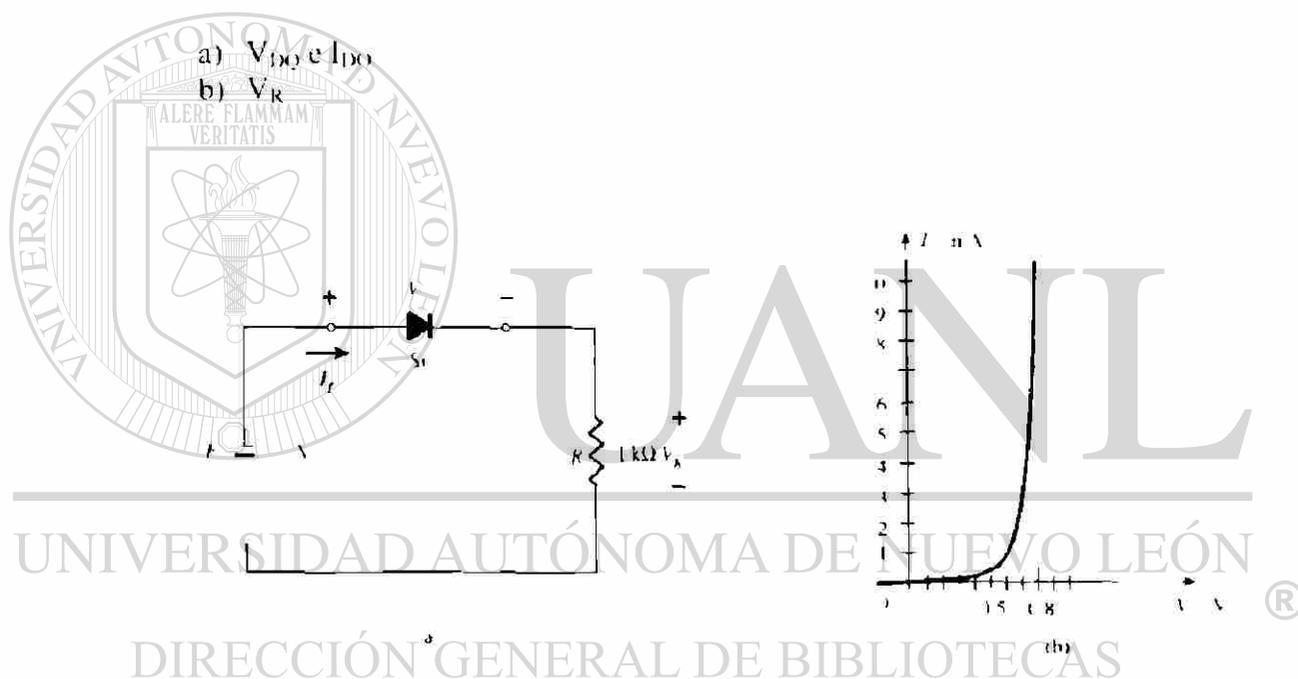


Figura 3.3a y 3.3b Circuito y características del ejemplo 3.1

Solución: a) $I_D = \frac{E - V_D}{R} = \frac{10\text{ V} - 1\text{ V}}{1\text{ k}\Omega}$

$I_D = 9\text{ mA}$

$V_D = 1\text{ V}$

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:

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

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

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

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

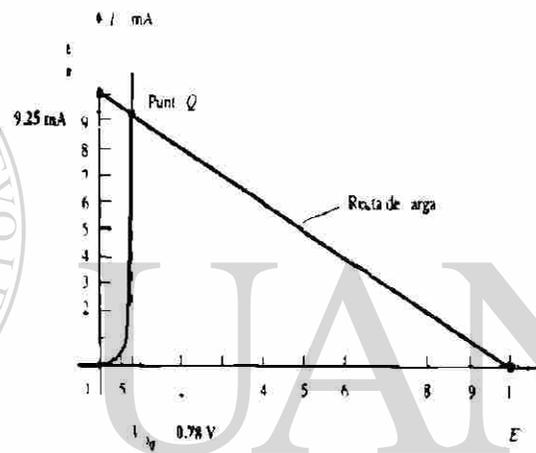
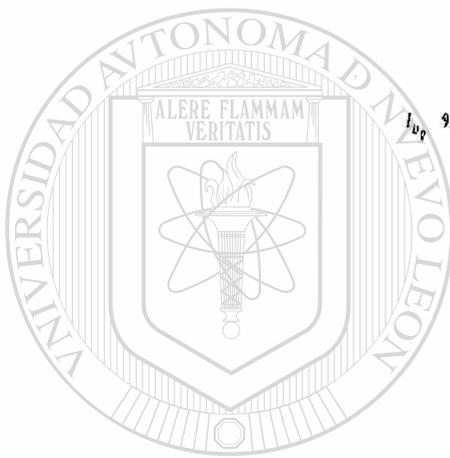


Figura 3.4 Solución del ejemplo 3.1

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



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

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

a) V_D

b) V_R

c) I_D

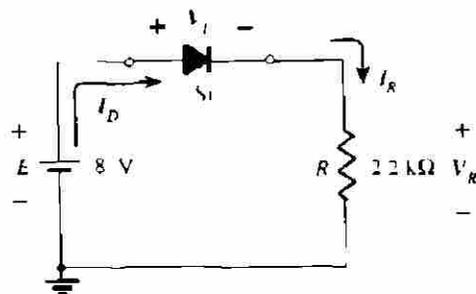


Figura 3.5 Circuito para el ejemplo 3.2

Solución:

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

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

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

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

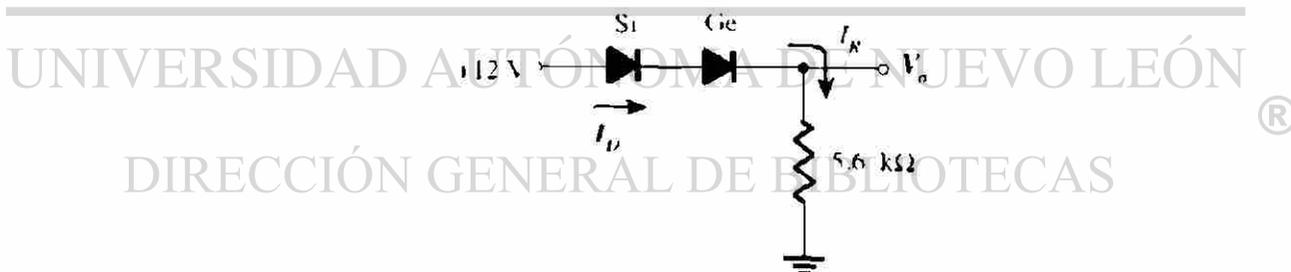


Figura 3.6 Circuito para el ejemplo 3.3.

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

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

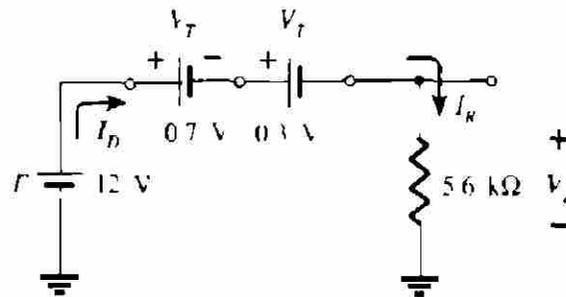


Figura 3.7 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

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

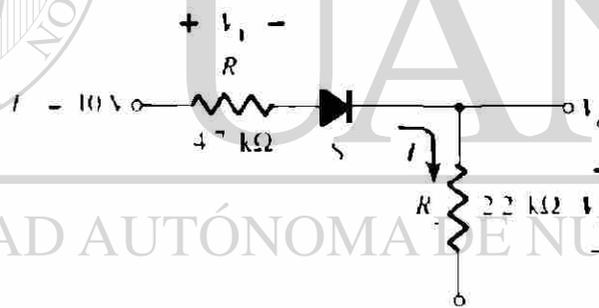


Figura 3.8 Circuito para el ejemplo 3.4

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

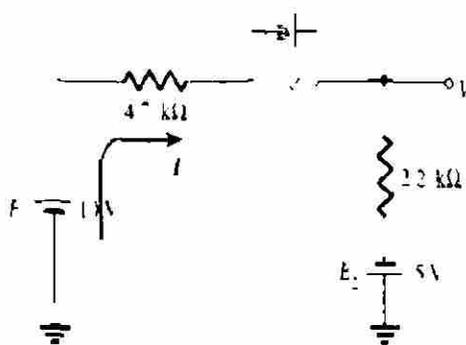


Figura 3.9

Estado del diodo para la red de la figura 3.8

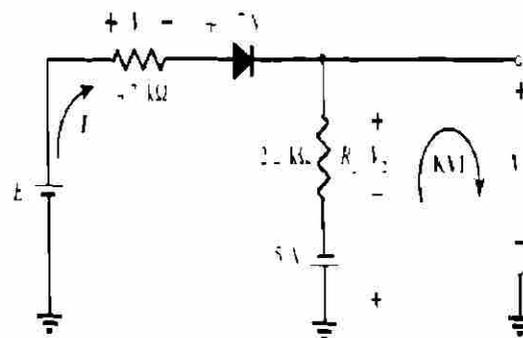


Figura 3.10

Cantidades desconocidas para la red de la figura 3.8

La corriente resultante a través de circuito será:

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

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

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

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

Aplicando la ley de voltaje de Kirchoff a la sección de la salida en el sentido de

las manecillas del reloj tenemos:

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

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

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

Ejemplo 3.5.- Determine V_D , I , I_D e I_{D2} para la configuración de diodo de la figura 3.11

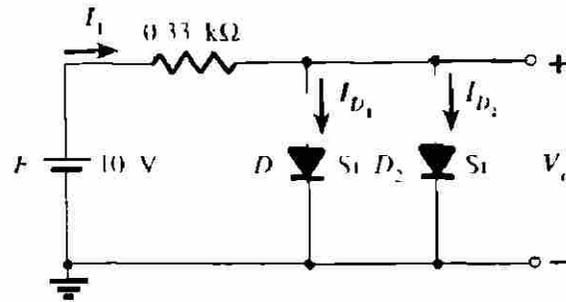


Figura 3.11 Red para el ejemplo 3.3

Solución:- para el voltaje $V_D = 0.7$ V.

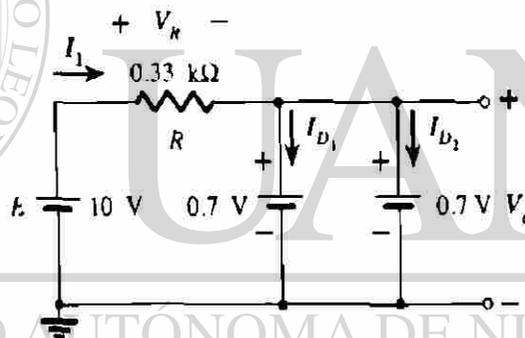


Figura 3.12 Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3

Para la corriente:

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

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

Suponiendo que los diodos tienen características similares, tenemos.

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

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

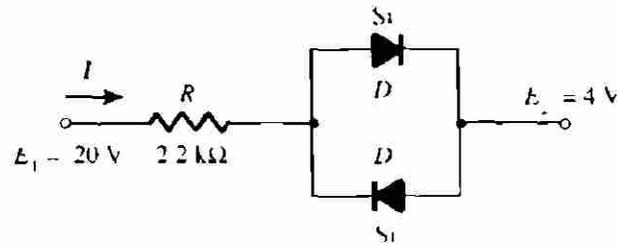


Figura 3.13 Circuito para el ejemplo 3.6

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

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

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

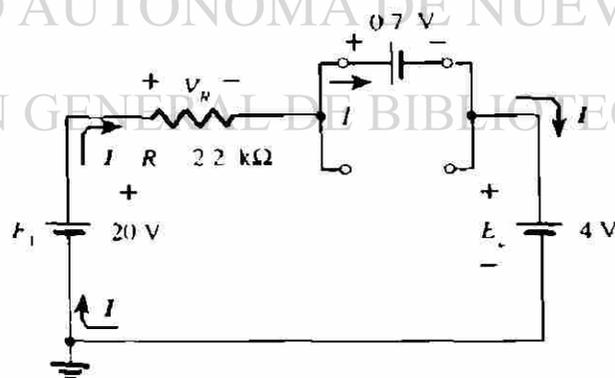


Figura 3.14 Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 3.6

3.4 CIRCUITOS CON ENTRADAS SENOIDALES

Rectificación de media onda

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

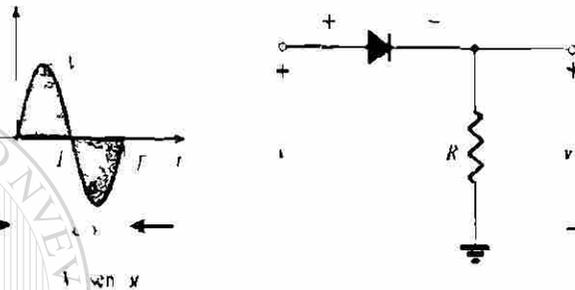


figura 3.15 Circuito rectificador de media onda

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

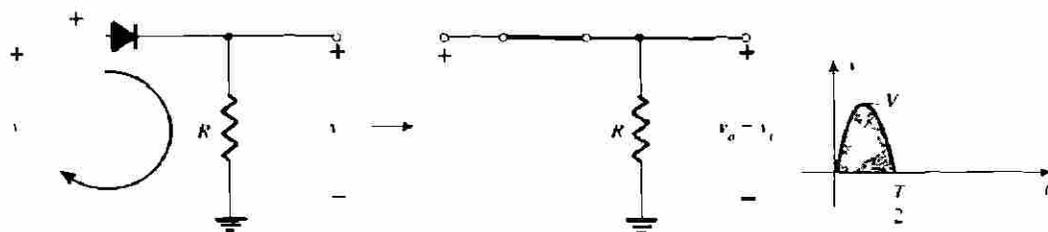


Figura 3.16 Región de conducción ($0 \rightarrow T/2$)

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

Durante el periodo $T/2 \rightarrow T$, 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 periodo completo, y un valor promedio determinado por:

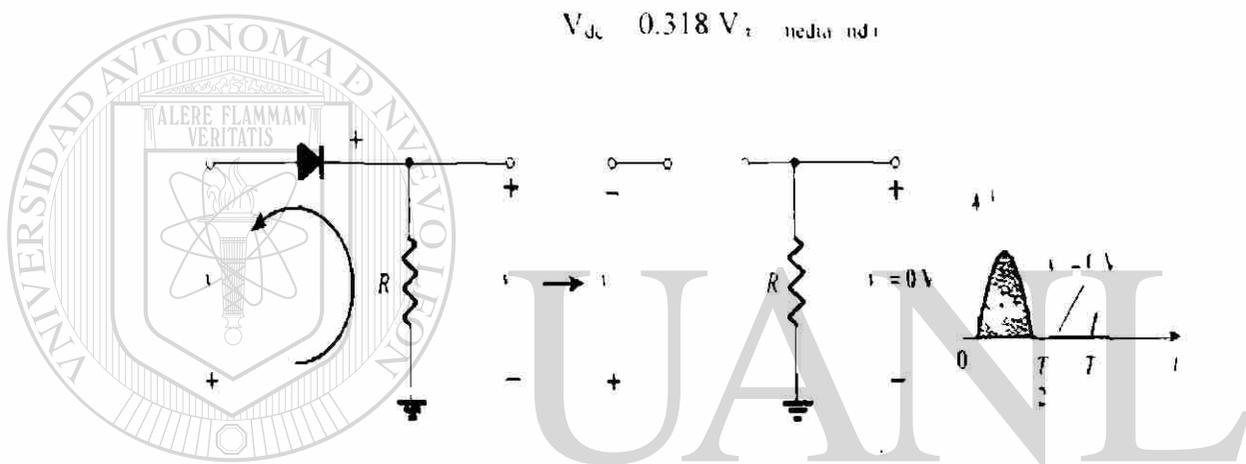


Figura 3.17 Región de no conducción ($T/2 \rightarrow T$)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

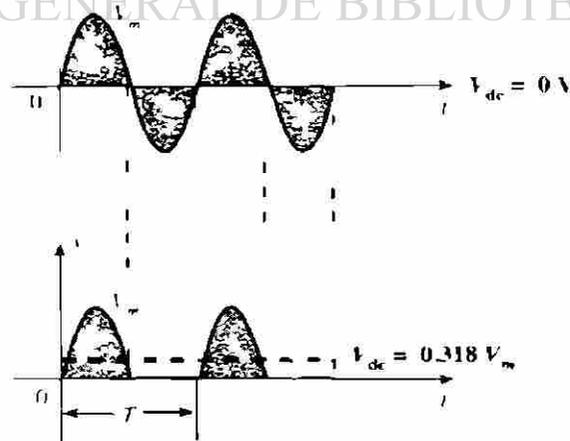


Figura 3.18 Señal rectificadora de media onda

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

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

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

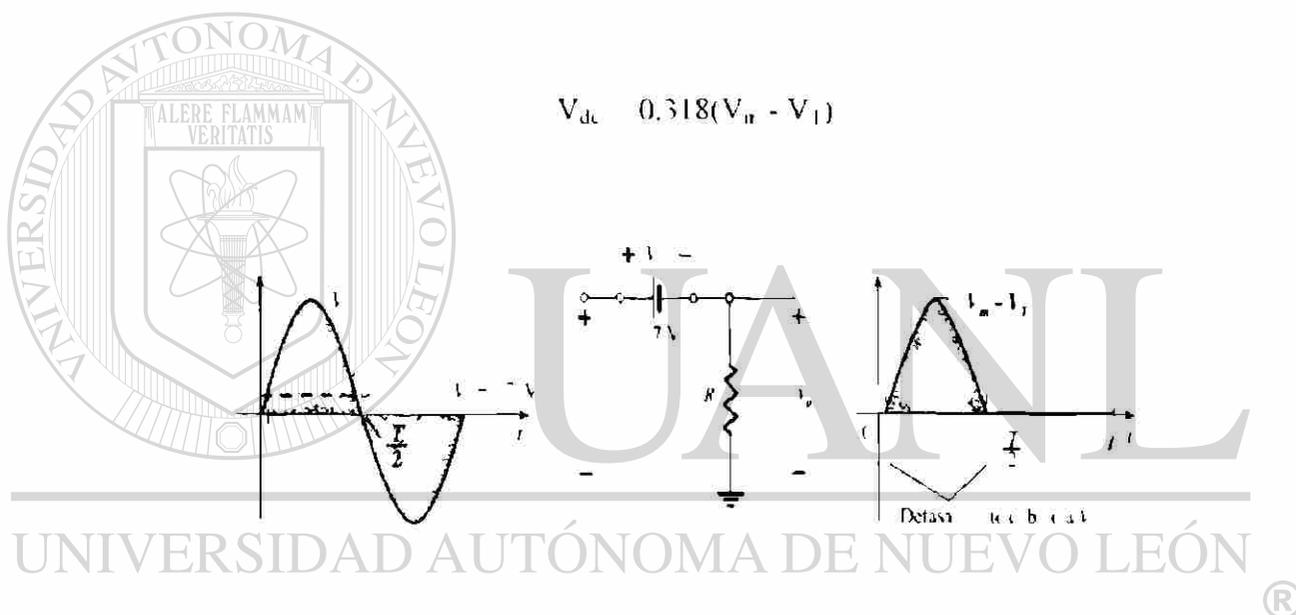


Figura 3.19 Efecto de V_f sobre la señal rectificad de media onda.

Ejemplo 3.7.-

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

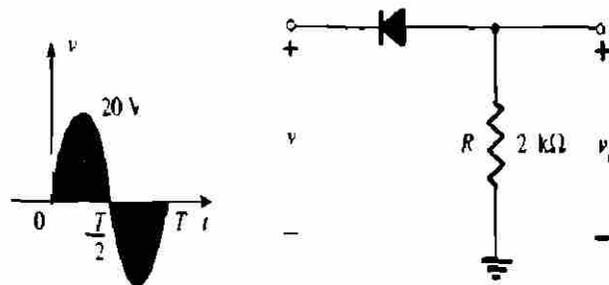


Figura 3.20 Circuito para el ejemplo 3.7

Solución.-

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

$$V_{cd} = -0.318 V, \quad -0.318 (20 V) = -6.36 V$$

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

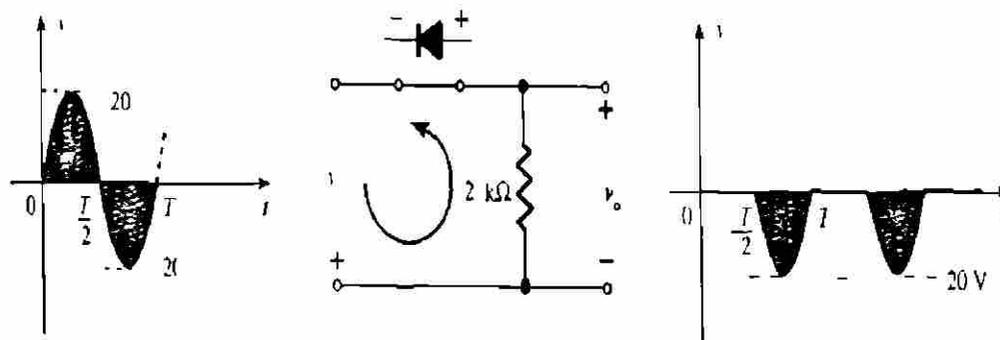


Figura 3.21 v_o resultante para el circuito del ejemplo 3.7

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

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

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

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

o tambien :

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

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

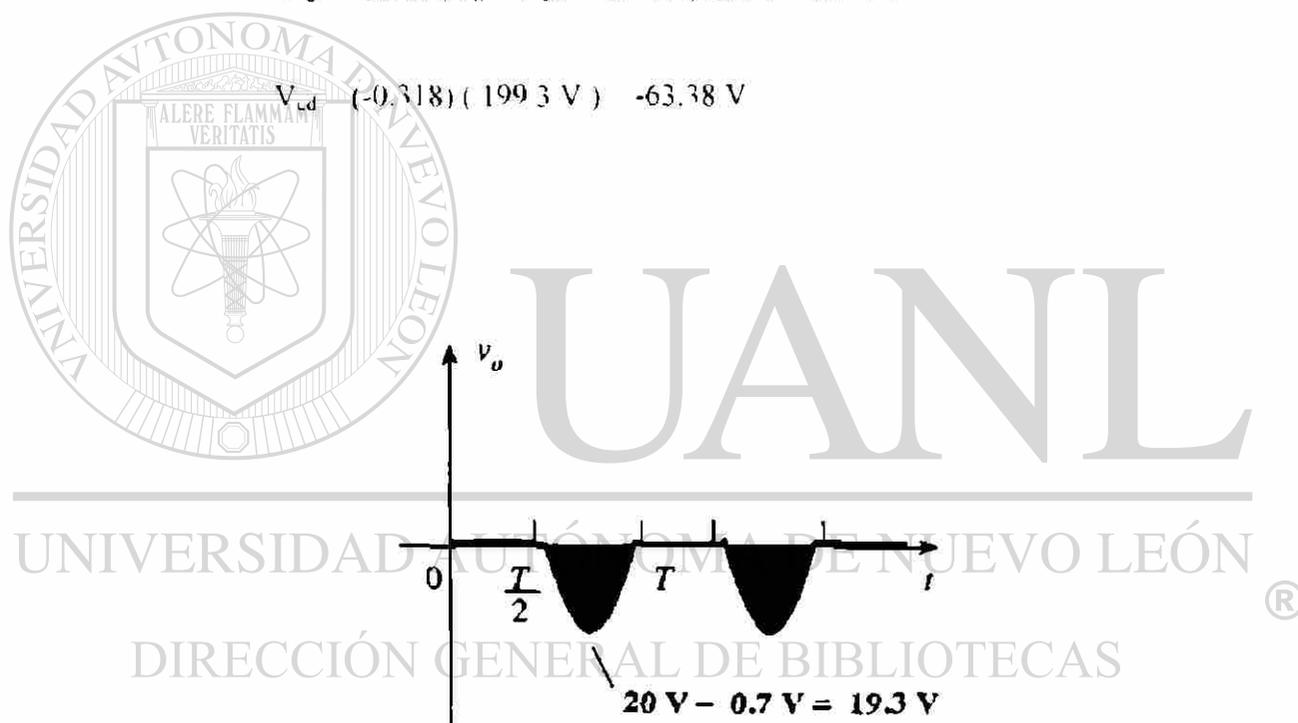


Figura 3.22 Efecto de V_1 sobre la salida de la figura 3.21

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

El Voltaje de Pico Inverso PIV (PRV)

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

$$\text{valor PIV} = V_m \text{ (rectificador de media onda)}$$

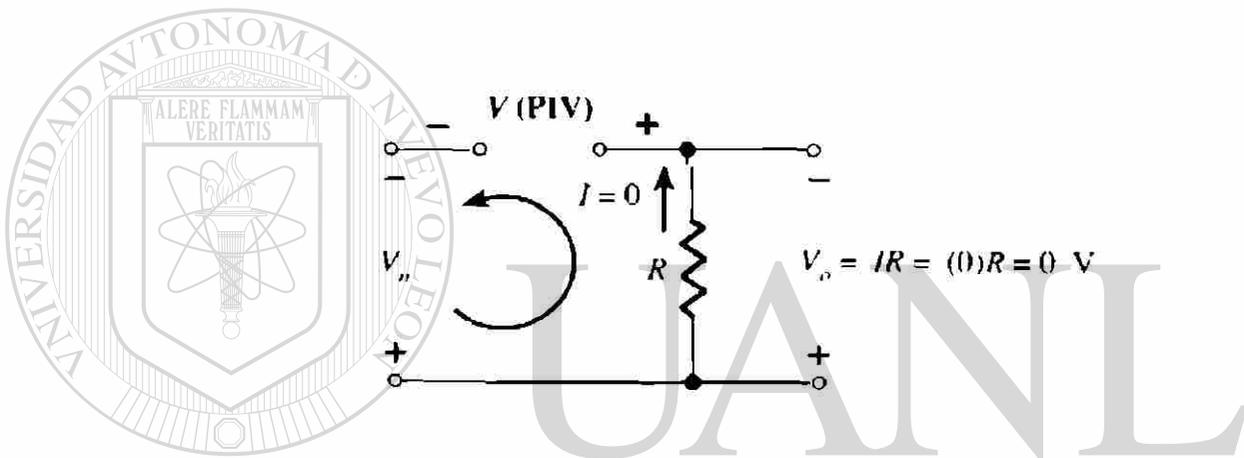


Figura 3.23 Determinación de PIV

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Rectificación de onda completa

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- puente de diodos

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

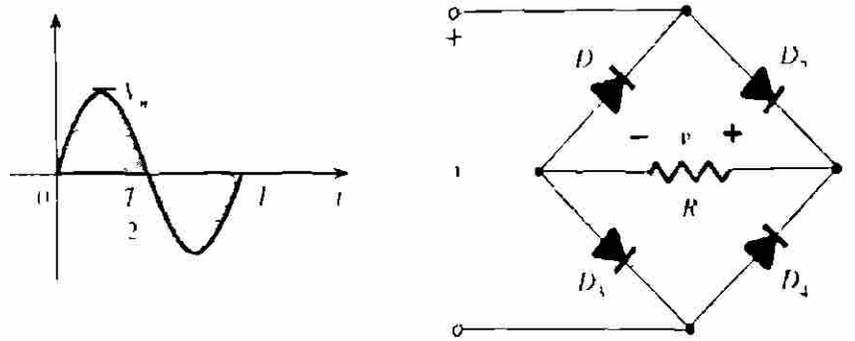


Figura 3.24 Circuito rectificador de onda completa

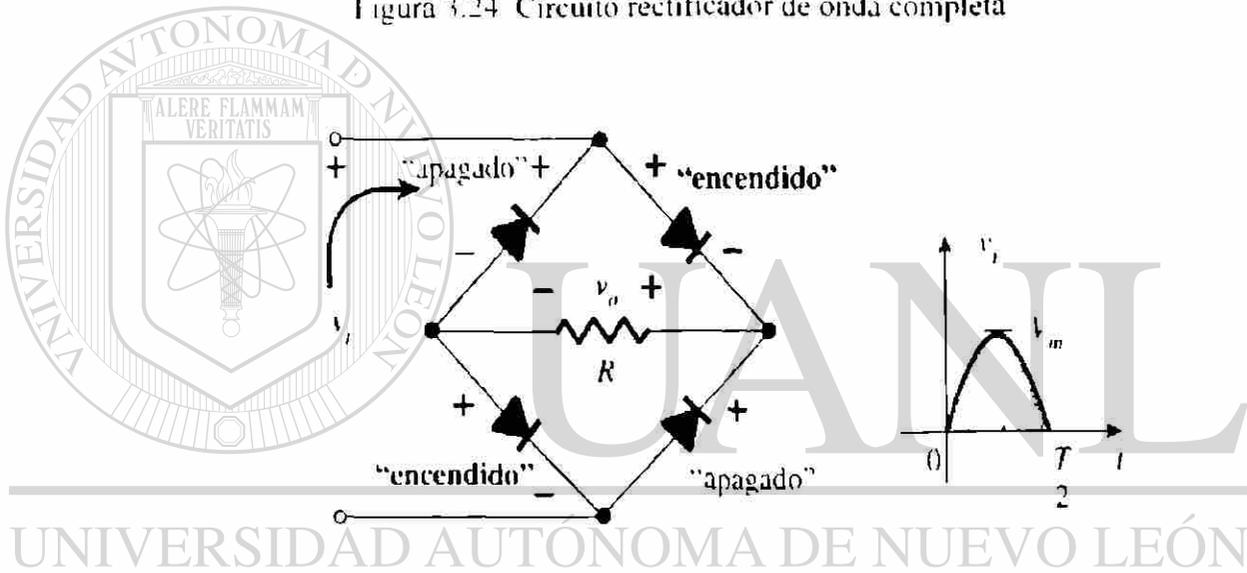


Figura 3.25 Red para el periodo de $0 \rightarrow T/2$
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

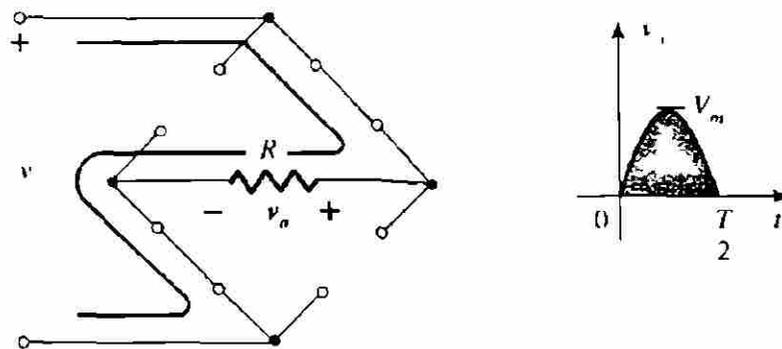


Figura 3.26 Red de conducción para la región positiva

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

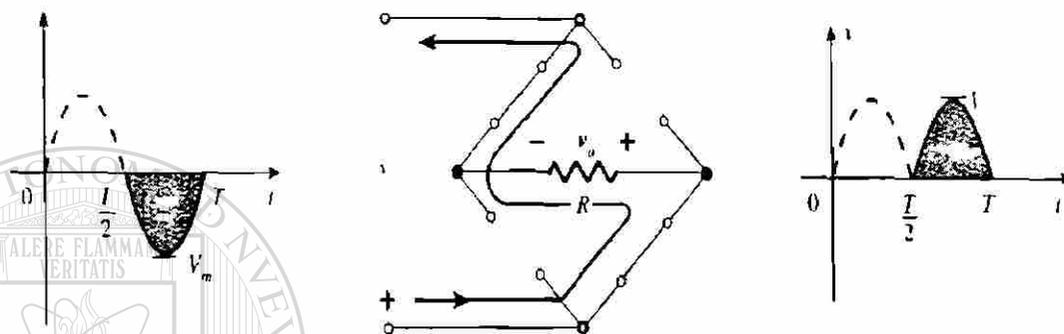


Figura 3.27 Red de conducción para region negativa

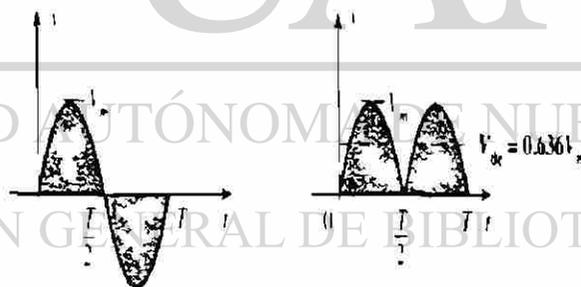


Figura 3.28 Formas de onda de entrada y salida

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

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

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

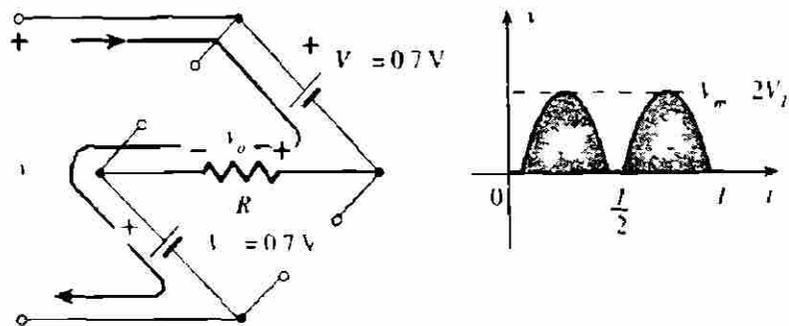


Figura 3.29 Determinación de v_{max} para la configuración puente

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

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

$$v_c = v - 2V_f$$

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

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

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

Voltaje de Pico Inverso PIV

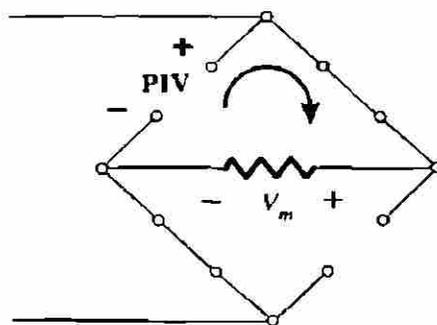


Figura 3.30 Determinación del PIV

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

$$PIV < V_r \text{ (rectificador puente de onda completa)}$$

- **derivación central**

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

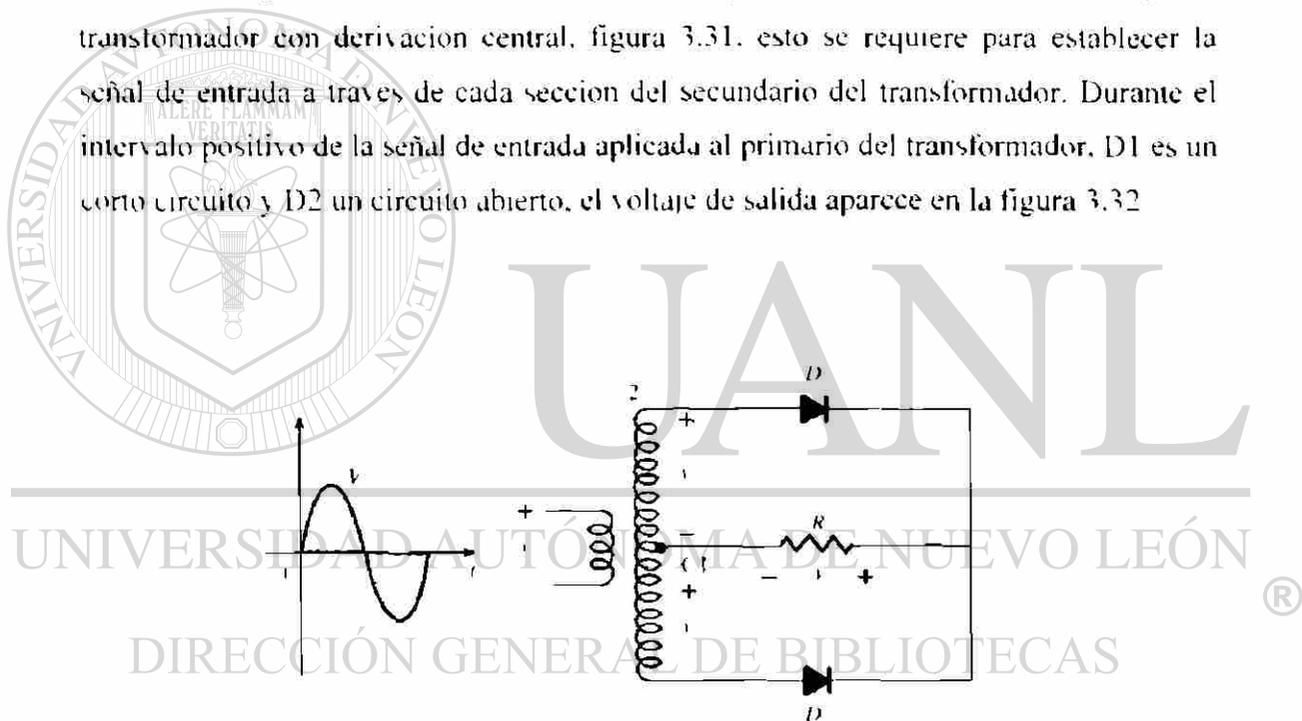


Figura 3.31. Circuito rectificador con derivación central

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

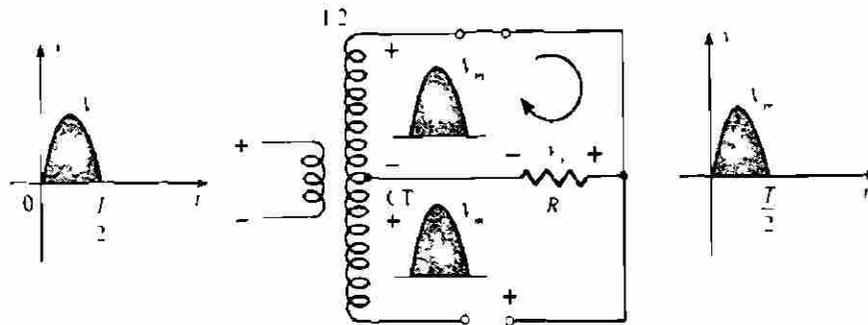


Figura 3.32 Condiciones de la red para la región positiva

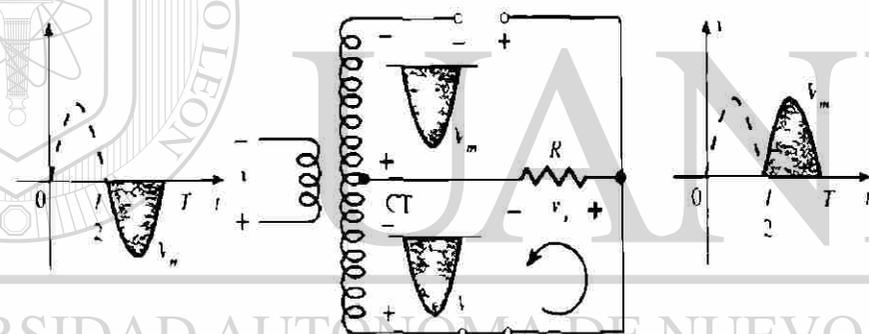


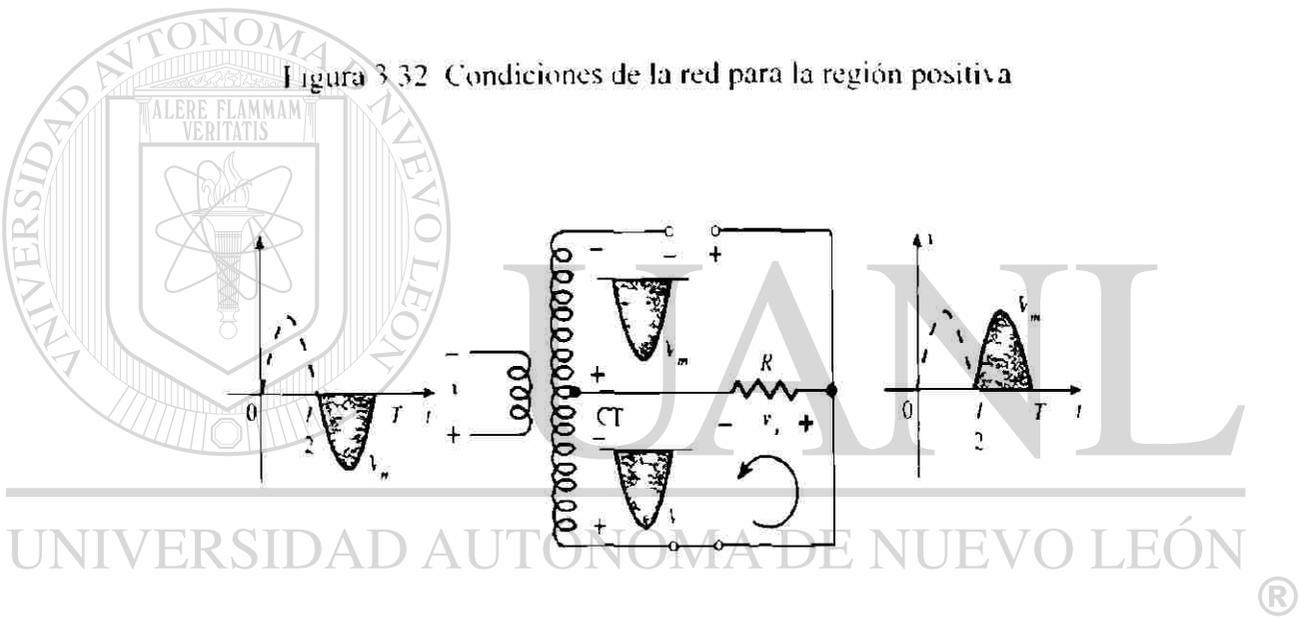
Figura 3.33 Condiciones de la red para la región negativa

Voltaje de Pico Inverso (PIV)

$$PIV = V_{c} + V_{R}$$

$$V_{n} + V$$

$$PIV = 2V_{1}$$



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.

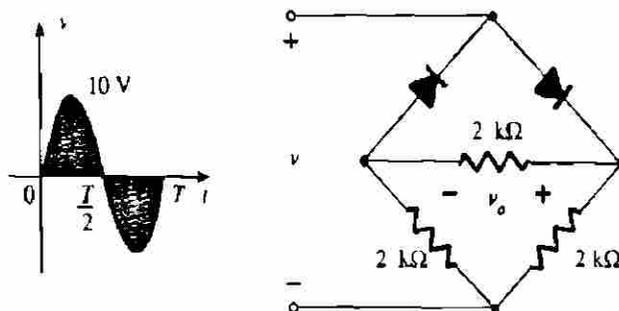


Figura 3.34 Red puente para el ejemplo 3.8

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 $V_{\text{max}} = 2 \text{ V}$, $V_{\text{PI max}} = 2 \cdot (10 \text{ V}) = 5 \text{ V}$, se muestra en la figura 3.36. En la parte negativa de la entrada se intercambiarán los papeles de los diodos y v_o aparecerá como se indica en la figura 3.37

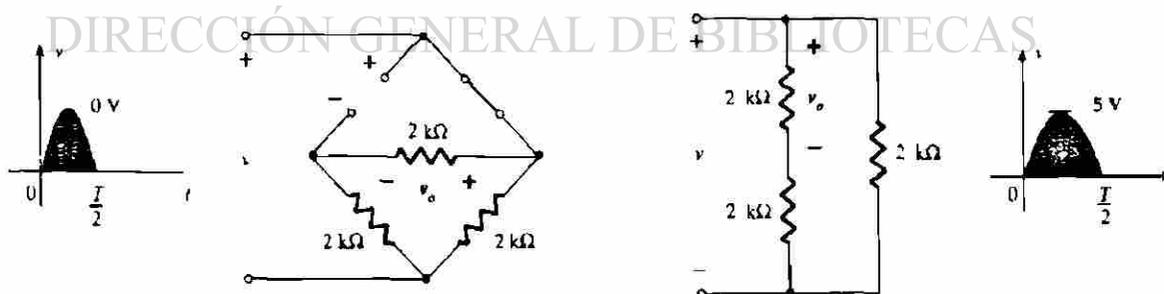


Figura 3.35 Red de la figura 3.34 para la región positiva

Figura 3.36 Red redibujada de la de la figura 3.35

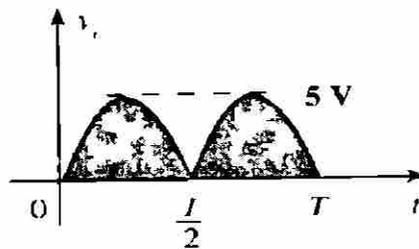
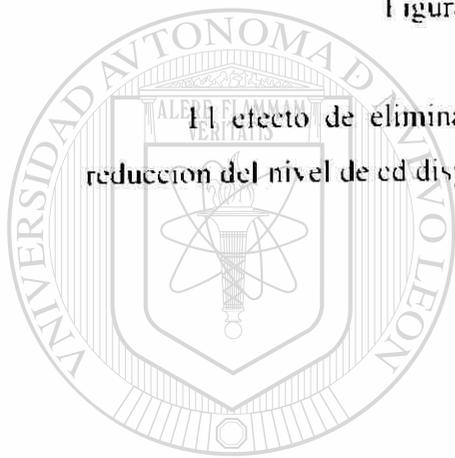


Figura 3.37 Gráfica de salida del ejemplo 3.8

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

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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



3.5 CIRCUITOS RECORTADORES

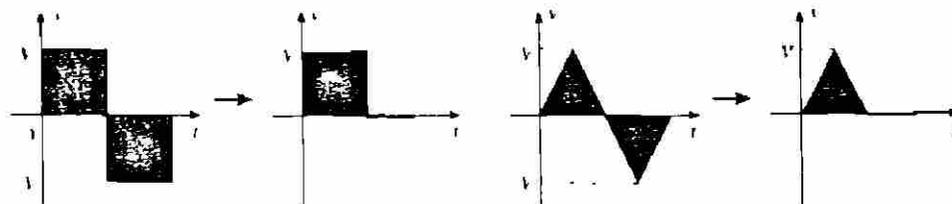
Hay una gran variedad de diodos que se llaman "recortadores", éstos tienen la capacidad de recortar una porción de la señal de entrada sin distorsionar la parte restante de la forma de onda alterna. Existen dos categorías generales de recortadores: en **serie** y en **paralelo**. La configuración en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

Configuración en serie

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



(a)



(b)

Figura 3.37 Circuitos recortadores en serie

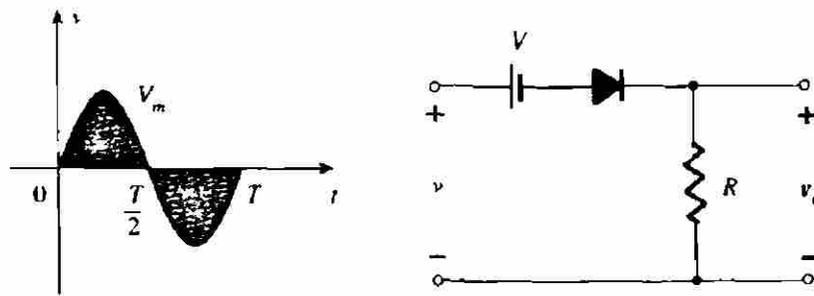


Figura 3.38 Circuito recortador en serie con una fuente de cd.

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

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

$V - V - v_o = 0$ esto es $v_o = V$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

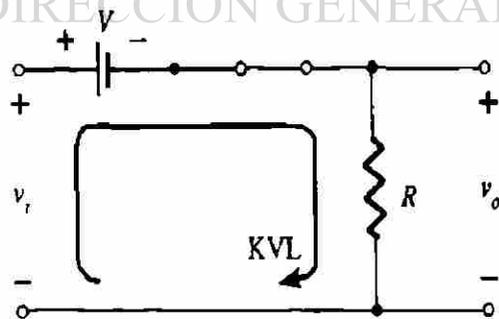


Figura 3.39 Determinación de v_o

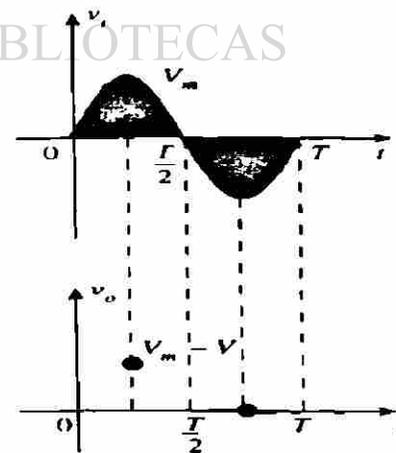


Figura 3.40 Determinación de los niveles de v_o

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

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

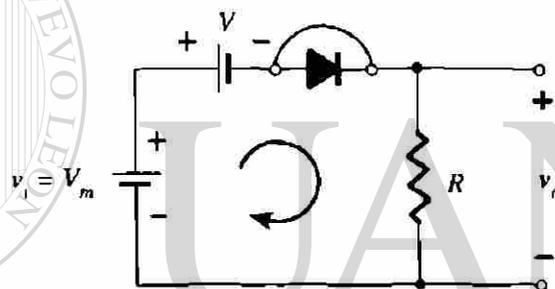
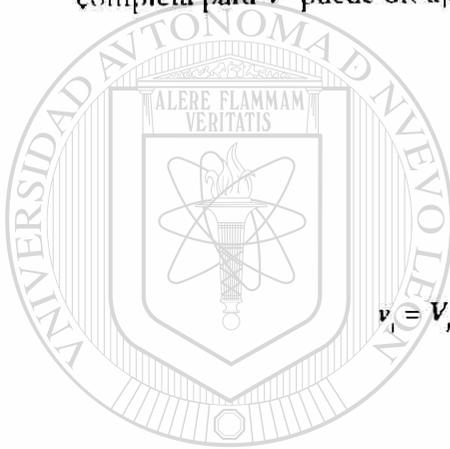


Figura 3.41. Determinación de v_o cuando $v_i = V_m$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

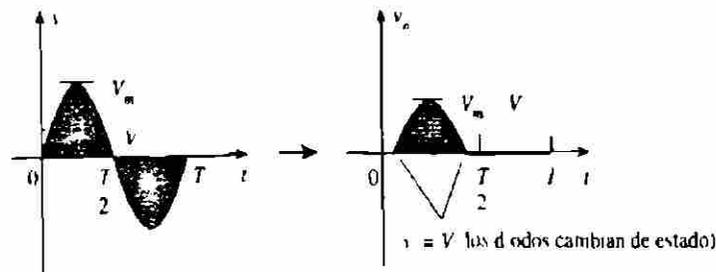


Figura 3.42. Dibujo para v_o

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

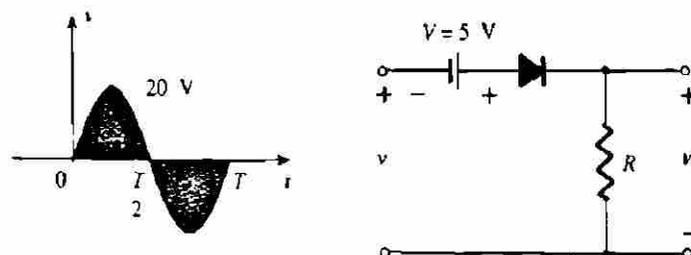


Figura 3.43 Recortador en serie para el ejemplo 3.9

Solución:

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

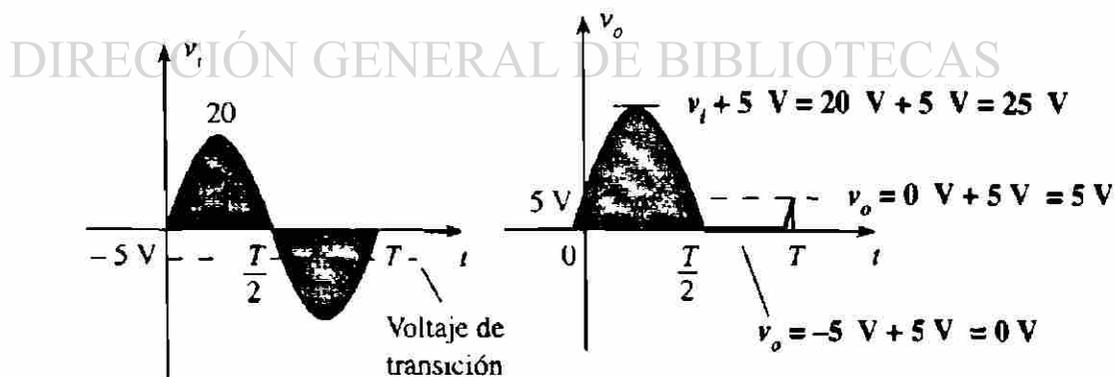


Figura 3.44 v_o con el diodo "encendido"

Figura 3.45 Determinación del nivel de transición de la figura 3.43

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

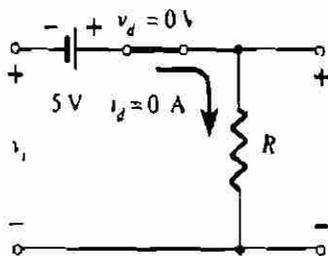


Figura 3.46 Dibujo de v para el ejemplo 3.9

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

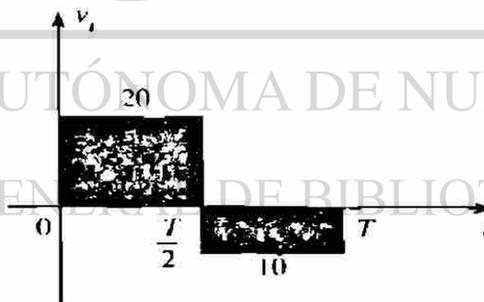


Figura 3.47 Señal aplicada para el ejemplo 3.10

Solución :-

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

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

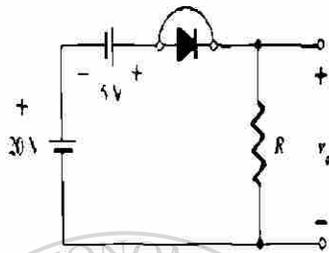


Figura 3.48 $v_o = +20\text{ V}$

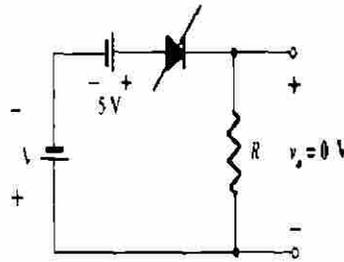


Figura 3.49 $v_o = -10\text{ V}$

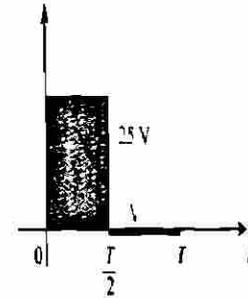


Figura 3.50 Dibujo de v_o

configuración en paralelo

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

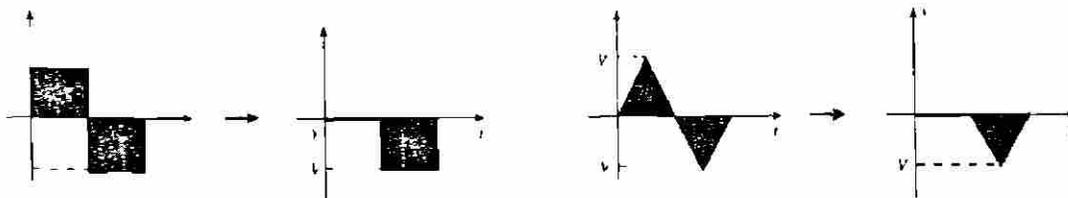
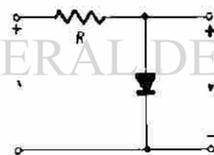


Figura 3.51 Respuesta de un recortador en paralelo

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

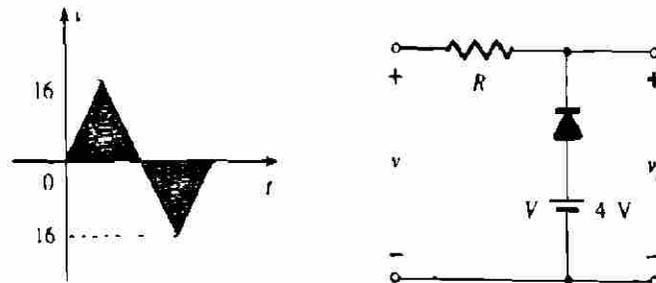


Figura 3.52. Señal de entrada y circuito del ejemplo 3.11

Solución.-

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

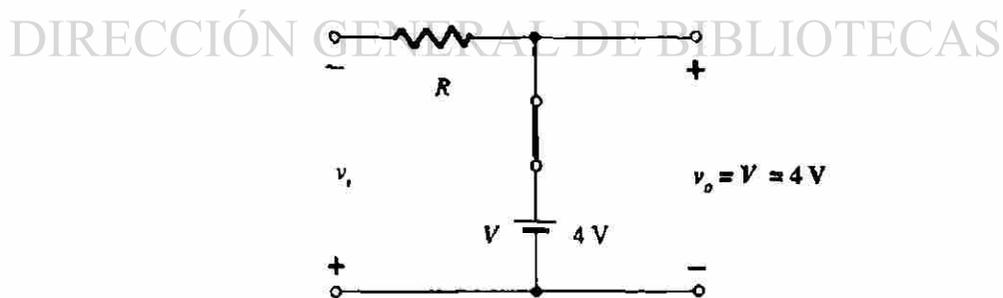


Figura 3.53 v_o para la región negativa de v_i

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

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

Para el estado de circuito abierto la red se muestra en la figura 3.55, donde

$v_R = v_i$, esto es mostrado en la figura 3.56.

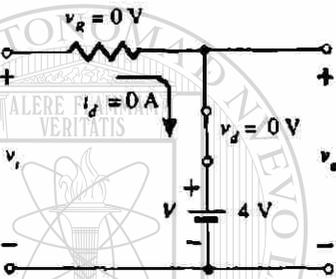


Figura 3.54 Determinación del nivel de transición del ejemplo 3.11

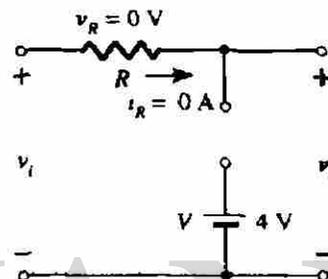


Figura 3.55 Determinación de v_i para el circuito abierto del diodo

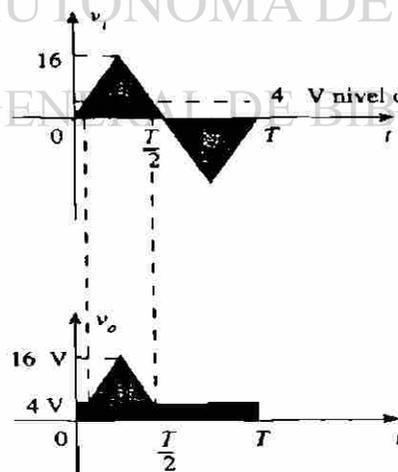


Figura 3.86 Dibujo de v_o para el ejemplo 3.11

2.6 CAMBIADORES DE NIVEL (SUJETADORES)

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

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

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

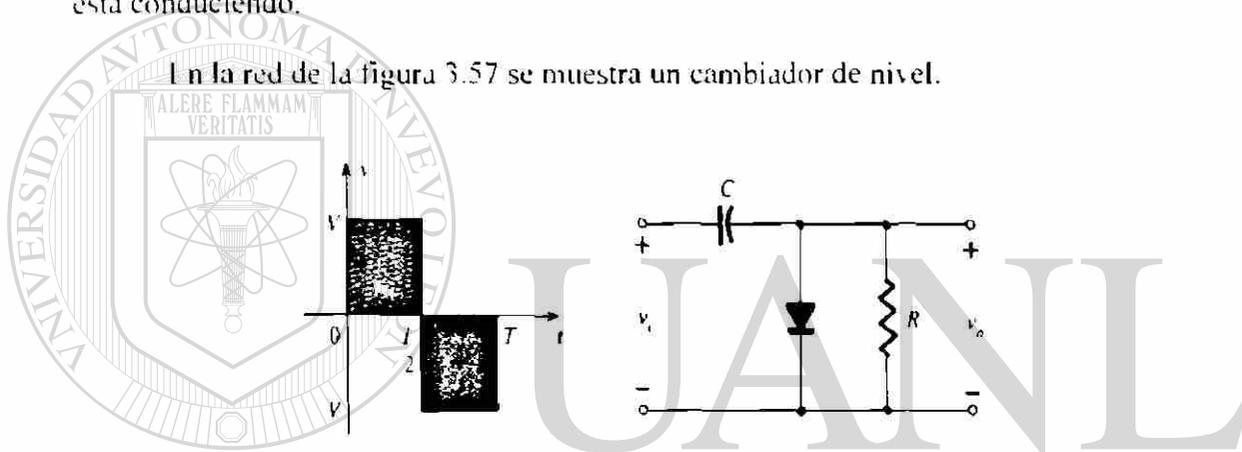


Figura 3.57 Circuito cambiador de nivel

Durante el intervalo de $0 \rightarrow T/2$ la red se muestra en la figura 3.58, con el diodo en estado de "encendido" efectivamente hace corto circuito el efecto de la R . Durante este intervalo el voltaje de salida esta directamente a través del corto-circuito y $v_2 = 0$ V.

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

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

Debido a que v esta en paralelo con el diodo y la resistencia se puede dibujar en la posicion alterna como se muestra en la figura 3 59 dando como resultado:

$$-V \quad V \quad v \quad 0$$

$$v \quad -2V$$

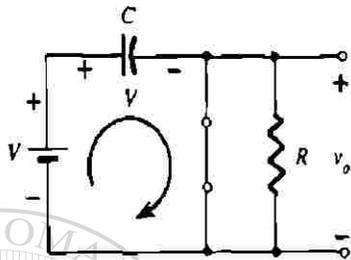


Figura 3.58 Diodo en "encendido" capacitor cargando a V volts

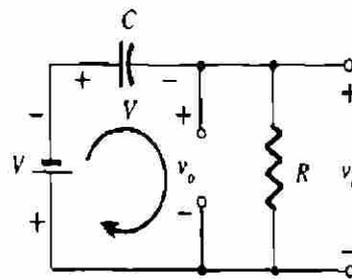


Figura 3.59 Determinacion de v_o diodo en "apagado"

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

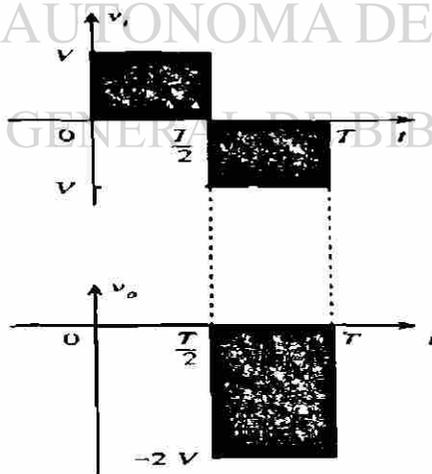


Figura 3.60 Grafica de v_o para la red de la figura 3.57

La señal de salida "cambia de nivel" a 0 V durante el intervalo de $0 \rightarrow T_2$, pero mantiene la misma excursión de voltaje total ($2V$) que la entrada.

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

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

Pasos a seguir para analizar las redes cambiadoras de nivel:

1.- iniciar el analisis de las redes mediante la consideracion de la parte de la señal de entrada que dara polarizacion directa al diodo.

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

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

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

4.- A través de todo el analisis debe tenerse un continuo cuidado de la posición y la polaridad de referencia para v_o , para asegurar que los niveles correctos de v_o se estan obteniendo.

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

Ejemplo 3.12.- Determinar v_o para la red de las siguiente figura 3.61 para la entrada que se indica.

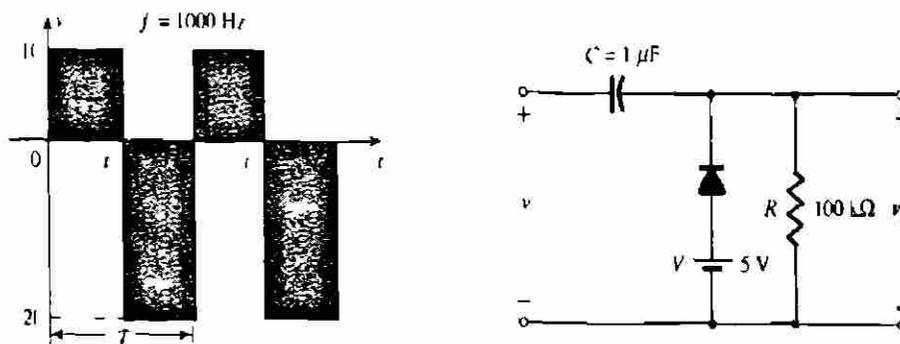


Figura 3.61 Señal de entrada y circuito para el ejemplo 3.12

Solución:-

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

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

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

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

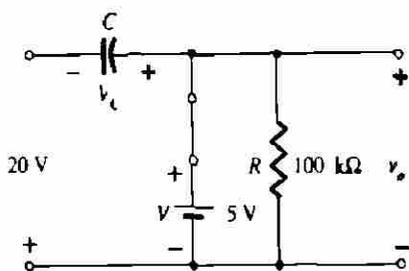


Figura 3.62 Determinación de v y V_c con el diodo "encendido"

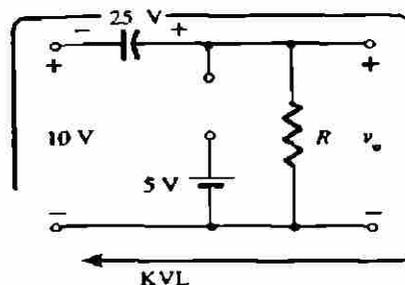


Figura 3.63 Determinación de v_o con el diodo "apagado"

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

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

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

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

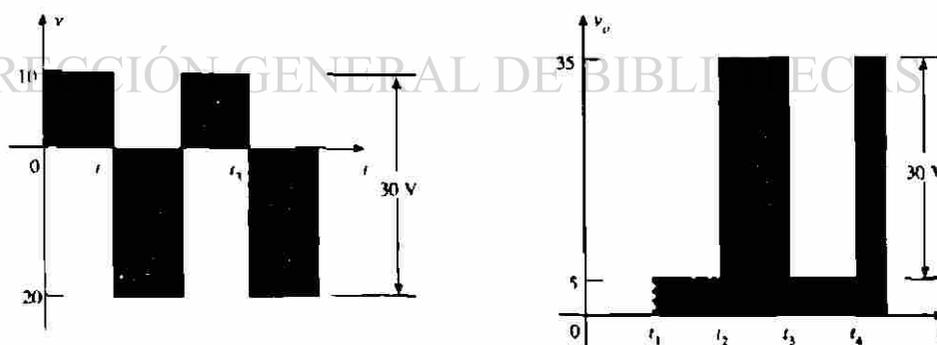


Figura 3.64 v y v_o para el cambiador de nivel de la figura 3.64

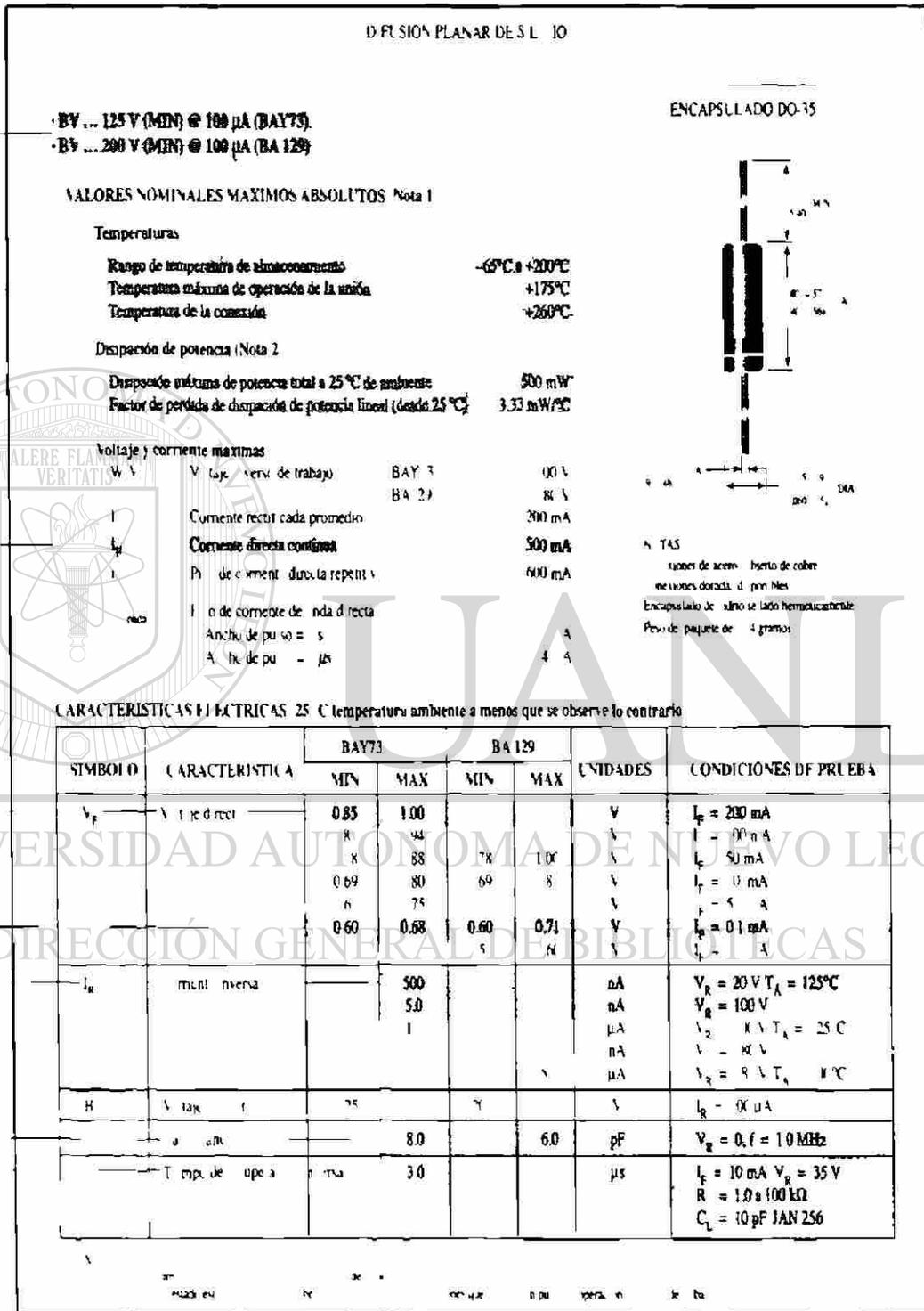


Tabla 3.1 Especificaciones del diodo

CAPITULO 4

DIODOS ESPECIALES

4.1 DIODO IDEAL

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

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



(a)

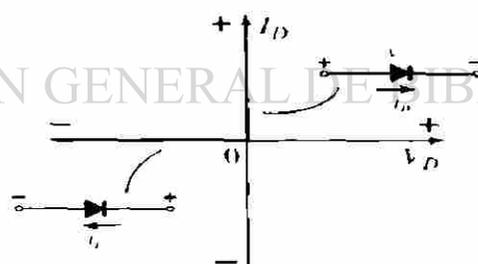


Figura 4.1 Diodo ideal. simbolo, curva caracteristica

De manera ideal, un diodo conducira corriente en la direccion que define la flecha del simbolo y actuara como un circuito abierto en cualquier intento por establecer corriente en direccion opuesta.

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

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

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

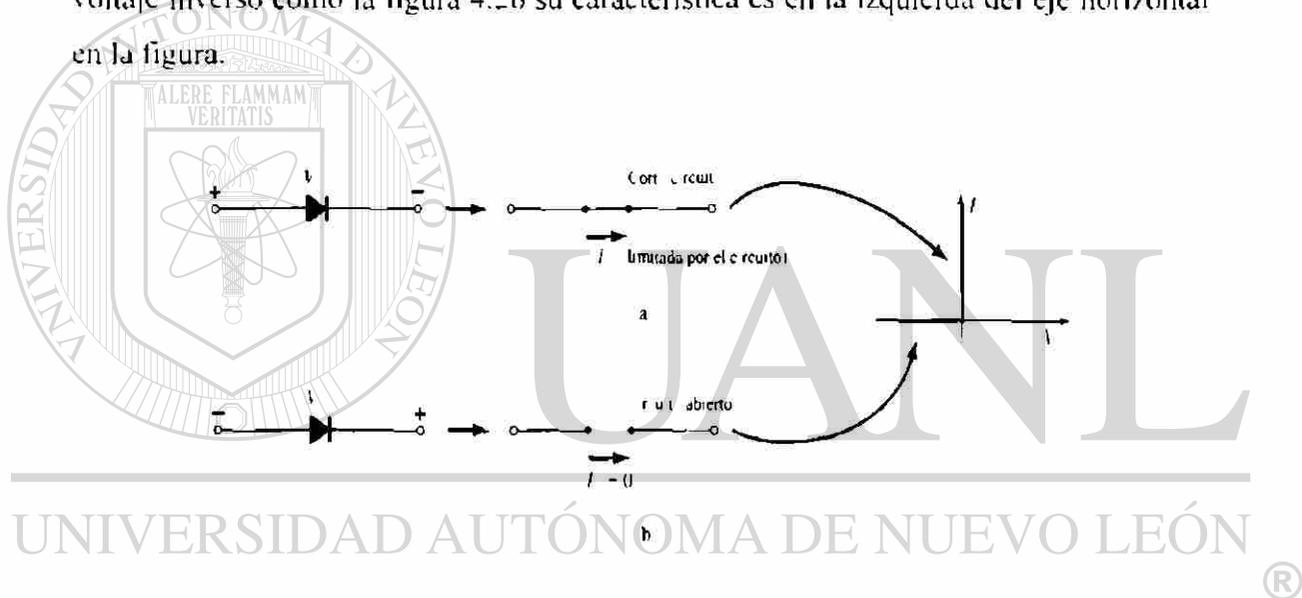


Figura 4.2 a) Estados de conduccion b) no conduccion del diodo ideal

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

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

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

donde V_f es el voltaje de polarización directo a través del diodo e I_f es la corriente en sentido directo a través del diodo.

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

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

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

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

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

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

circuito equivalente del diodo.

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

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

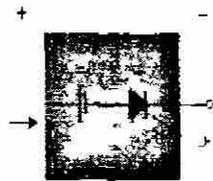
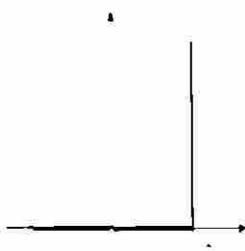


Fig.4.3a Circuito equivalente simplificado para el diodo semiconductor de Si

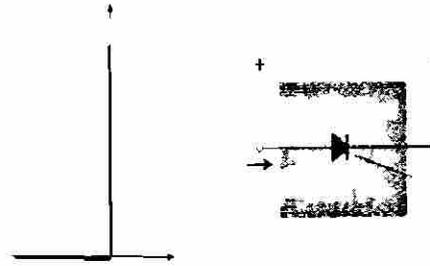
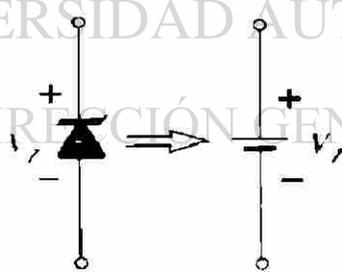


Fig.4.3b Diodo ideal y sus características

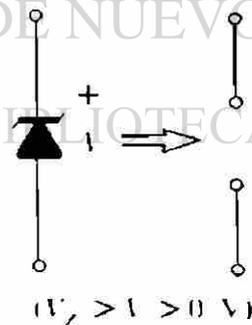
4.2 DIODO ZENER

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



“encendido”

Figura 4.4a
Diodo zener “encendido”



“apagado”

Figura 4.4b
Diodo zener “apagado”

Región Zener.

Una aplicación de un voltaje demasiado negativo 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 este dramático cambio en las características se denomina "potencial Zener" y se asigna el símbolo V_Z .

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

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



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:

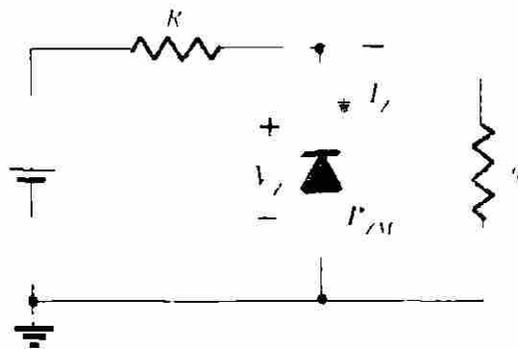


Figura 4.6 Regulador zener basico

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

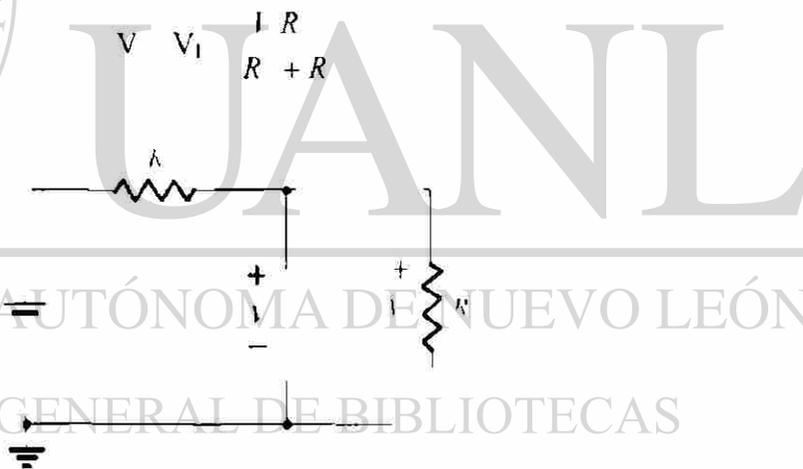


Figura 4.7 Determinacion del estado del diodo zener

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

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

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

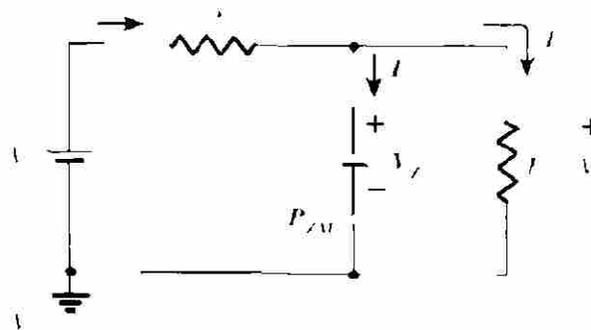


Figura 4.8 Circuito equivalente zener cuando está encendido

$$V_1 = V_Z$$

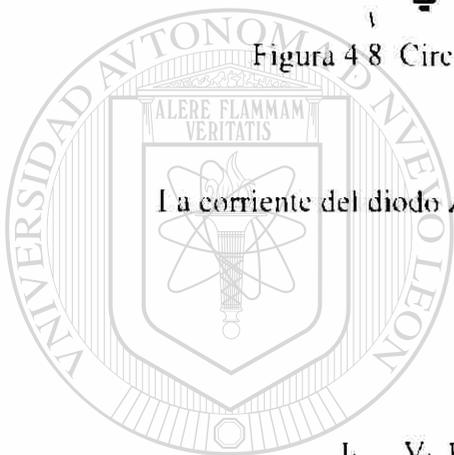
La corriente del diodo Zener se determina mediante las leyes de Kirchhoff

$$I_R = I_Z + I_1$$

$$I_Z = I_R - I_1$$

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La potencia disipada por el diodo Zener sera:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$P_Z = V_Z I_Z$$

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

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

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

b) Repetir el mismo inciso (a) con una $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$.

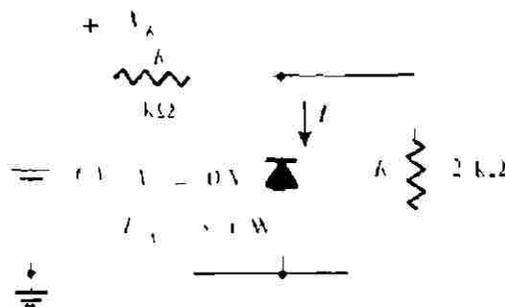


Figura 4.9 Circuito del ejemplo 4.1

Solución:

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

$$V = \frac{R_1}{R + R_1} (16V) = 8.73 \text{ V}$$

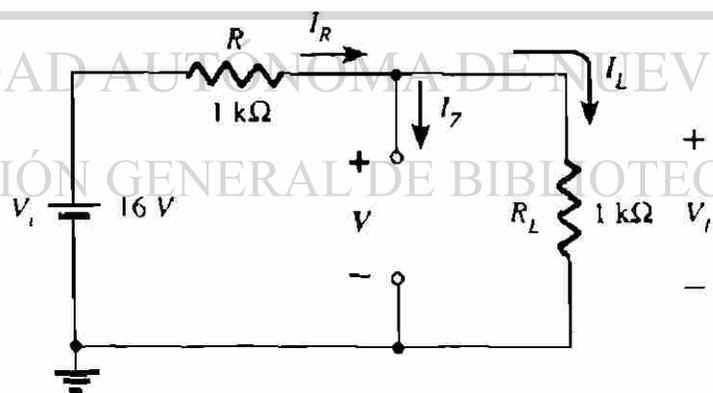


Figura 4.10 Circuito equivalente del ejemplo 4.1

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

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

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

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

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

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

Aplicando la siguiente ecuacion llegaremos a:

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

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

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

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

$$I_1 = \frac{V' - V_1}{R} = \frac{16V - 10V}{3k\Omega} = 3.33 \text{ mA}$$

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6V}{1k\Omega} = 6 \text{ mA}$$

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

$$I_Z = 6 \text{ mA} - 3.33 \text{ mA}$$

$$I_Z = 2.67 \text{ mA}$$

La potencia disipada será:

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

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

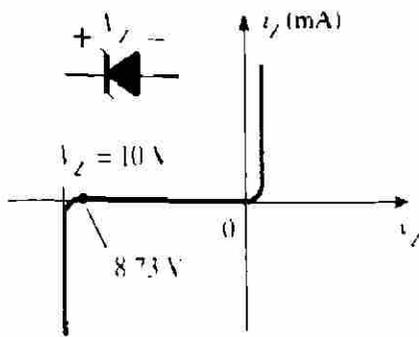


Figura 4.11
Punto de operación resultante del ejemplo 4.1

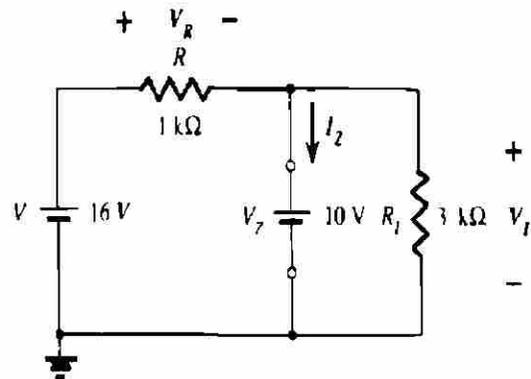


Figura 4.12
Determinación de V para el regulador del ejemplo 4.1

4.3 DIODOS DE BARRERA SCHOTTKY

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

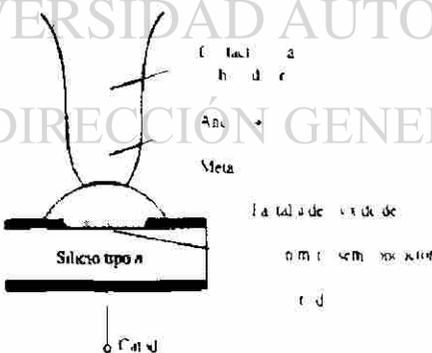


Figura.4.13
Diodo de portadores calientes o de barrera de superficie

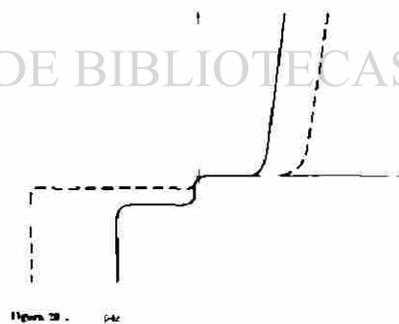


Figura.4.14
Comparación de curvas del diodo Schottky y del union p-n

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

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

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

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

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

La ausencia de portadores a cualquier nivel apreciable en el diodo Schottky da como resultado un tiempo de recuperación inverso de niveles mucho más inferiores. Esta es la razón principal de por 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

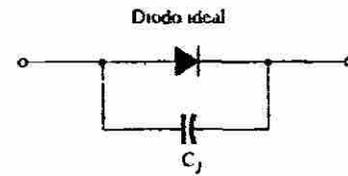
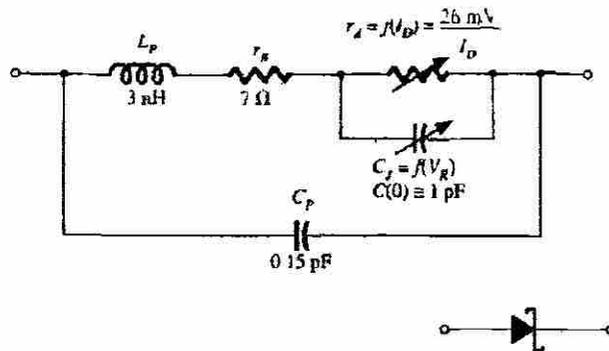


Figura.4.15
Circuito equivalente diodo Schottky

Figura.4.16
Circuito equivalente aproximado

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

4.4 DIODOS VARACTORES (VARICAP)

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

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

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

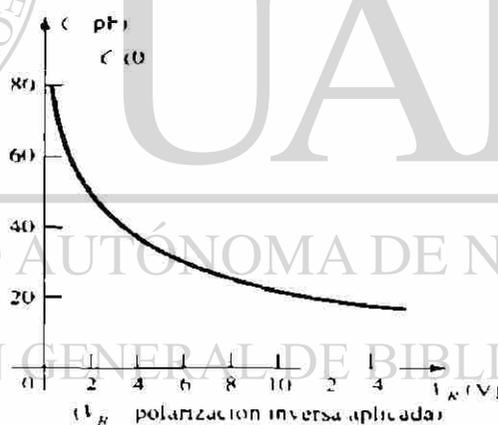


Figura.4.17 Características del varicap

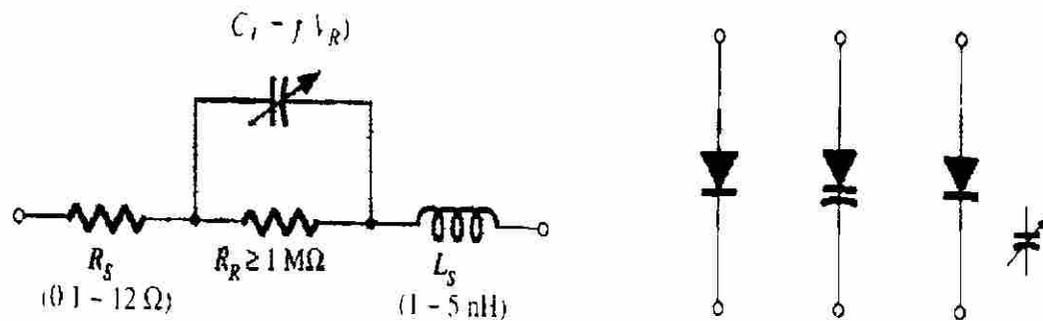


Figura.4.18 Circuito equivalente en la region de polarización inversa y símbolos

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

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

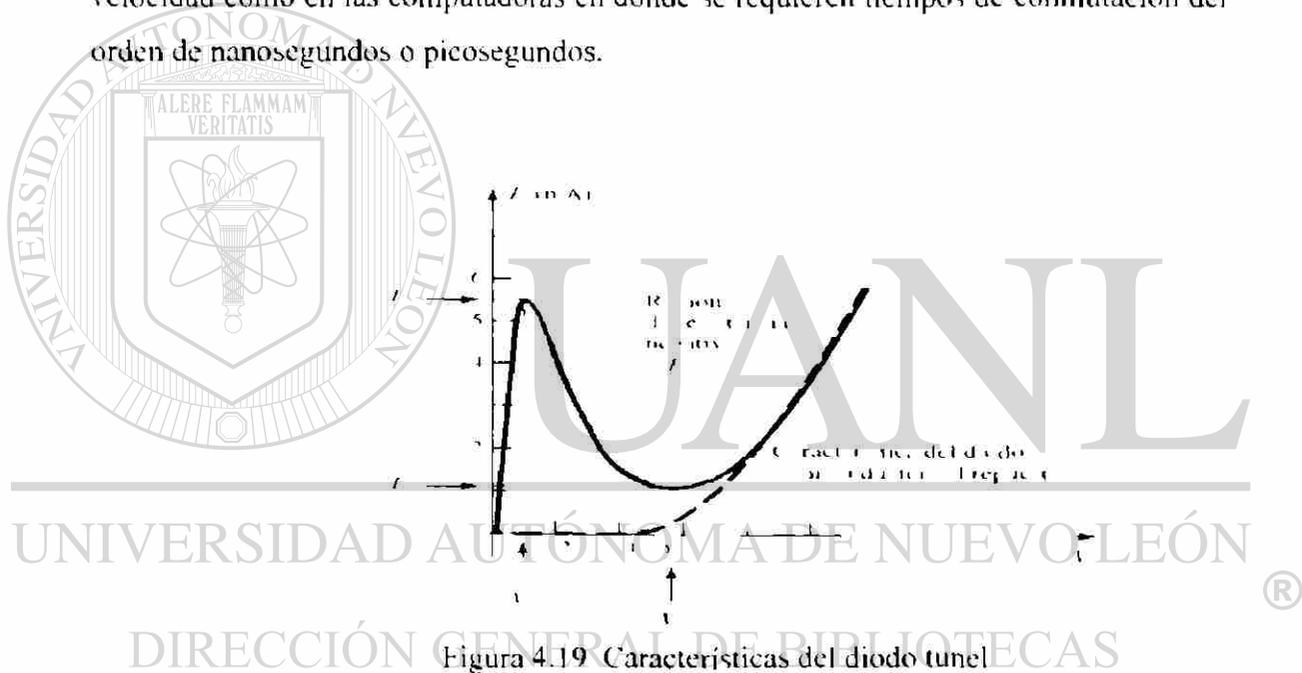
4.5 DIODO TUNEL

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 este punto en lo que se refiere a que tienen una region de resistencia negativa. En esta region, un incremento en el voltaje terminal causa una reducción de la corriente en el diodo.

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

Esto producirá una región de agotamiento bastante reducida del orden de magnitud de 10^{-6} cm o por lo común alrededor de 1/100 del ancho de esta región para un diodo semiconductor común. Es en esta 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, este diodo es utilizado en aplicaciones de alta velocidad como en las computadoras en donde se requieren tiempos de conmutación del orden de nanosegundos o picosegundos.



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

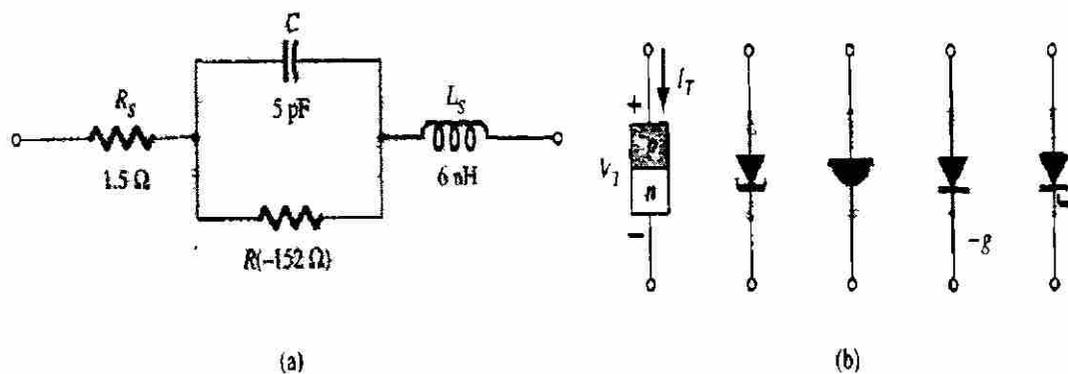


Figura. 4.20 Circuito equivalente y simbolos del diodo tunel

4.6 FOTODIODOS

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

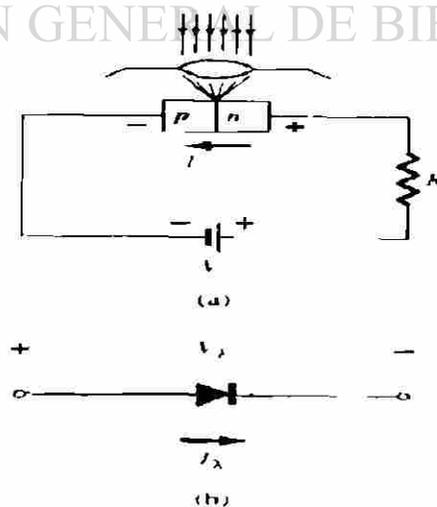


Figura 4.21 Polarización básica, construcción y símbolo del fotodiodo

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.

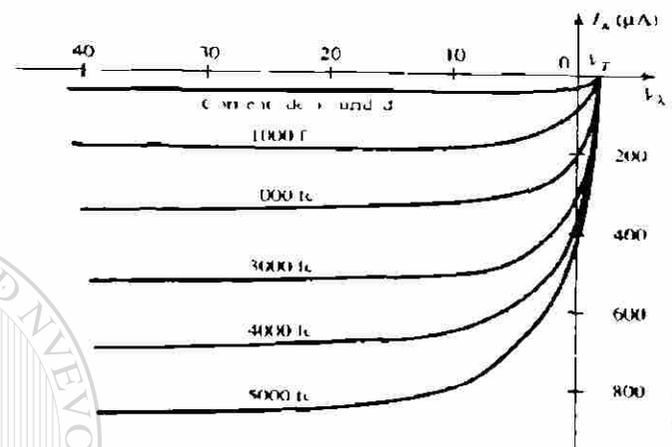


Figura 4.22 Características del fotodiodo

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.

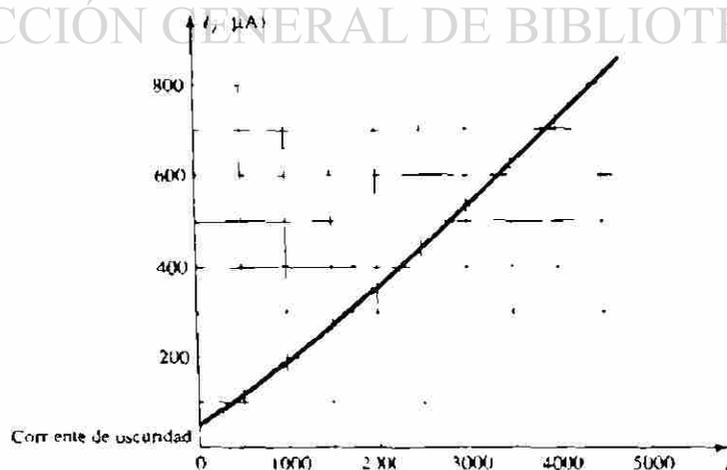


Figura 4.23 Características de I_A para el fotodiodo

CAPITULO 5

TRANSISTORES BIPOLARES

5.1 INTRODUCCIÓN

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

5.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS TRANSISTORES

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

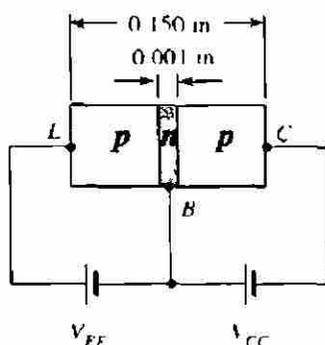


Figura 5.1a Transistor tipo pnp

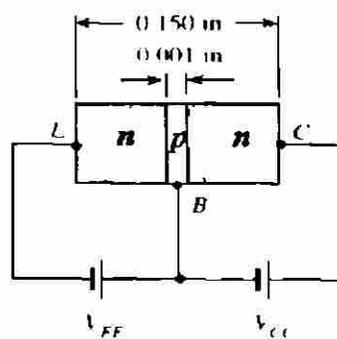


Figura 5.1b Transistor tipo npn

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

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

5.3 OPERACIÓN DEL TRANSISTOR

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

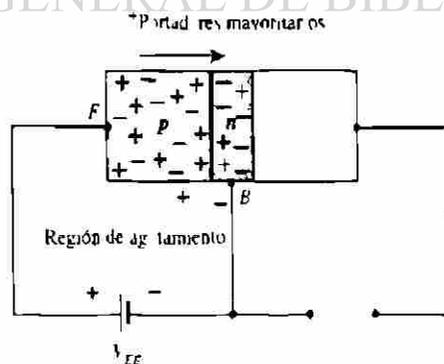


Figura 5.2 Unión con polarización directa de un transistor pnp

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

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

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

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

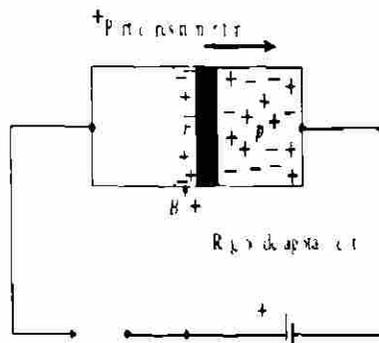


Figura 5.3 Unión con polarización inversa de un transistor pnp

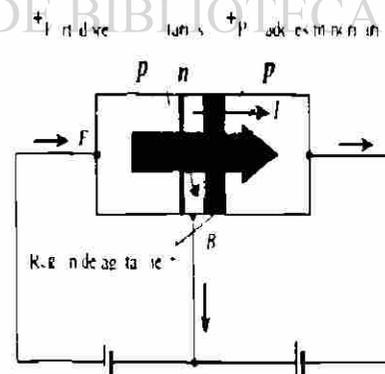


Figura 5.4 Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

5.4 CONFIGURACIÓN DE BASE COMÚN

La terminología de la base 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 esta convención.

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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 o 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_{CE} .

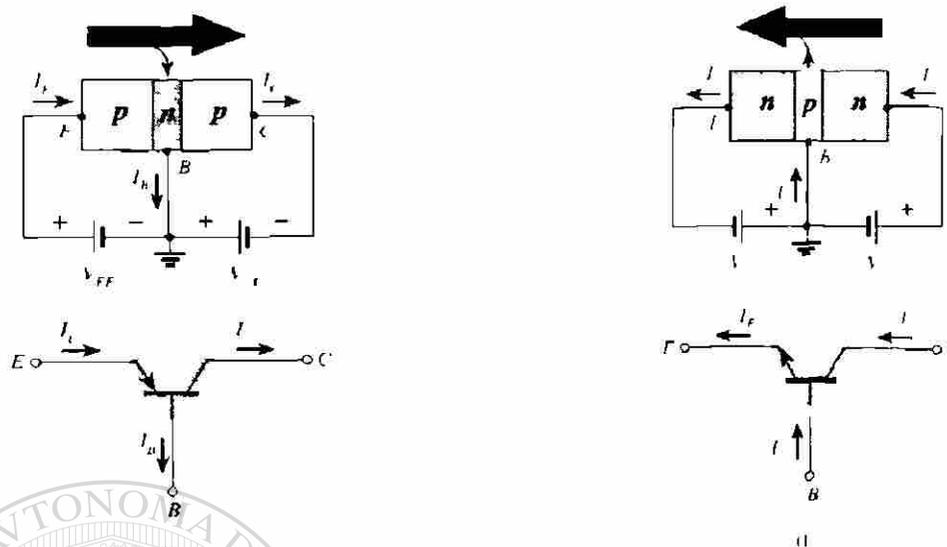


Figura 5.5a y b. Circuitos de configuración base común pnp y npn respectivamente

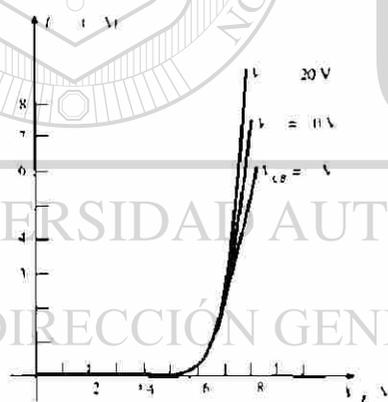


Figura 5.6 Características de entrada del base común

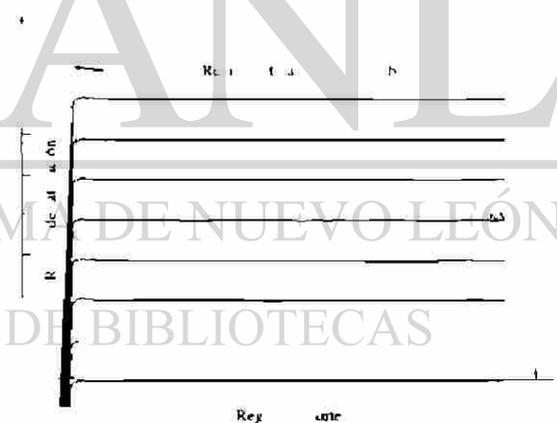


Figura 5.7 Características de salida del base común

El conjunto de salida relaciona la corriente de salida I_c con un voltaje de salida V_{CB} para varios niveles de corriente de entrada I_e según se muestra en la figura 5.7

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

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

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

$$I_c = I_e$$

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

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

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

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

$$V_{BE} = 0.7 V$$

Alfa

En el modo de cd los niveles de I_c e I_e debido a los portadores mayoritarios se encuentran relacionados por una cantidad llamada **Alfa (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 $I_C \approx I_E$ suponiendo que $I_B \approx 0$ microAmp. El resultado es la configuración de la figura 5.8 para el transistor pnp.

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

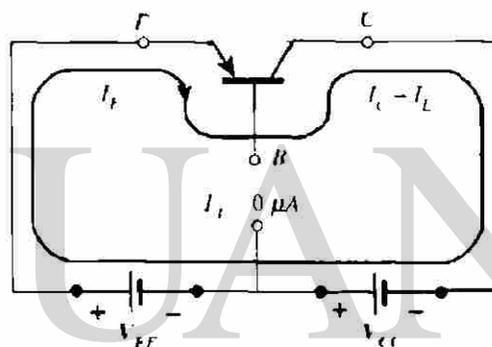
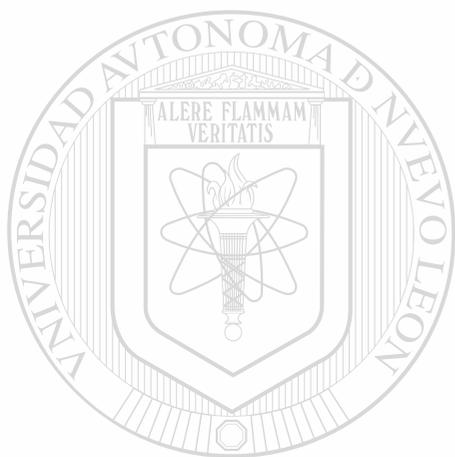


Figura 5.8 Polarización del transistor pnp en base común

Acción amplificadora del transistor en base común

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

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

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

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

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

$$I_i = I_i = 10mA$$

$$V_i = I_i R$$

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

$$V_i = 50V$$

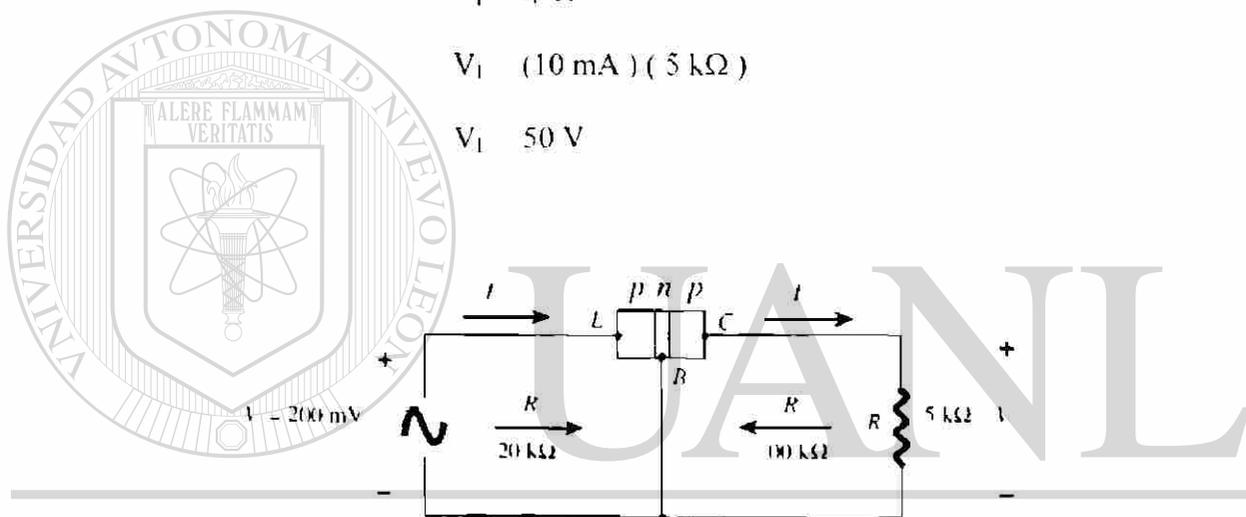


Figura 5.9 Acción básica de amplificación de voltaje de base común

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

la amplificación de voltaje será:

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

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

transferencia + resistor transistor

5.4 CONFIGURACIÓN DE EMISOR COMÚN

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

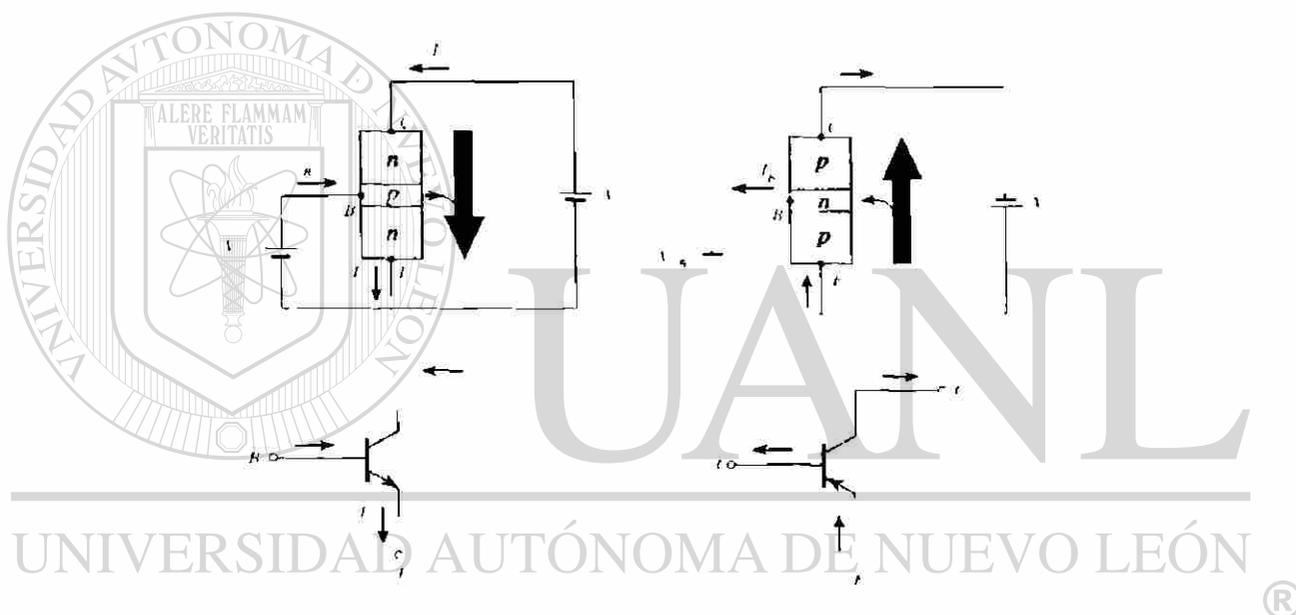


Figura 5.10 Notación y símbolos de la configuración emisor comun en un npn y pnp

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

En la figura 5.11a y 5.11b la magnitud de I_b se encuentra en microamperes, comparado con los miliamperes de I_c . Aquí las curvas de I_b no son tan horizontales.

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

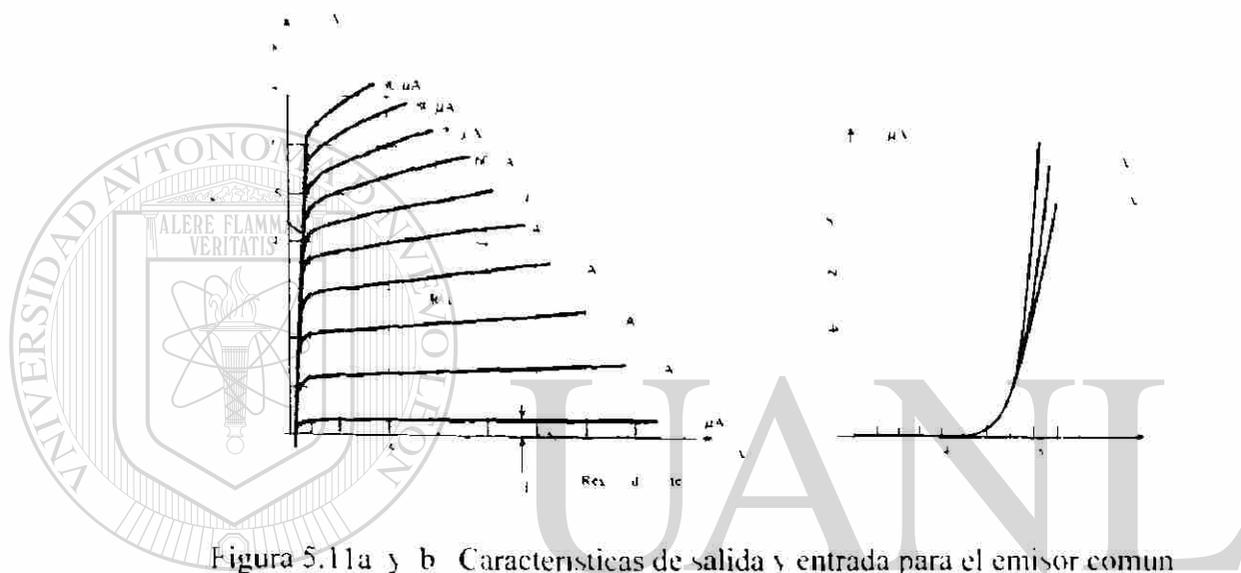


Figura 5.11a y b Características de salida y entrada para el emisor común

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Beta (β)

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

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

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

Se puede desarrollar una relación entre β y α empleando las relaciones básicas:

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

sustituyendo en:

$$I_E = I_C + I_B$$

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

dividiendo ambos lados de la ecuación por I_C se obtiene:

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

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

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

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

$$I_C = \beta I_B$$

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



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



5.5 CONFIGURACIÓN DE COLECTOR COMÚN

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

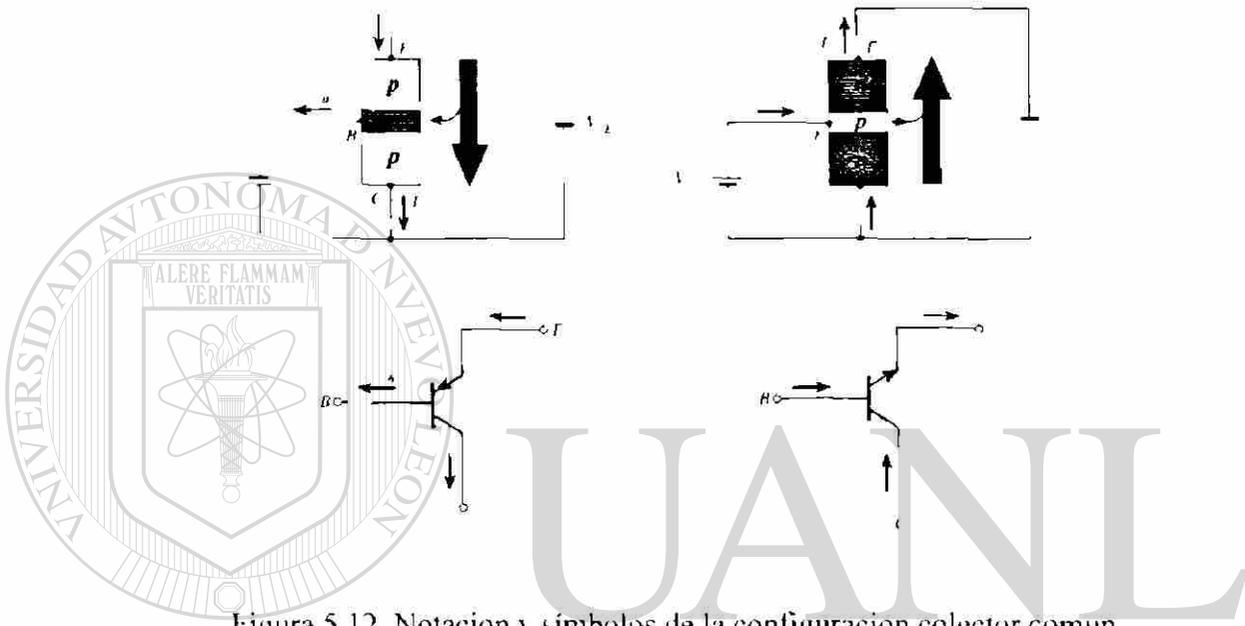


Figura 5.12 Notación y símbolos de la configuración colector común

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

5.6 LÍMITES DE OPERACIÓN

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

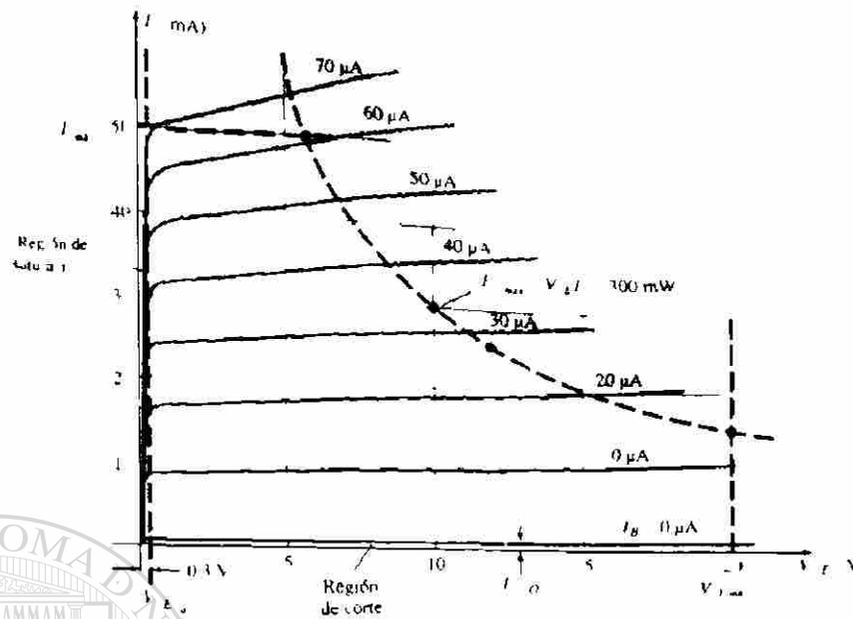


Figura 5.13 Gráfica de la región lineal de operación para un transistor

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

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

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

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

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



CAPITULO 6

POLARIZACIÓN DE LOS TRANSISTORES

BIPOLARES

6.1 INTRODUCCION

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

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

Las relaciones básicas importantes para el transistor son:

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

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

$$I_C = \beta I_B$$

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

6.2 PUNTO DE OPERACIÓN

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

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

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

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

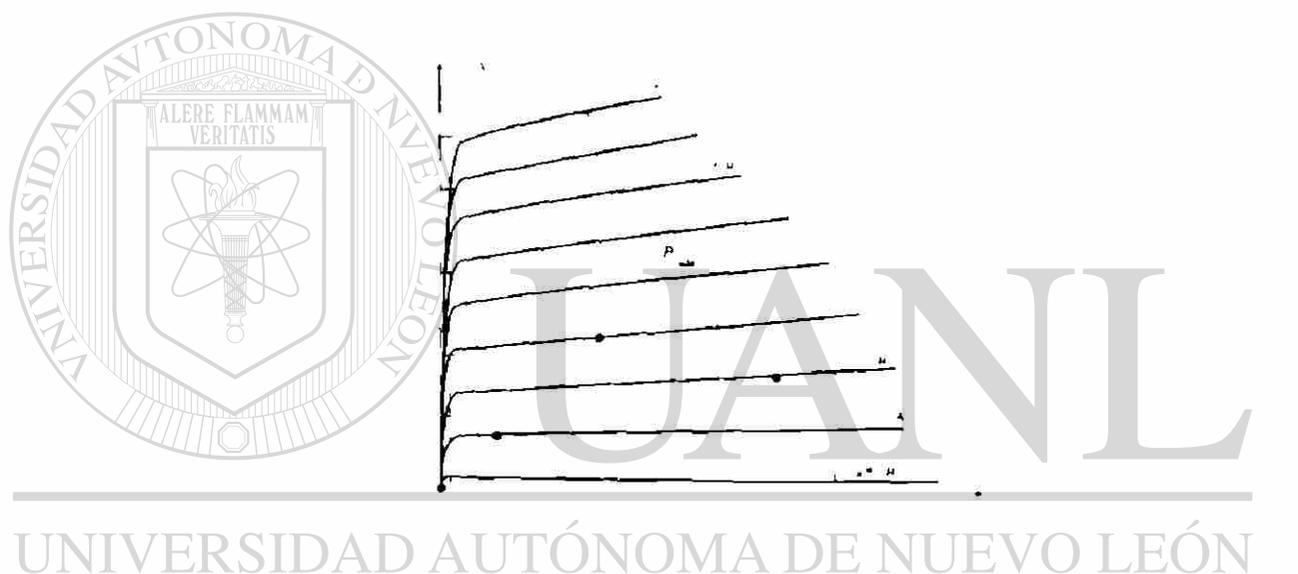


Figura 6.1 Puntos de operacion dentro de los limites de operacion del transistor

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

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

6.3 REGIONES DE OPERACIÓN

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

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

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

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

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

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

6.4 DIFERENTES TIPOS DE POLARIZACIÓN

CIRCUITO DE POLARIZACIÓN FIJA

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

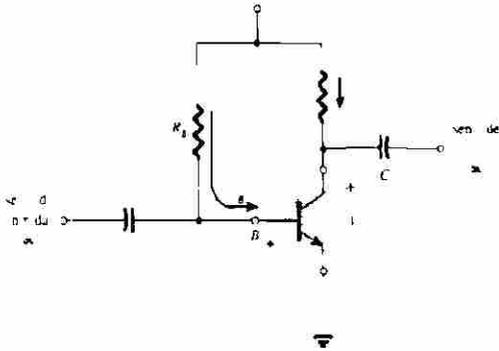


Figura 6.2 Circuito de polarización fija

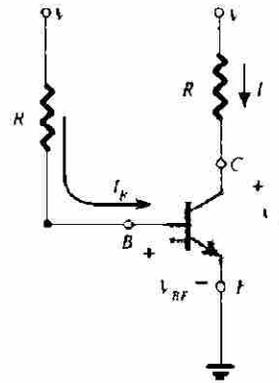


Figura 6.3 Equivalente del circuito de la figura 6.2

Polarización directa de base-emisor

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

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

por lo tanto:

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

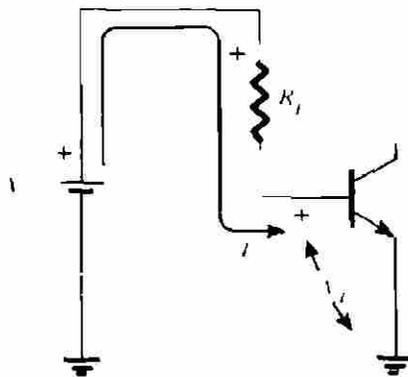


Figura 6.4 Circuito para la malla base emisor

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

Malla de colector-emisor

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

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

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

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

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

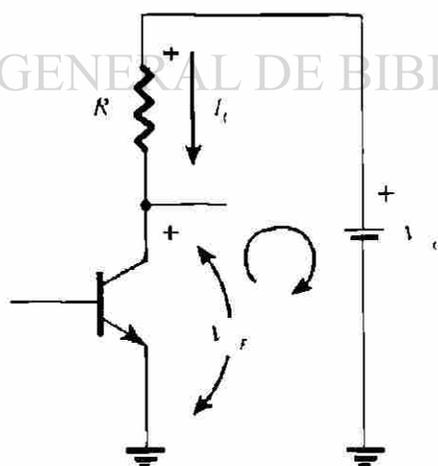


Figura 6.5 Circuito de malla colector emisor

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

Análisis por recta de carga

La red de la figura 6.7a establece una ecuación para la salida que relaciona las variables I_C y V_{CE} de la siguiente manera :

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

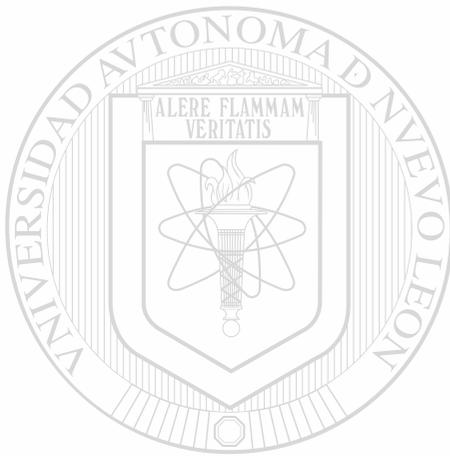


Figura 6.7a Circuito para el análisis de la recta de carga

Las características de salida del transistor también relacionan las mismas dos variables I_C y V_{CE} como se muestra en la figura 6.7b.

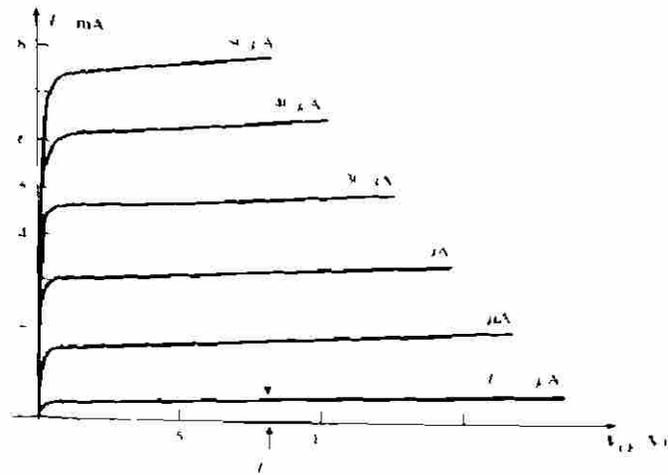


Figura 6.7b Curvas características de salida

Si se elige la I_c con un valor de 0mA, estaremos especificando en el eje horizontal como la línea sobre la cual se localizara un punto. Al sustituir $I_c = 0$ mA en la ecuación anterior tendremos:

$$V_{ce} = V_{cc} - (0) R_c$$

definiendo un punto para la línea recta, como se ilustra en la figura 6.8

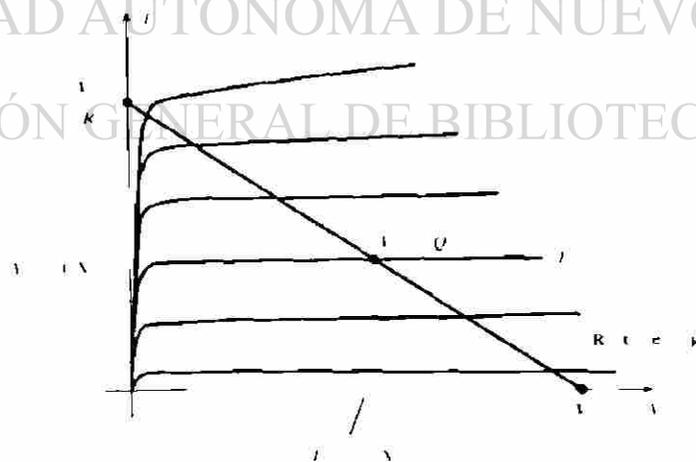


Figura 6.8 Grafica de la recta de carga

Si ahora se escoge el valor de 0V para V_{CE} con el que se establece el eje vertical como la línea sobre la cual se definirá un segundo punto, la I_C se determinará por la siguiente ecuación:

$$0 = V_{CC} - I_{C_{max}} R_C$$

Al unir los dos puntos la línea resultante sobre la gráfica se denominará **recta de carga**.

Puesto que está definida por la resistencia de carga R_C . Al resolver para el nivel resultante de I_B el punto Q real se puede establecer como el mostrado en la figura 6.8.

Si el nivel de I_B se modifica al variar el valor de R_B , el punto de operación Q se mueve hacia arriba y hacia abajo de la recta de carga figura 6.9. Si V_{CC} se mantiene fijo y R_C cambia, la recta de carga subirá, esta se encuentra representada en la figura 6.10. Si la I_B se mantiene constante el punto Q se trasladará. Si R_C se fija y V_{CC} varía la recta de carga se desplazará mostrándose en la figura 6.11

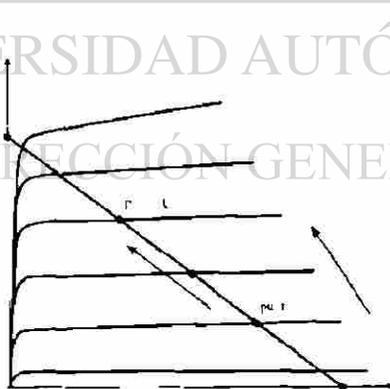


Figura 6.9 Gráfica del punto Q con niveles crecientes de I_B

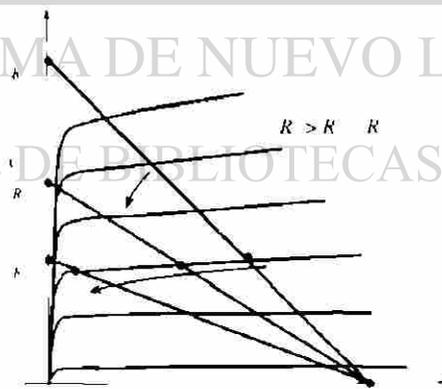


Figura 6.10 Gráfica de niveles crecientes de R_C

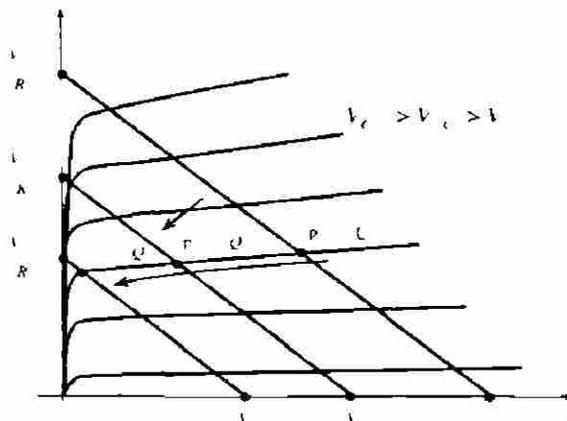


Figura 6.11 Grafica para niveles pequeños de V_{CC}

Circuito de polarización estabilizada de emisor

La red de polarización de ed de la figura 6.12 contiene una resistencia en el emisor para mejorar el nivel de estabilidad sobre el de la configuración de polarización fija.

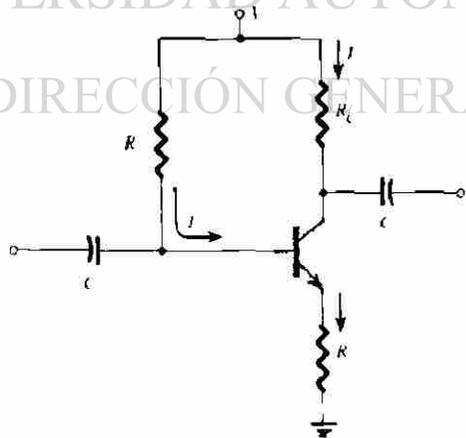


Figura 6.12 Circuito de polarización con resistor de emisor

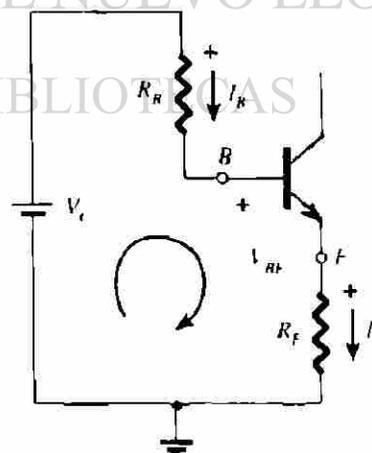


Figura 6.13 Malla de base-emisor

Malla de base-emisor.

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla de la figura 6.13 se obtiene como resultado la siguiente ecuación:

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

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

$$+ V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - (\beta + 1) I_B R_L = 0$$

$$-I_B [R_B + (\beta + 1) R_L] + V_{CC} - V_{BE} = 0$$

$$I_B [R_B + (\beta + 1) R_L] = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_L}$$

La única diferencia con respecto a la polarización fija es el término $(\beta + 1) R_L$ en la figura 6.14. La resistencia R_L es **reflejada** a la entrada del circuito de base por un factor $(\beta + 1)$ y por lo tanto un nivel de impedancia del circuito de entrada es mostrado en la figura 6.15.

$$R = (\beta + 1) R_L$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

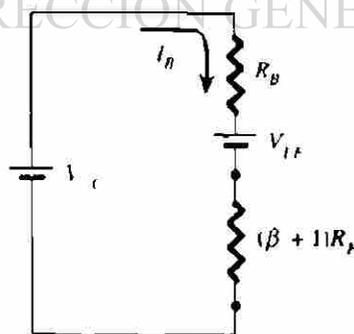


Figura 6.14 Circuito equivalente para la corriente I_B

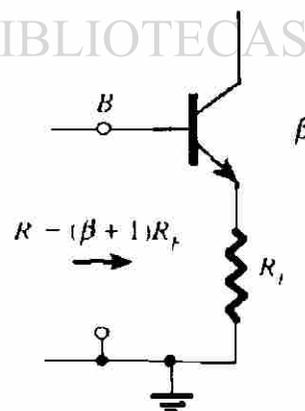


Figura 6.15 Circuito con reflexión de impedancia R_L

Malla de colector- emisor.

La malla de salida entre colector-emisor se dibuja en la figura 6.16 y aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff a esa malla se obtiene :

$$+ I_1 R_1 + V_{CE} + I_C R_C - V_{CC} = 0$$



Figura 6.16
Malla de colector a emisor

como: $I_1 = I_C$

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

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

$$V_E = I_1 R_E \quad \text{por lo tanto:}$$

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

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

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

El voltaje de base con respecto a tierra se puede determinar .

$$V_B = V_{CC} - I_B R_B$$

$$V_B = V_{BE} + V_E$$

La adición de la resistencia de emisor a la polarización de cd del BJT proporciona una mejor estabilidad, esto es las corrientes y voltajes de polarización de cd se mantienen más cerca de los puntos donde fueron fijados por el circuito aun cuando cambien las condiciones externas como el voltaje de alimentación, la temperatura, incluso la beta del transistor.

Ejemplo 6.2.- Para la red polarizada de emisor de la figura 6.17 determinar:

- a) I_B b) I_C c) V_{CE} d) V_C
 e) V_E f) V_B g) V_{BE}

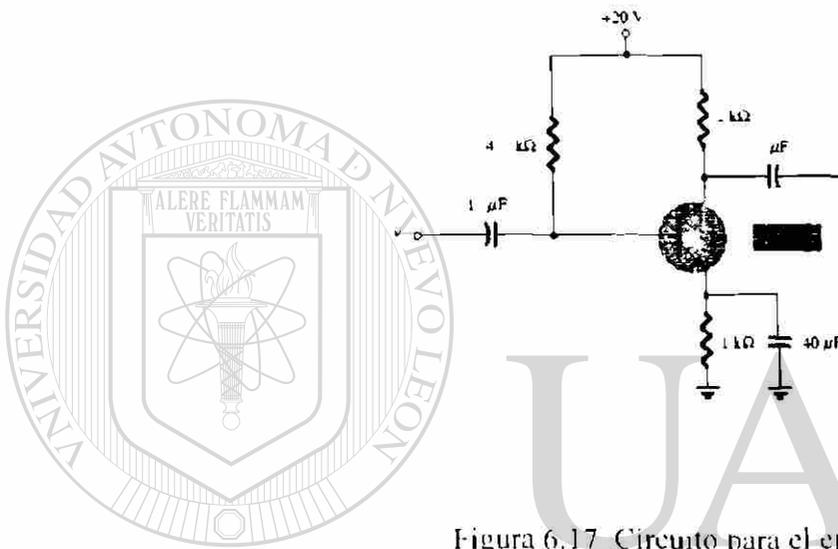


Figura 6.17 Circuito para el ejemplo 6.2

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Solución:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$a) \quad I_B = \frac{V - V_{BE}}{R + (\beta + 1)R_E} = \frac{20V - 0.7V}{430k\Omega + (51)(1k\Omega)}$$

$$I_B = \frac{19.3V}{481k\Omega} = 40.1\mu A$$

$$b) \quad I_C = \beta I_B$$

$$I_C = (50)(40.1\mu A)$$

$$I_C = 2.01\text{ mA}$$

$$\begin{aligned} \text{e)} \quad V_{CE} &= V_{CC} - I_C (R_C + R_E) \\ V_{CE} &= 20 \text{ V} - (2.01 \text{ mA})(2\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega) = 20 \text{ V} - 6.03 \text{ V} \\ V_{CE} &= 13.97 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{d)} \quad V_C &= V_{CC} - I_C R_C \\ V_C &= 20 \text{ V} - (2.01 \text{ mA})(2\text{k}\Omega) = 20 \text{ V} - 4.02 \text{ V} \\ V_C &= 15.98 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{e)} \quad V_E &= V_C - V_{CE} \\ V_E &= 15.98 \text{ V} - 13.97 \text{ V} \\ V_E &= 2.01 \text{ V} \\ V_E &= I_E R_E = I_C R_E \\ V_E &= (2.01 \text{ mA})(1\text{k}\Omega) \\ V_E &= 2.01 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{f)} \quad V_B &= V_{BE} + V_E \\ V_B &= 0.7 \text{ V} + 2.01 \text{ V} \end{aligned}$$

$$V_B = 2.71 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \text{g)} \quad V_{BC} &= V_B - V_C \\ V_{BC} &= 2.71 \text{ V} - 15.98 \text{ V} \\ V_{BC} &= -13.27 \text{ V (polarizado inversamente)} \end{aligned}$$

Análisis de la recta de carga

Este tipo de análisis de la recta de carga es ligeramente diferente al de polarización fija, de la ecuación de la malla de salida se obtiene

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

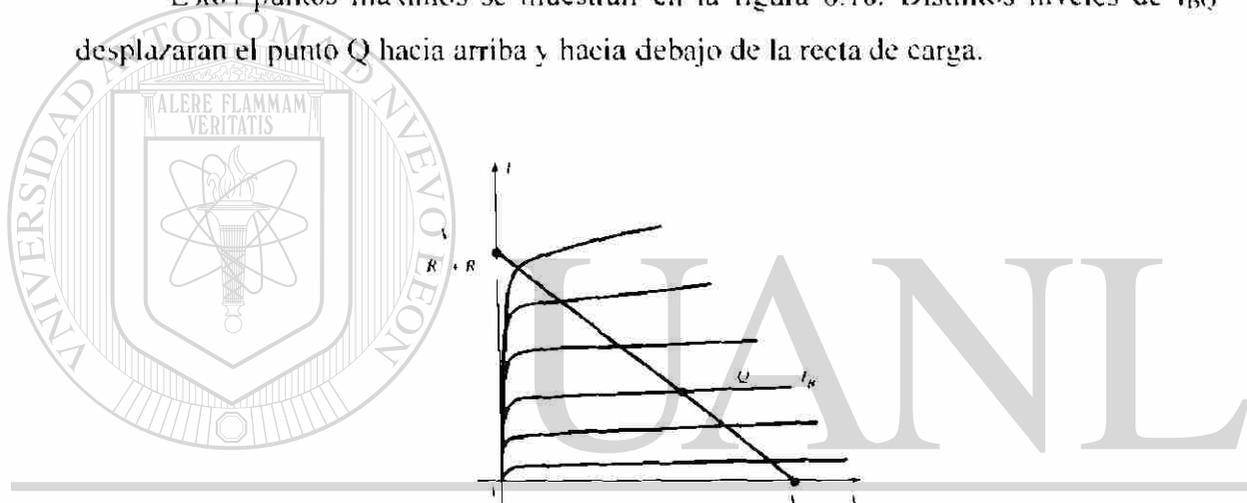
Si elegimos una $I_C = 0$ mA, se obtiene:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C = 0 \text{ mA}$$

Si elegimos un $V_{CE} = 0$ V se obtiene:

$$I_C = V_{CC} / (R_C + R_E) = I_{CQ}$$

Estos puntos maximos se muestran en la figura 6.18. Distintos niveles de I_{BQ} desplazarán el punto Q hacia arriba y hacia debajo de la recta de carga.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 6.18 Gráfica de la recta de carga

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Polarización con divisor de voltaje

En las polarizaciones anteriores la corriente de polarización I_{CQ} y el voltaje V_{CEQ} estaban en función de la ganancia de corriente (beta) del transistor. Sería deseable desarrollar un circuito de polarización menos dependiente, esto es, independiente de la beta del transistor. La configuración de polarización con divisor de voltaje de la figura 6.19 es una red de este tipo. Si analizamos sobre una base exacta la sensibilidad a los cambios de beta se observa que esta es bastante pequeña.

Un punto de operación Q se define por un nivel fijo de I_{CQ} y V_{CEQ} como se muestra en la figura 6.20. El nivel de I_{BQ} se modificara con el cambio de beta, pero el punto de operación sobre las características definido por I_{CQ} y V_{CEQ} puede permanecer fijo si se utilizan los parametros apropiados del circuito

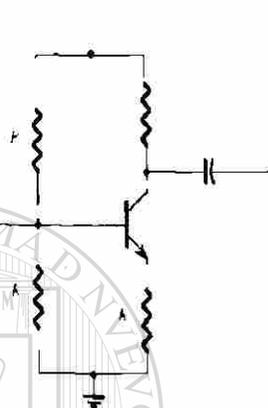


Figura 6.19 Circuito de polarización por divisor de voltaje

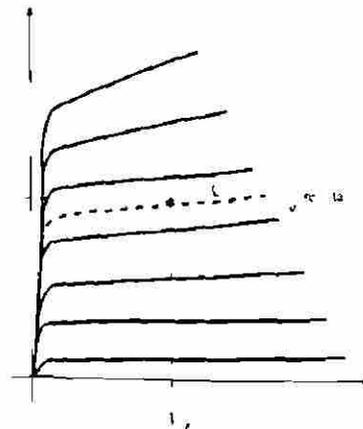


Figura 6.20 Grafica del punto Q

Análisis exacto

La parte de entrada de la figura 6.19 se puede redibujar utilizando un circuito equivalente thevenin, esto con el fin de facilitar el analisis de este tipo de polarización como se ilustra en la figura 6.21. La red thevenin se puede hallar de la siguiente manera:

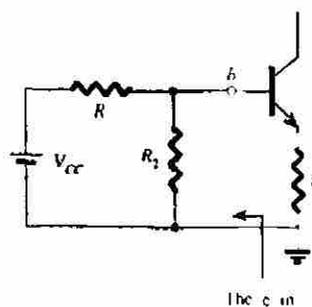


Figura 6.21 Redibujo de la malla de entrada de la figura 6.19

R_{Th} : La fuente de voltaje se reemplaza por un cortocircuito equivalente como se muestra en la figura 6.22

$$R \quad R \quad R_5$$

E_{Th} : La fuente de V_{CC} se reintegra a la red y el voltaje thevenin de circuito abierto de la figura 6.23 se obtiene:

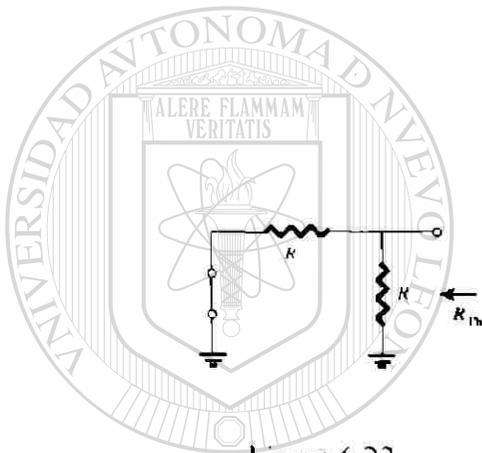


Figura 6.22
Circuito para la R_{Th}

$$I = \frac{V_R}{R + R}$$

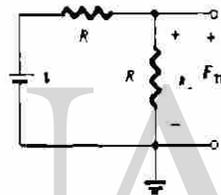


Figura 6.23
Circuito para el E_{Th}

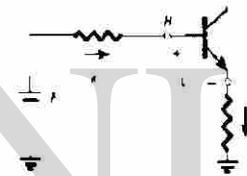


Figura 6.24
Circuito equivalente
thévenin

La red thevenin se vuelve a dibujar como se muestra en la figura 6.24 y la I_{BQ} se puede determinar al aplicar la ley de Kirchhoff la cual será:

$$I_E - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

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

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

Una vez encontrada la I_B las cantidades restantes de la red pueden encontrarse del mismo modo que se hizo para la configuración polarizada de emisor, esto es:

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

Ejemplo 6.3:- Determine el V_{CEQ} y la I_{CQ} para la configuración con divisor de voltaje o llamada también polarización universal de la figura 6.25

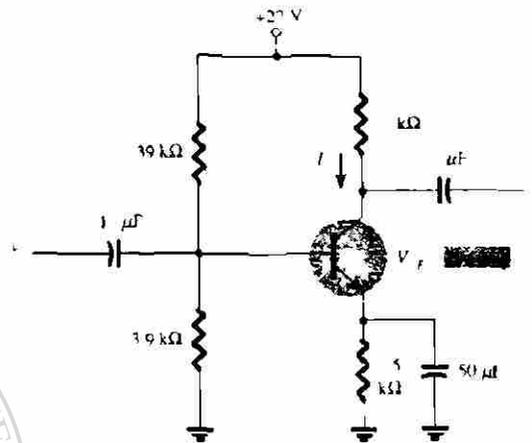


Figura 6.25 Circuito para el ejemplo 6.3

Solución:

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

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

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

$$V_{Th} = \frac{(27V)(3.9k\Omega)}{39k\Omega + 3.9k\Omega} = 2.7V$$

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

$$I_{BQ} = \frac{2.7V - 0.7V}{3.55k\Omega + (141)(1.5k\Omega)} = 3.55k\Omega + 211.5k\Omega$$

$$I_{BQ} = 6.05 \mu A$$

$$I_c = \beta I_B$$

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

$$I_c = 0.85 \text{ mA} = I_{CQ}$$

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

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

$$V_{CE} = 12.22 \text{ V} = V_{CEQ}$$

Análisis aproximado:-

Un análisis de la sección de entrada de la configuración del divisor de voltaje se presenta en la figura 6.26. La resistencia R es la resistencia equivalente entre la base y tierra para el transistor con una resistencia de emisor R_E . La resistencia reflejada entre la base y el emisor se define por $R = (\beta + 1)R_E$. Si $I_a R$ es mucho mayor que la resistencia R_2 , la corriente I_B será mucho menor que I_2 y esta será igual a I_1 . Si la $I_B \approx 0$ comparada con I_1 y con I_2 entonces $I_1 = I_2$ y las resistencias R_1 y R_2 pueden considerarse en serie.

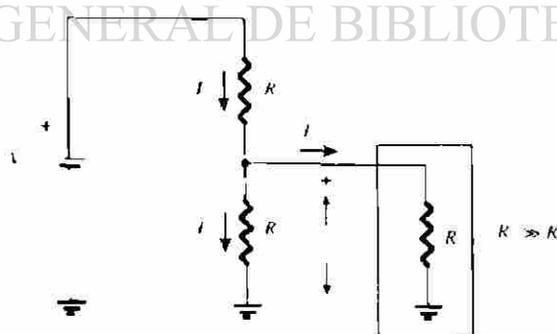


Figura 6.26 Circuito para calcular el voltaje de base aproximado

El voltaje a través de R_2 , que es el voltaje de la base V_B se puede calcular mediante el uso de la regla del divisor de voltaje, ésto es:

$$V_B = I' \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Debido a que $R_2 = (\beta + 1)R_E \approx \beta R_E$, la condición que definirá, en caso que puede aplicarse la consideración, será la siguiente:

$$\beta R_E \geq 10R_2$$

Si Beta veces es el valor de R_E es por lo tanto 10 veces el valor de R_2 , esta aproximación se aplica con gran precisión. Una vez determinado V_B , el nivel de V_E se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$I_{CQ} \approx I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E R_C - I_E R_E \quad \text{como } I_E \approx I_C$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

En la secuencia de los cálculos la beta no aparece ya que la I_B no fue calculada, por lo tanto el punto Q es independiente del valor de Beta.

Ejemplo 6.4:- Repetir el análisis de la figura 6.25 utilizando la técnica aproximada y comparar las soluciones para I_{CQ} y para V_{CEQ} .

Solución:-

$$\beta R_E > 10R_2$$

$$(140)(1.5k\Omega) \geq 10(3.9k\Omega)$$

$$210k\Omega > 39k\Omega \quad (\text{es correcto})$$

$$V_B = \frac{I' R_2}{R_1 + R_2}$$

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

$$V_B = 2V$$

Observar que el nivel de V_B es el mismo que el V_{TH} . Por lo tanto, la principal diferencia entre el análisis aproximado de el análisis exacto es el efecto de la R_{TH} en el análisis exacto que separa V_{TH} y V_B .

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$V_E = 2V - 0.7V$$

$$V_E = 1.3V$$

$$I_{CQ} \approx I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3V}{1.5k\Omega}$$

$$I_{CQ} = 0.867 \text{ mA}$$

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

$$V_{CEQ} = 22V - (0.867 \text{ mA})(10k\Omega + 1.5k\Omega)$$

$$V_{CEQ} = 12.03V$$

Mientras mas grande es el nivel de R_E comparado con R_C , mas cercana sera la solución aproximada sobre la exacta.

Polarización de cd con retroalimentación de voltaje

Un nivel de estabilidad mejorado se puede obtener al introducir una trayectoria de retroalimentación del colector a la base como se muestra en la figura 6.27

Aunque el punto Q no es totalmente independiente de Beta, la sensibilidad a los cambios de beta es normalmente menor que el que se encuentra para las configuraciones de polarización fija o polarización de emisor.

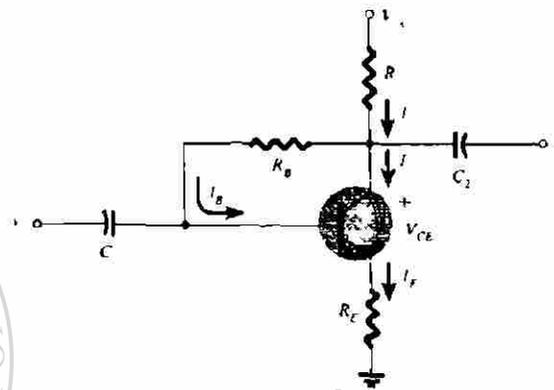


Figura 6.27 Circuito con retroalimentación de voltaje

Malla de base a emisor.

La figura 6.28 muestra la malla de base a emisor, aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff a lo largo de la malla indicada obtenemos:

$$V_{CC} - I_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

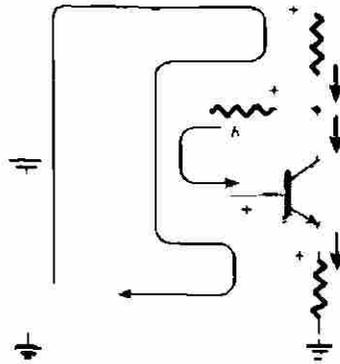


Figura 6.28 Malla base emisor para la figura 6.27

A través de R_C no es I_C sino I'_C en donde $I'_C = I_C + I_B$. Pero el nivel de I_C e I'_C exceden en mucho el nivel usual de I_B y normalmente se emplea la aproximación de $I'_C \approx I_C$ sustituyendo $I'_C = I_C = \beta I_B$ e $I_E = I_C$ tenemos:

$$V_{CC} - \beta I_B R_C - I_B R_B - V_{BE} - \beta I_B R_E = 0$$

agrupando términos se obtiene:

$$V_{CC} - V_{BE} - \beta I_B (R_C + R_E) - I_B R_B = 0$$

por lo tanto para la I_B ,

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta(R_C + R_E)}$$

Malla de colector-emisor

La malla de colector-emisor se proporciona en la figura 6.29 y aplicando la ley de voltaje de kirchhoff se obtiene:

$$I_E R_E - V_{CE} + I'_C R_C - V_{CC} = 0$$

Puesto que la $I'_C = I_C + I_B$ tenemos que:

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

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

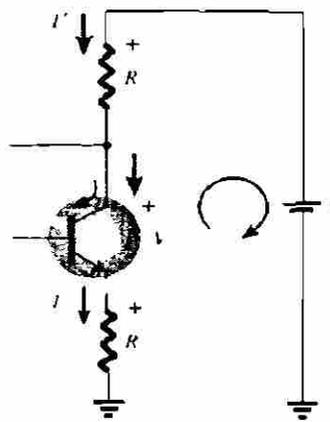


Figura 6.29 Malla colector emisor para la figura 6.27

Ejemplo 6.5

Determine los niveles de operación I_{CQ} y V_{CEQ} para la siguiente red de la figura

6.30

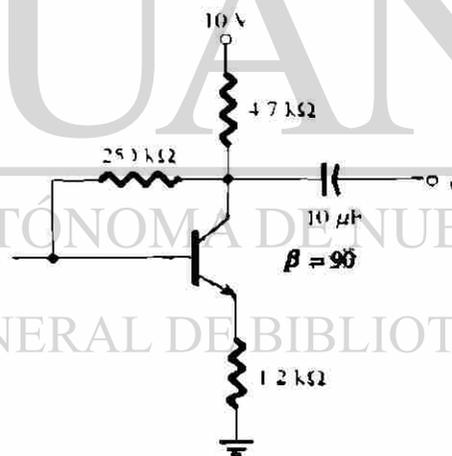


Figura 6.30 Circuito para el ejemplo 6.5

Solución:

$$I_B = \frac{I' - I}{R + \beta(R + R)}$$

$$I_B = \frac{10V - 0.7V}{250k\Omega + (90)(4.7k\Omega + 1.2k\Omega)}$$

$$I_B = \frac{9.3V}{250k\Omega + 531k\Omega} = \frac{9.3V}{781k\Omega}$$

$$I_B = 11.91 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = (90)(11.91 \mu A)$$

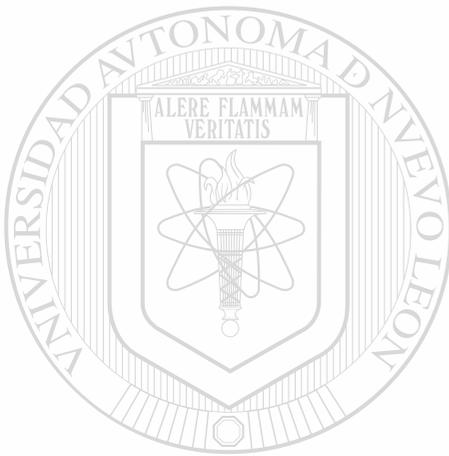
$$I_{CQ} = 1.07 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_C (R_C + R_L)$$

$$V_{CEQ} = 10V - (1.07 \text{ mA})(4.7k\Omega + 1.2k\Omega)$$

$$V_{CEQ} = 10V - 6.31V$$

$$V_{CEQ} = 3.69V$$



UANL

6.4 DIVERSAS CONFIGURACIONES DE POLARIZACIÓN

Hay un número de configuraciones de polarización de BJT que no coinciden con el molde básico de las que se han analizado. En este tipo de polarizaciones el primer paso ha sido la derivación de una expresión para la corriente de base, una vez conocida esta, la corriente de colector y los niveles de voltaje del circuito de salida se pueden determinar directamente.

Ejemplo 6.6

Determine V_C y V_B para la siguiente red de la figura 6.31

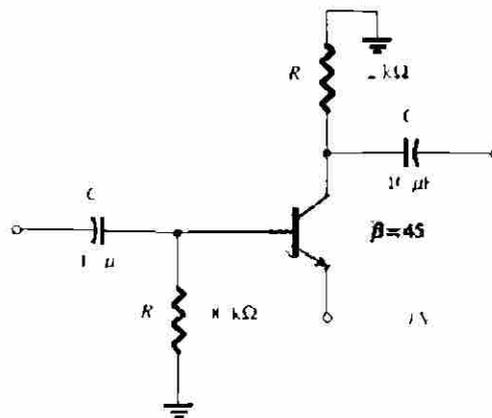


Figura 6.31 Circuito para el ejemplo 6.6

Solución :

Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff en el sentido de las manecillas del reloj a la malla de base a emisor se tiene:

$$-I_B R_B - V_{BE} + V_{E1} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{E1} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{8.3V - 0.7V}{100k\Omega} = 83 \mu A$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = (45)(83 \mu A)$$

$$I_C = 3.735 \text{ mA}$$

$$V_C = -I_C R_C = -(3.75 \text{ mA})(1.2k\Omega)$$

$$V_C = -4.48 \text{ V}$$

$$V_B = -I_B R_B = -(83 \mu\text{A})(100\text{k}\Omega)$$

$$V_B = -8.3 \text{ V}$$

Ejemplo 6.7

Determine V_{CEQ} e I_1 para la red de la figura 6.32

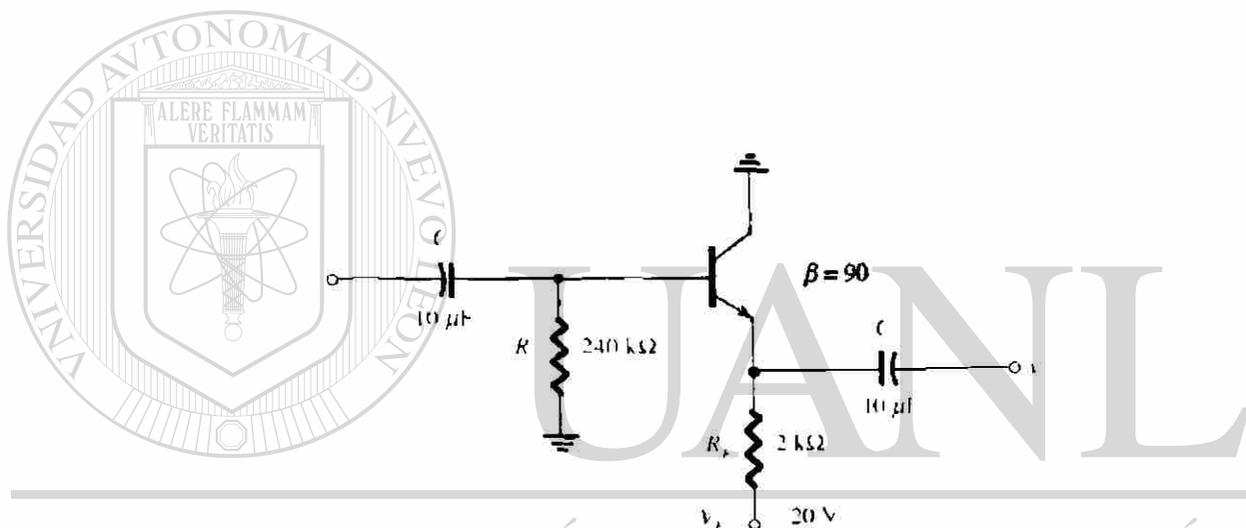


Figura 6.32 Circuito para el ejemplo 6.7

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Solución:

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de entrada obtenemos:

$$-I_B R_B - V_{BE} - I_1 R_1 + V_{I1} = 0$$

$$I_1 = (\beta + 1) I_B$$

$$V_{I1} - V_{BE} - (\beta + 1) I_B R_1 - I_B R_B = 0$$

$$I_B = \frac{V - V_{BE}}{R + (\beta + 1)R}$$

$$I_B = \frac{20V - 0.7V}{240k\Omega + (91)(2k\Omega)}$$

$$I_B = 45.73\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = (90)(45.73\mu A)$$

$$I_C = 4.12 \text{ mA}$$

Aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff al circuito de salida tenemos:

$$-V_{CE} + I_C R_L + V_{CE} = 0$$

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

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta + 1) I_B R_L$$

$$V_{CE} = 11.68 \text{ V}$$

$$I_C = 4.16 \text{ mA}$$

Ejemplo 6.8

Determine V_C y V_B para la red de la figura 6.33



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



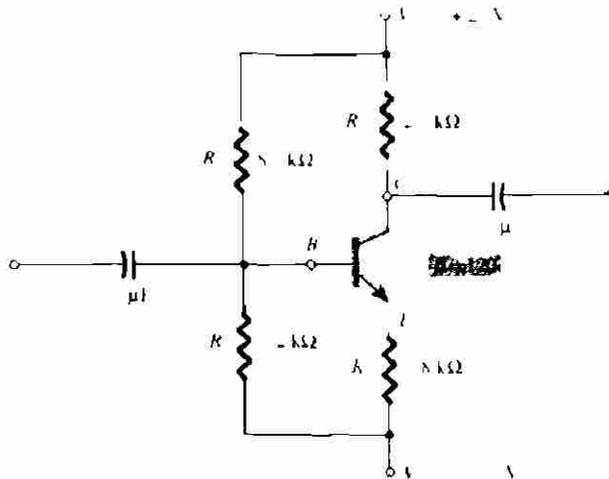
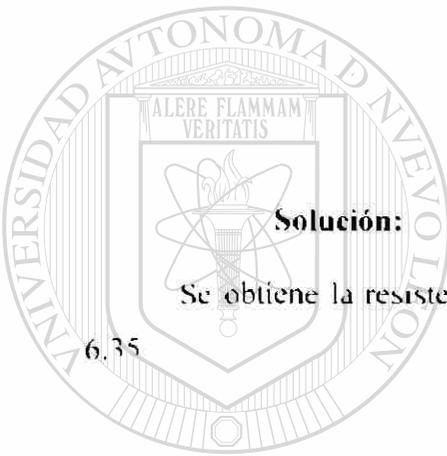


Figura 6.33 Circuito para el ejemplo 6.8



Solución:

Se obtiene la resistencia thevenin y el voltaje para la red en las figuras 6.34 y

6.35

UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

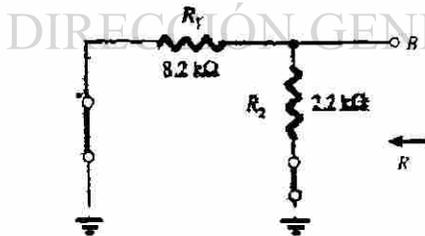


Figura 6.34 Determinacion de la R_h

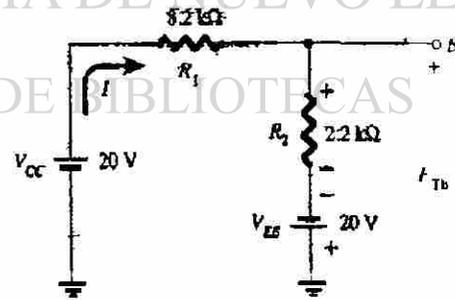


Figura 6.35 Determinacion del I_{th}

$$R_h = 8.2k\Omega \parallel 2.2k\Omega = 1.73k\Omega$$

$$I = \frac{V' + V}{R + R} = \frac{20V' + 20V'}{8.2k\Omega + 2.2k\Omega} = 3.85 \text{ mA}$$

$$E_{Th} = IR - V_{BE}$$

$$E_{Th} = (3.85 \text{ mA})(2.2k\Omega) - 20V$$

$$E_{Th} = -11.53 \text{ V}$$

La red puede volverse a dibujar como se muestra en la figura 6.36 y al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff dará como resultado:

$$-I_1 - I_B R_{Th} - V_{BE} - I_1 R_1 + V_{1E} = 0$$

como: $I_1 = I_B(\beta + 1)$ tenemos:

$$V_{1E} - E_{Th} - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_1 - I_B R_{Th} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{1E} - E_{Th} - V_{BE}}{R + (\beta + 1)R_1}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$I_B = \frac{20V' - 11.53V' - 0.7V'}{1.75k\Omega + (121)(1.8k\Omega)}$$

$$I_B = 35.39 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = (120)(35.39 \mu\text{A})$$

$$I_C = 4.25 \text{ mA}$$

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

$$V_C = 20 \text{ V} - (4.25 \text{ mA})(2.7k\Omega)$$

$$V = 8.53 \text{ V}$$

$$V_B = -E_h - I_B R_h$$

$$V_B = -(11.53 \text{ V}) - (35.39 \mu\text{A})(1.73 \text{ k}\Omega)$$

$$V_B = -11.59 \text{ V}$$

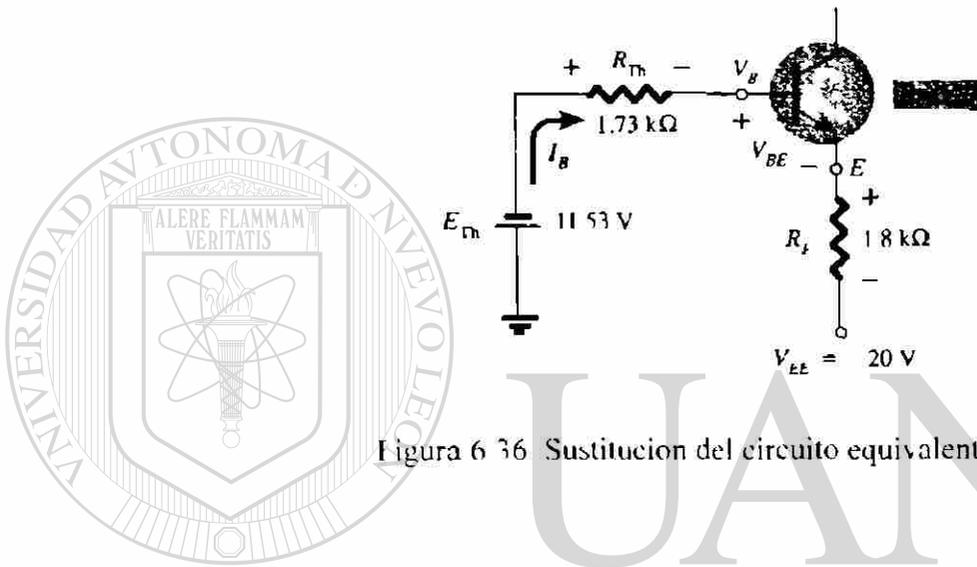


Figura 6.36 Sustitución del circuito equivalente Thévenin

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

VALORES NOMINALES MÁXIMOS

Valor	Símbolo	2N4123	Unidad
Voltaje colector-emisor	V_{CE0}	30	Vdc
Voltaje base-emisor	V_{BE0}	5	V
Corriente del colector continua	I_C	200	mAde
Disipación total del dispositivo @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Pérdida de disipación arriba de 25°C	P_D	625	mW
Factor de tiempo de almacenamiento	τ_{stg}	55 + 5%	

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Característica	Símbolo	Máximo	Unidad
Resistencia térmica colector-ambiente	$R_{\theta jc}$	8.11	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Resistencia térmica base-ambiente	$R_{\theta js}$	50	$^\circ\text{C}/\text{W}$

2N4123
ENCAPSULADO EN ESTILO I
TO 92 TO-226AA

TRANSISTOR DE PROPÓSITO GENERAL
NPN SILICIO

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Característica	Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
CARACTERÍSTICAS DE APAGADO				
Voltaje de ruptura (1 colector-emisor) $I_C = 1.0 \text{ mAde } I_B = 0$	V_{CE0}	30		Vdc
Voltaje de ruptura (base-emisor)	V_{BE0}	5		V
Voltaje de ruptura (base-colector)	V_{BC0}	5		Vdc
Corriente de corte del colector $V_{CE} = 20 \text{ Vdc } I_B = 0$	I_{C0}		50	mAde
Corriente de corte de la base $V_{CE} = 20 \text{ Vdc } I_C = 0$	I_{B0}		5	mAde
CARACTERÍSTICAS DE PUNTO SINUSOIDAL				
Gainancia de corriente DC 1 $(I_C = 2 \text{ mAde } V_{CE} = 10 \text{ Vdc } I_B = 50 \text{ mAde } V_{BE} = 1.0 \text{ Vdc})$	β_{DC}	50	150	
Voltaje de saturación colector-emisor $I_C = 50 \text{ mAde } I_B = 5 \text{ mAde}$	$V_{CE(sat)}$		0.3	Vdc
Voltaje de saturación base-emisor $I_C = 50 \text{ mAde } I_B = 5 \text{ mAde}$	$V_{BE(sat)}$		0.7	V
CARACTERÍSTICAS DE PEQUEÑA SEÑAL				
Frecuencia de corte en corriente continua $I_C = 2 \text{ mAde } V_{CE} = 10 \text{ Vdc } I_B = 0.1 \text{ mAde}$	f_T	25		MHz
Capacitancia de salida $V_{CE} = 10 \text{ Vdc } f = 1 \text{ MHz}$	C_{ob}		4	pF
Capacitancia de entrada $V_{BE} = 10 \text{ Vdc } f = 1 \text{ MHz}$	C_{ib}		8	pF
Gainancia en corriente en pequeña señal $(I_C = 2 \text{ mAde } V_{CE} = 10 \text{ Vdc } f = 1.0 \text{ kHz})$	β_{AC}	50	200	
Resistencia de salida $V_{CE} = 10 \text{ Vdc } f = 1 \text{ MHz}$	r_o		5	Ω
Resistencia de entrada $V_{BE} = 10 \text{ Vdc } f = 1 \text{ MHz}$	r_{ie}		25	Ω

Tabla 6.1 Hoja de especificaciones del transistor bipolar BJT 2N4123

CAPITULO 7

TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

7.1 INTRODUCCIÓN.

El transistor de efecto de campo (FET) por las siglas en inglés: **Field Effect Transistor** es un dispositivo de tres terminales que se utiliza para aplicaciones diversas que se asemejan, en una gran proporción a las del transistor BJT.

El transistor **BJT** es un dispositivo controlado por corriente como se observa en la figura 7.1a, mientras que el **JFET** es un dispositivo controlado por voltaje como se muestra en la figura 7.1b

La corriente I_C es una función directa del nivel de I_B . Para el FET la corriente I_D será una función del voltaje V_{GS} aplicado al circuito de entrada. En cada caso, la corriente del circuito de salida está controlado por un parámetro del circuito de entrada.



Figura 7.1a Transistores controlados
por corriente

Figura 7.1b Transistores controlados
por voltaje

Así como existen transistores bipolares **npn** y **pnp** hay transistores de efecto de campo de canal-**n** y de canal-**p**. El transistor **BJT** es un dispositivo **bipolar**, el prefijo **bi** indica que el nivel de conducción es una función de dos portadores de carga, los electrones y los huecos. El **FET** es un dispositivo **unipolar** que depende para su conducción únicamente de electrones (canal-**n**) o de huecos (canal-**p**).

Una de las características más importantes de los transistores de efecto de campo es una **gran impedancia de entrada** que va de 1 a varios cientos de megaohms, también son más estables a la temperatura que los BJT, lo cual los hace más útiles en los circuitos integrados.

7.2 CONSTRUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS JFET.

La construcción básica del JFET de canal-**n** se muestra en la figura 7.2. La mayor parte de la estructura es del material tipo-**n** que forma el canal entre las capas interiores del material tipo-**p**. La parte superior del canal de tipo-**n** se encuentra conectada por medio de un contacto óhmico a la terminal referida como el **drenador (D)** (por su sigla en inglés, **Drain**), mientras que el extremo inferior del mismo material se conecta por medio de un contacto óhmico a una terminal referida como la **fuentes (S)** (por su sigla en inglés, **Source**). Los dos materiales de tipo-**p** se encuentran conectados entre sí y también a una terminal de **compuerta (G)** (por su sigla en inglés, **Gate**).

El JFET tiene dos uniones p-n bajo condiciones sin polarización, el resultado es una región de agotamiento en cada unión como se muestra en la figura 7.2. La región de agotamiento es aquella que no presenta portadores libres.

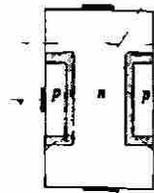


Figura 7.2 Transistor de efecto de campo de union (JFET)

$V_{GS} = 0 \text{ V}$, V_{DS} con algún valor positivo

En la figura 7.3 se ha aplicado un voltaje positivo V_{DS} a través del canal, y la entrada se conecta directamente a la fuente con objeto de establecer la condición $V_{GS} = 0 \text{ V}$.

En el instante en que se aplica el voltaje $V_{DS} = V_{DS}$, los electrones serán atraídos a la terminal del drenador, estableciéndose la corriente convencional I_D con la dirección definida de la figura 7.3. Las corrientes del drenador y la fuente son equivalentes esto es: $I_D = I_S$, el flujo de carga se encuentra relativamente sin ninguna restricción y solo la limita la resistencia del canal-n entre el drenador y la fuente.

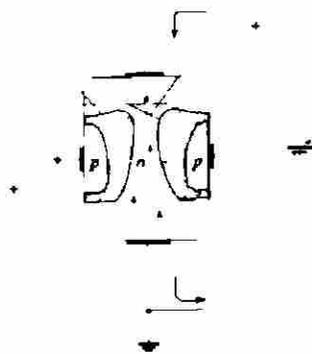


Figura 7.3 JFET con $V_{GS} = 0 \text{ V}$
 $V_{DS} = 0 \text{ V}$

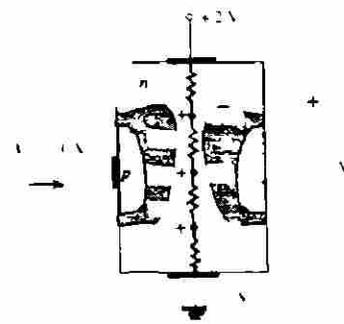


figura 7.4 Potenciales variables de polarización inversa

Es importante observar que la región de agotamiento es más amplia cerca de la parte superior de ambos materiales de tipo-p. El resultado de esto, es que la región superior del material tipo-p es que esta polarizada de manera inversa con cerca de 1.5V con la región interior polarizada en forma inversa únicamente con 0.5V. Mientras mayor es la polarización inversa aplicada, más ancha es la región de agotamiento, de ahí que la distribución de la región de agotamiento es como se muestra en la figura 7.4.

El hecho de que la unión p-n este polarizada en forma inversa a través de toda la longitud del canal ocasiona una corriente en la entrada de cero amperes como es mostrado en la misma figura. El hecho de que $I_G = 0$ mA es una característica muy importante del FET.

Cuando del voltaje V_{DS} se incrementa desde cero a unos cuantos volts, la corriente aumenta como lo determina la ley de ohm y la gráfica de I_D en función de V_{DS} aparece en la figura 7.5. La rectitud de la gráfica indica que para la región de valores pequeños de V_{DS} , la resistencia es en esencia constante. Cuando V_{DS} se eleva y se acerca al nivel referido como el V_p en la figura 7.5 las regiones de agotamiento de la figura 7.3 se harán más amplias ocasionando una reducción notable en el ancho del canal.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La trayectoria de conducción reducida causa que se incremente la resistencia esto es mostrado en la curva en la figura 7.5. Mientras más horizontal es la curva, mayor es la resistencia, esto significa que la resistencia está alcanzando un número infinito de ohms en la región horizontal. Si V_{DS} se eleva a un nivel donde parece que las dos regiones de agotamiento se "tocan", como se muestra en la figura 7.6 resultará una condición referida como estrechamiento y se denomina como V_p (por sus siglas en inglés, **pinch-off**).

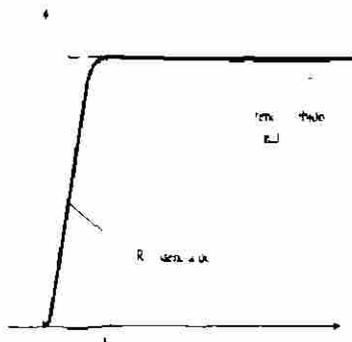


Figura 7.5 Gráfica de I_D en función de V_{DS} para $V_{GS} = 0\text{ V}$

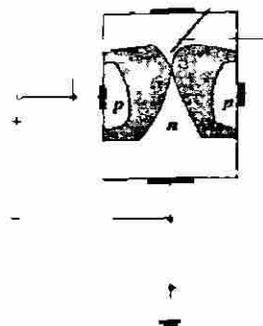


Figura 7.6 Estrechamiento del JFET ($V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{DS} = V_P$)

Mientras V_{DS} se incrementa más allá de V_P , la región del encuentro cercano entre las dos regiones de agotamiento incrementa su longitud a lo largo del canal, pero el nivel de I_D permanece esencialmente constante. Por lo tanto, una vez que $V_{DS} = V_P$, el JFET tiene las características de una fuente de corriente.

I_{DSS} es la corriente máxima de drenador para un JFET y esta definida mediante las condiciones $V_{GS} = 0\text{ V}$ y $V_{DS} = V_P$.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Para un $V_{GS} < 0\text{ V}$
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El voltaje de la compuerta a la fuente dado por V_{GS} es el voltaje que controla al JFET. Para el dispositivo de canal-n el voltaje de control V_{GS} se hace más y más negativo a partir de su nivel $V_{GS} = 0\text{ V}$. Es decir, la terminal de la compuerta se hace a niveles de potencial más y más bajos en comparación con la fuente.

En la figura 7.7 se aplica un voltaje negativo de -1 V entre las terminales de la compuerta y la fuente para un nivel bajo de V_{DS} . El efecto del V_{GS} aplicado de polaridad negativa es el de establecer regiones de agotamiento similares a las que se obtuvieron con un $V_{GS} = 0\text{ V}$ pero a niveles menores que V_{DS} .

Por tanto, el resultado de aplicar una polarización negativa en la compuerta es alcanzar una saturación a un nivel menor a V_{DS} como se muestra en la figura 7.8 para $V_{GS} = -1$ V. El nivel resultante de saturación para I_D se ha reducido y de hecho continuara reduciendose mientras V_{GS} se haga todavía mas negativo, para entonces el voltaje de estrechamiento continua cayendo en una trayectoria parabolica conforme V_{GS} se hace mas negativo. Cuando $V_{GS} = -V_P$, V_{GS} sera lo suficientemente negativo como para establecer un nivel de saturación que sera en esencia 0 mA para todos los propositos prácticos el dispositivo ha sido "apagado".



Figura 7.7 JFET con aplicación de voltaje negativo a la entrada

Figura 7.8 Características del JFET canal-n

El nivel de V_{GS} que da por resultado $I_D = 0$ mA se encuentra definido por: $V_{GS} = -V_P$ siendo V_P un voltaje negativo para los dispositivos de canal-n y un voltaje positivo para los JFET de canal-p

En la mayor parte de las hojas de especificaciones, el voltaje de estrechamiento se encuentra especificado como $V_{GS(off)}$ en vez de V_P .

Resistencia controlada por voltaje.

La región a la izquierda del estrechamiento en la figura 7.8 se conoce como la **región óhmica ó de resistencia controlada por voltaje**. En esta región al JFET se le usa en realidad como una resistencia variable cuyo valor se encuentra controlado por medio de voltaje de la compuerta a la fuente.

7.3 DISPOSITIVOS DE CANAL-P

El JFET de canal-p esta construido exactamente de la misma manera que el dispositivo de canal-n de la figura 7.2 con una inversion de los materiales tipo-p y tipo-n como es mostrado en la figura 7.9. Las direcciones de corriente definidas estan invertidas, como las polaridades reales para los voltajes V_{GS} y V_{DS} .



Figura 7.9 JFET canal p



Figura 7.10 Características del JFET canal-p

Para el dispositivo de canal-p este sera estrechado mediante voltajes crecientes positivos de la compuerta a la fuente y la notacion de doble subindice para V_{DS} , por tanto dara como resultado voltajes negativos para V_{DS} sobre las características de la figura 7.10 tiene una I_{DSS} de 6 mA y un voltaje de estrechamiento de $V_{GS} = +6$ V.

Símbolos

Los símbolos gráficos para los JFET de canal-n y de canal-p se presentan en la figura 7.11 observar que la flecha se encuentra apuntando hacia adentro para dispositivos de canal-n. La única diferencia en el símbolo es la dirección de la flecha para el dispositivo de canal-p.

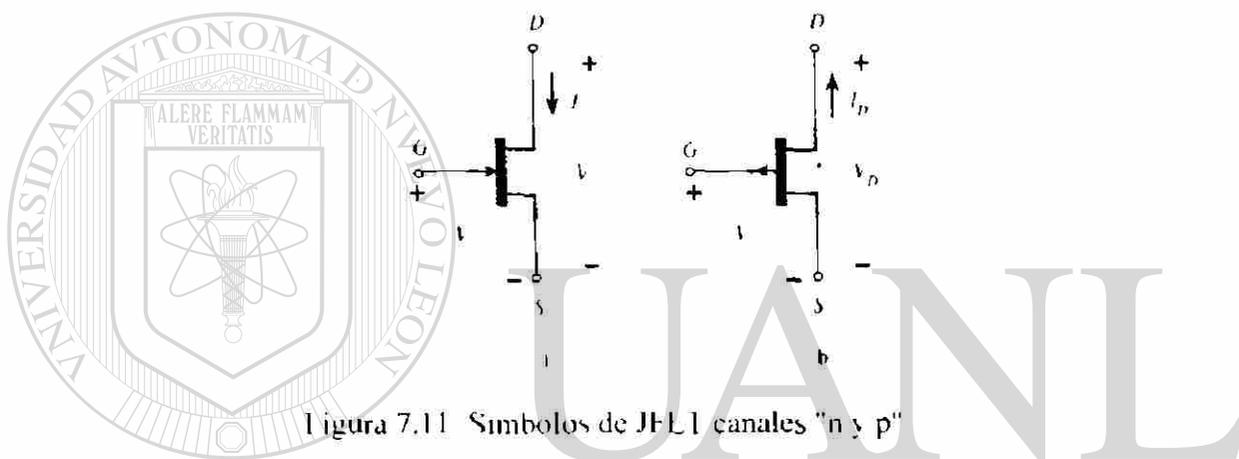


Figura 7.11 Símbolos de JFET canales "n y p"

7.4 CARACTERÍSTICAS DE TRANSFERENCIA

Para el transistor BJT la corriente de salida I_C y la corriente de control I_B fueron relacionadas por beta, esta es considerada como constante para el análisis que fue desarrollado.

En forma de ecuación queda como sigue:

$$I_C = f(I_B) = \beta I_B$$

Variable de control
↓
↑
constante

Existe una relación lineal entre I_C e I_B . Si se duplica el nivel de I_B , la I_C se incrementará también por un factor de 2. Esta relación lineal no existe entre las cantidades de salida y de entrada de un JFET. La relación de I_D y V_{GS} se encuentra definida por la ecuación de Shockley.

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

Variable de control
↓
↑ ↑
constantes

El término cuadrático de la ecuación dará por resultado una relación no lineal entre I_D y V_{GS} produciendo una curva que crece exponencialmente con las magnitudes decrecientes de V_{GS} .

Las características de transferencia definidas por la ecuación de Shockley no resultan afectadas por la red en la cual se utiliza el dispositivo.

Se puede obtener la curva de transferencia utilizando la ecuación de Shockley o a partir de las características de salida de la figura 7.8. En la figura 7.12 se proporcionan dos gráficas con la escala vertical en miliamperes para cada gráfica. Una de ellas relaciona I_D en función de V_{DS} y la otra es la I_D en función de V_{GS} .

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para la aplicación de la ecuación de Shockley se demuestra mejor al examinar unos cuantos niveles específicos de una variable y encontrando el nivel resultante del otro de la siguiente manera:

Sustituyendo $V_{GS} = 0$ V nos da:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{0}{V_p}\right)^2 = I_{DSS} (1 - 0)^2$$

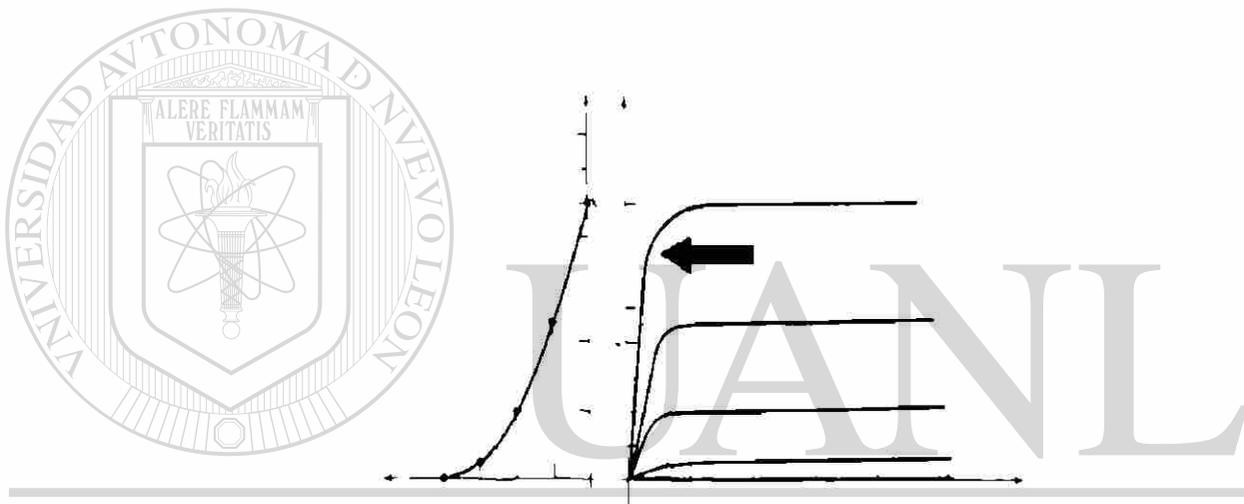
$$I_D = I_{DSS} \text{ a } v_{GS} = 0$$

sustituyendo $V_{GS} = V_p$ nos resulta:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_p}{V_p}\right)^2$$

$$I_D = I_{DSS} (1 - 1)^2 = I_{DSS} (0)$$

$$I_D = 0 \text{ A a } v_{GS} = V_p$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 7.12 Curva de transferencia para las características de drenador
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Para las características de drenador de la figura 7.12 si se sustituye $V_{GS} = -1 \text{ V}$, tenemos:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_p}{V_p}\right)^2$$

$$I_D = 8 \text{ mA} \left(1 - \frac{1 \text{ V}}{4 \text{ V}}\right)^2 = 8 \text{ mA} \left(1 - \frac{1}{4}\right)^2 = 8 \text{ mA} (0.75)^2$$

$$I_D = 8 \text{ mA} (0.5625)$$

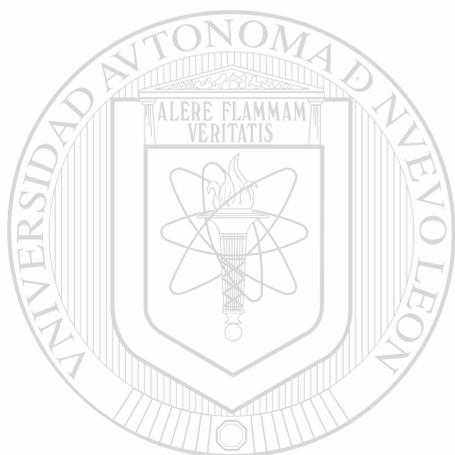
$$I_D = 4.5 \text{ mA}$$

Este resultado es observado en la figura 7.12. Observese muy bien los signos de los voltajes V_{GS} y de V_{DS} . A partir de los valores dados de I_{DSS} y de V_P (como normalmente se proporcionan en las hojas de especificaciones) el nivel de I_D se puede encontrar para cualquier nivel de V_{GS} . Recíprocamente se obtiene una ecuación para el nivel resultante de V_{GS} para un nivel dado de I_D esto es:

$$I = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$I_{DSS} = 4I \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$V_{GS} = -1 \text{ V.}$$



Método manual rápido

Debido a que la curva de transferencia se grafica con mucha frecuencia, existe una ventaja tener un método manual rápido, esto con el objeto de graficar la curva de la manera más eficiente mientras se mantenga un grado aceptable de precisión.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los niveles específicos de V_{GS} darán niveles de I_D que podrán ser memorizados para proporcionar los puntos necesarios con objeto de graficar la curva de transferencia. Si se especifica que V_{GS} sea la mitad del valor de estrechamiento V_P el nivel resultante de I_D será el siguiente:

$$I = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{1}{2} \right)^2 \quad I_D = (0.5) I_{DSS} \quad (0.5)$$

$$I_D = I_{DSS} (0.25)$$

$$I_D = \frac{I_{DSS}}{4} \quad I_D = \frac{I_{DSS}}{2}$$

Esta ecuación no es para un nivel de V_{GS} en particular, sino para cualquier nivel de V_{GS} mientras que $V_{GS} = V_P/2$. Este resultado especifica que la corriente de drenador siempre será una cuarta parte del valor de saturación I_{DSS} , mientras que el voltaje-fuente sea la mitad del valor de estrechamiento.

Si elegimos $I_D = I_{DSS}/2$ al sustituir en la ecuación nos queda:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$I_D = I_{DSS} (0.293)$$

$$I_D = 0.31 \quad I_D = I_{DSS}/2$$

Se pueden determinar puntos adicionales, utilizando cuatro puntos con objeto de trazar la curva de transferencia, a continuación se muestra una tabla para estos puntos:

V_{GS} en función de I_D

V_{GS}	I_D
0	I_{DSS}
$0.3V_P$	$I_{DSS} / 2$
$0.5V_P$	$I_{DSS} / 4$
V_P	0 mA

Tabla 7.1 V_{GS} en función de I_D usando la ecuación de Shockley

Ejemplo 7.1

Trazar la curva definida por $I_{DSS} = 12 \text{ mA}$ y $V_P = -6 \text{ V}$.

Solución:

Los dos puntos de la gráfica están definidos por:

$$I_{DSS} = 12 \text{ mA} \quad \text{y} \quad V_{GS} = 0 \text{ V}$$

$$I_D = 0 \text{ mA} \quad \text{y} \quad V_{GS} = V_P$$

En $V_{GS} = V_P / 2 = -6 \text{ V} / 2 = -3 \text{ V}$, la corriente de drenador está dada por $I_D = I_{DSS} / 4$

$$12 \text{ mA} / 4 = 3 \text{ mA}$$

En $I_D = I_{DSS} / 2 = 12 \text{ mA} / 2 = 6 \text{ mA}$, el voltaje de la compuerta a la fuente se encuentra determinado por $V_{GS} = 0.3 V_P = 0.3 (-6 \text{ V}) = -1.8 \text{ V}$. Los cuatro puntos están bien definidos sobre la figura 7.13 con la curva de transferencia completa.

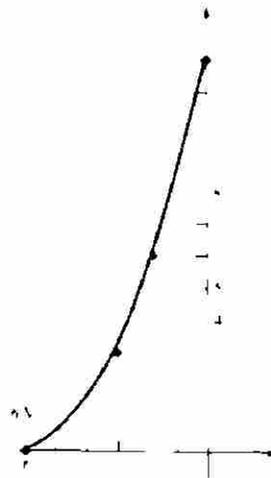


Figura 7.13 Curva de transferencia para el ejemplo 7.1

7.5 MOSFET DE TIPO DECREMENTAL

MOSFET significa transistor de efecto de campo **Metal-Oxido Semiconductor**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Construcción básica

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La construcción básica del MOSFET de tipo decremental de canal-n se muestra en la figura 7.14. Una placa de material tipo-p esta formada a partir de una base de silicio que se le conoce como **substrato**, que es la base sobre la que se construye el dispositivo. En la misma figura se muestra que las terminales de fuente y compuerta estan conectadas por medio de contactos metalicos a las regiones dopadas-n unidas por un canal-n. La compuerta se encuentra conectada tambien a una superficie de contacto metalico, pero permanece aislada del canal-n por medio de una capa muy delgada de dióxido de silicio (SiO_2)

El SiO_2 es un tipo particular de aislante conocido como **dieléctrico** que ocasiona campos electricos opuestos dentro del dielectrico cuando se expone a un campo externamente aplicado. El hecho de que la capa SiO_2 es una capa aislante revela el siguiente hecho:

No existe conexion electrica directa entre la terminal de la compuerta y el canal de un MOSFET, y se debe a la capa aislante de SiO_2 del MOSFET explican la alta impedancia muy deseable de entrada del dispositivo.

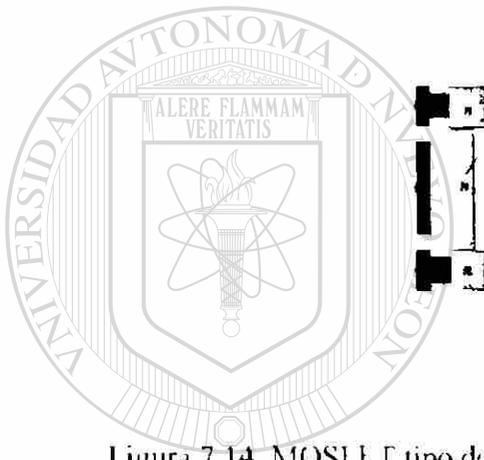


Figura 7.14 MOSFET tipo decremental
Canal-n



Figura 7.15 MOSFET tipo decremental
con $V_{GS} = 0 \text{ V}$ y $V_{DS} \neq 0$

La capa aislante entre la compuerta y el canal ha dado por resultado otro nombre para el dispositivo: FET de compuerta aislada o IG FET (por las siglas en ingles de: Insulated Gate).

Operación básicas y características

En la figura 7.15 el voltaje de compuerta-fuente se hace cero volts mediante la conexion directa de una terminal a la otra y se aplica un voltaje V_{DS} a traves de las terminales de drenador y fuente

El resultado es una atracción, por el potencial positivo del drenador para los electrones libres del canal-n y una corriente similar a aquella establecida a través del canal del JFET, esto es mostrado en la figura 7.16

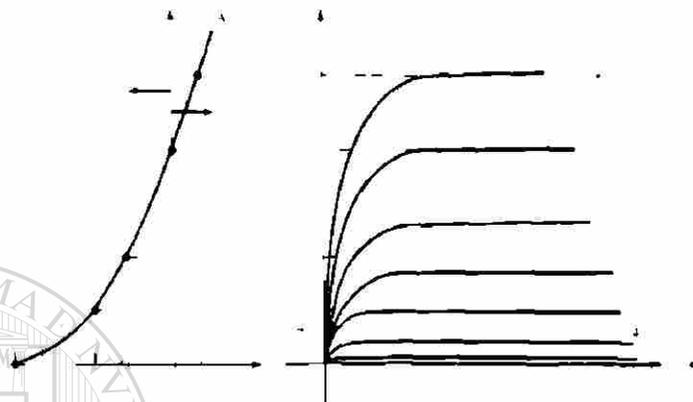


Figura 7.16 Curvas de transferencia para las características de drenaje

En la figura 7.17 V_{GS} tiene un voltaje negativo tal como -1 V. El potencial negativo en la entrada tendera a presionar a los electrones hacia el substrato tipo-p (cargas similares se repelen) y atrae huecos del substrato tipo-p (cargas opuestas se atraen) como se muestra en la figura 7.17. Dependiendo de la magnitud de la polarización negativa que aplica V_{GS} , sucedera un nivel de recombinación entre los electrones y los huecos que redujera el numero de electrones libres disponibles para la conducción en el canal-n. Mientras mas negativa sea la polarización, mas alta sera la tasa de recombinación. El nivel resultante de corriente de drenador es, por tanto, reducida con la polarización negativa creciente de V_{GS} como se muestra en la figura 7.16 para los $V_{GS} = -1$ V, -2 V y así sucesivamente, hasta el nivel de estrechamiento de -6 V. Los niveles resultantes de corriente de drenador y la grafica de la curva de transferencia se conduce exactamente igual a la descrita para el JFET.

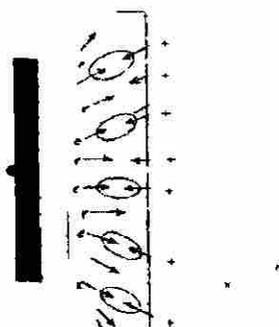


Figura 7.17 Reduccion de portadores libres en el canal por potencial negativo

Para los valores positivos de V_{GS} la entrada positiva atraera electrones adicionales (portadores libres) desde el substrato del tipo-p debido a la corriente de fuga inversa y creara nuevos portadores mediante la colision resultante de las particulas en aceleracion. Mientras el voltaje compuerta-fuente sigue aumentando en la direccion positiva, la figura 7.16 indica que la corriente de drenador se incrementara en forma acelerada debido a las razones anteriores.

La aplicacion de un voltaje positivo de la compuerta a la fuente a "incrementado" el nivel de portadores libres en el canal comparado con aquel encontrado con $V_{GS} = 0$ V. Por esta razon la region de voltajes positivos de la entrada sobre el drenador o las caracteristicas de transferencia es a menudo conocida como la region incremental, con la region entre el nivel de corte y de saturacion de I_{DSS} denominada la region de agotamiento. La ecuacion de Shockley seguira aplicandose al MOSFET de tipo decremental tanto en la region de agotamiento como en la incremental.

Ejemplo 7.2

Trace las caracteristicas de transferencia para un MOSFET del tipo decremental de canal-n con $I_{DSS} = 10$ mA y $V_P = -4$ V

Solución:

$$\text{En } V_{GS} = 0 \text{ V,} \quad I_D = I_{DSS} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = V_f = -4, \quad I_D = 0 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = V_p = 2 = -4 \text{ V} + 2 = 2 \text{ V,} \quad I_D = I_{DSS} \left(\frac{V_{GS} - V_f}{V_p - V_f} \right)^2 = 10 \text{ mA} \left(\frac{2 - (-4)}{2 - (-4)} \right)^2 = 10 \text{ mA}$$

$$I_D = 2.5 \text{ mA}$$

$$\text{en } I_D = I_{DSS} = 2, \quad V_{GS} = 0.3 V_f = 0.3 (-4 \text{ V}) = -1.2 \text{ V}$$

Todas las curvas aparecen en la figura 7.18. Antes de graficar la región positiva de V_{GS} , hay que tomar en cuenta que la I_D aumenta con mucha rapidez con los valores mayores de V_{GS} . Por lo tanto hay que ser cuidadoso en la selección de valores que deben sustituirse en la ecuación de Shockley. Por ejemplo se intentara con un voltaje de +1V positivo en V_{GS} , esto es:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^2$$

$$I_D = 10 \text{ mA} \left(1 + \frac{1 \text{ V}}{2 \text{ V}} \right)^2 = 10 \text{ mA} (1.5625)$$

$$I_D = 15.63 \text{ mA}$$

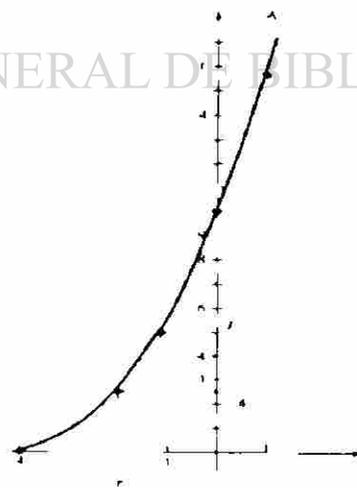


Figura 7.18 Característica de transferencia del MOSFET

MOSFET de tipo decremental de canal p

La construcción de un MOSFET de tipo decremental de canal-p es exactamente el inverso del que aparece en la figura 7.14. Todas las propiedades de los voltajes y las direcciones de las corrientes están invertidas como lo ilustra la figura 7.19

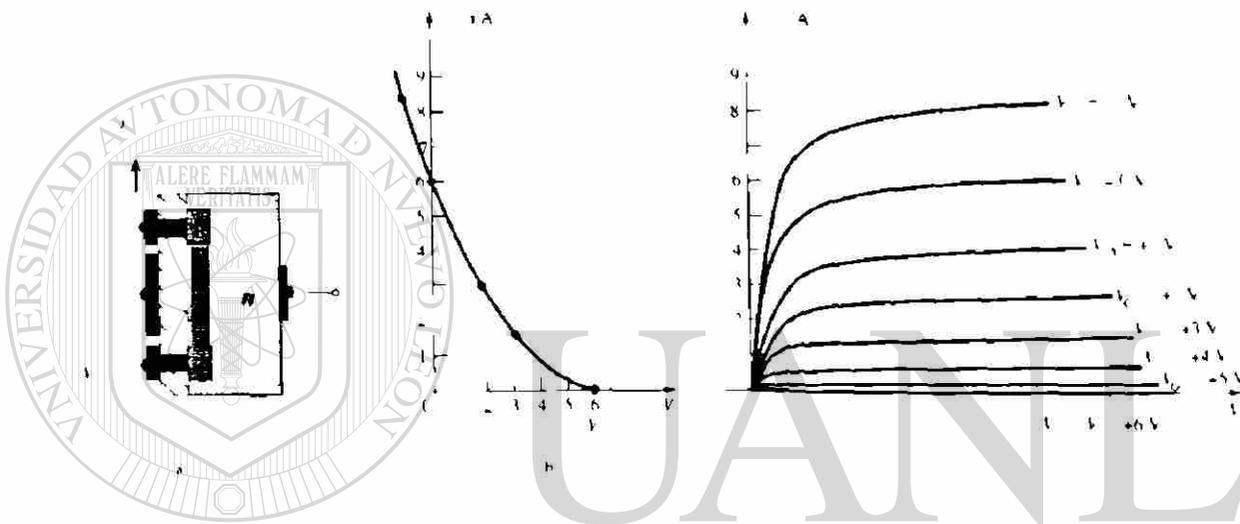


Figura 7.19 MOSFET tipo decremental canal-p

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Símbolos

Los símbolos gráficos para un MOSFET de tipo decremental de canal-n y canal-p se muestran en la figura 7.20. Los símbolos tratan de reflejar la construcción real del dispositivo, la falta de una conexión directa (debido al aislamiento de la entrada) entre la compuerta y el canal está representado por un espacio entre la compuerta y las otras terminales del símbolo. La línea vertical que representa el canal está conectada entre el drenador y la fuente y está soportada por el sustrato

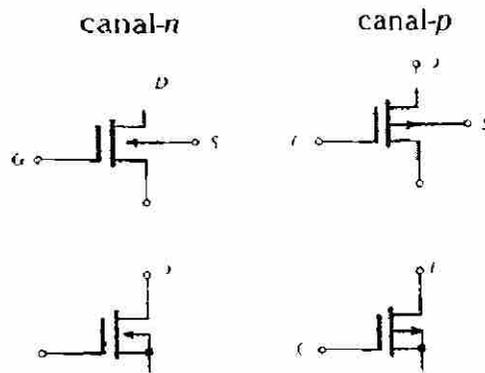


Figura 7.20 Símbolos del MOSFET decremental tipo- n y - p

7.6 MOSFET DE TIPO INCREMENTAL

Las características del MOSFET de tipo incremental son bastante diferentes de cualquier otro que hasta ahora hemos visto. La curva de transferencia no está definida por la ecuación de Shockley, y la corriente de drenador está en corte hasta que el voltaje compuerta-fuente alcance una magnitud específica. El control de corriente en un dispositivo de canal-n ahora resulta afectado por un voltaje compuerta-fuente positivo en lugar del rango de voltajes negativos encontrados para los JFET de canal-n y los MOSFET de tipo decremental de canal-n.

Construcción básica

La construcción básica del MOSFET de tipo incremental de canal-n se muestra en la figura 7.21. Las terminales de la fuente y drenador se conectan una vez más por medio de contactos metálicos a regiones dopadas-n, pero se observa en la figura 7.21

la ausencia de un canal entre las dos regiones dopadas-n. Esta es la diferencia primordial entre la construcción de los MOSFET de tipo decremental y los de tipo incremental. La ausencia de un canal como un componente construido del dispositivo.

La construcción de un MOSFET de tipo incremental es bastante similar a la de un MOSFET de tipo decremental, excepto por la ausencia de un canal entre la terminales de drenador y fuente.

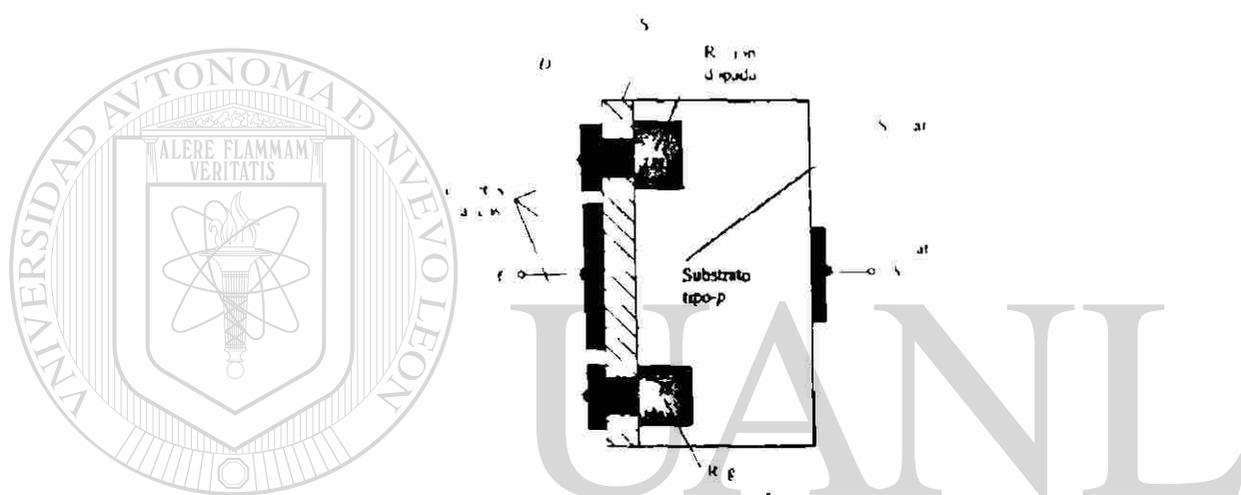


Figura 7.21 MOSFET tipo incremental canal n.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Operación básica y características

En la figura 7.22 tanto V_{DS} como V_{GS} están en algún voltaje positivo mayor de cero volts, estableciendo al drenador y la compuerta a un potencial positivo respecto a la fuente. El potencial positivo en la compuerta presionara los huecos (porque las cargas iguales se repelen) del substrato-p a lo largo del filo de la capa de SiO_2 con objeto de dejar esa area y entrar a regiones mas profundas del substrato-p, como se muestra en la figura. 7.22

El resultado es una región de agotamiento cerca de la capa aislante de SiO_2 sin huecos. Sin embargo, los electrones en el sustrato-p (los portadores minoritarios del material) serán atraídos a la entrada positiva y se acumularán en la región cercana a la superficie de la capa de SiO_2 . La capa de SiO_2 y sus cualidades aislantes evita que los portadores negativos sean absorbidos en la terminal de la compuerta. Mientras V_{GS} aumente en magnitud, la concentración de electrones cerca de la superficie de SiO_2 se incrementará hasta que una región inducida de tipo-n pueda eventualmente soportar un flujo medible entre el drenador y la fuente. El nivel de V_{GS} que resulta en un incremento significativo de la corriente de drenador se le llama: **voltaje de umbral** y se le da el símbolo de V_T (por la sigla en inglés de **Threshold**).

En las hojas de especificaciones se le conoce como $V_{GS(th)}$.

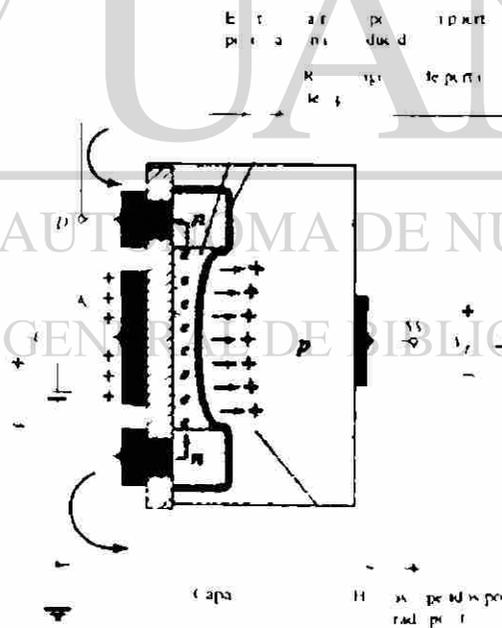


Figura 7.22 Formación del canal en el MOSFET incremental

Cuando V_{GS} se incrementa mas alla del nivel de umbral, la densidad de los portadores libres en el canal inducido se incrementan, dando por resultado un nivel mayor de corriente de drenador. Sin embargo, si se mantiene V_{GS} constante y solo se aumenta el nivel de V_{DS} , la corriente de drenador eventualmente alcanzara un nivel de saturacion asi como ocurrio al JFET y al MOSFET de tipo decremental. La saturacion de I_D se debe a un proceso de estrechamiento descrito por un canal mas angosto al final del drenador del canal inducido, como es mostrado en la figura 7.23

$$V_{DG} = V_{DS} - V_{GS}$$

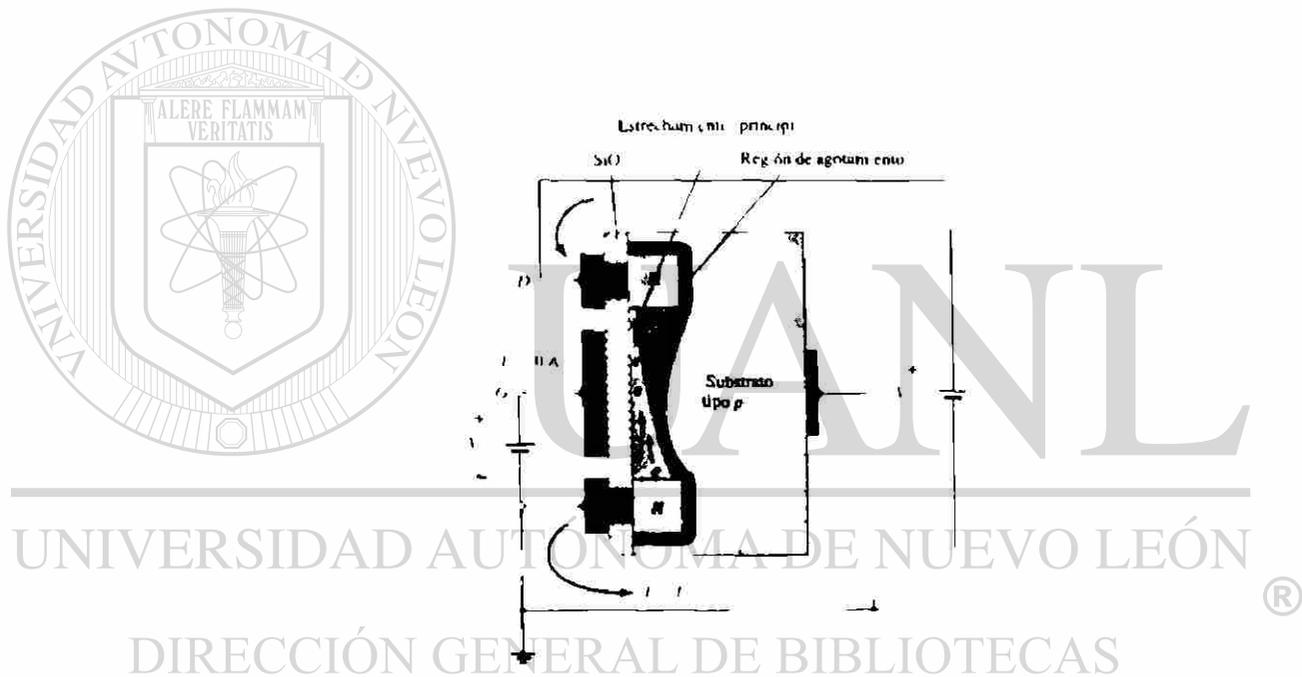


Figura 7.23 Cambio de la region de agotamiento y el canal

Cualquier crecimiento posterior en V_{DS} y en el valor fijo de V_{GS} no afectara el nivel de saturacion de I_D hasta que se encuentren las condiciones de ruptura.

Las características de drenador de la figura 7.24 revelan que para el dispositivo de la figura 7.23 con $V_{GS} = 8$ V, la saturacion ocurrio en un nivel de $V_{DS} = 6$ V. De hecho, el nivel de saturacion para V_{DS} esta relacionado con el nivel de V_{GS} aplicado por:

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

Para los valores de V_{GS} menores que el nivel de umbral, la corriente de drenador de un MOSFET de tipo incremental es de 0 mA

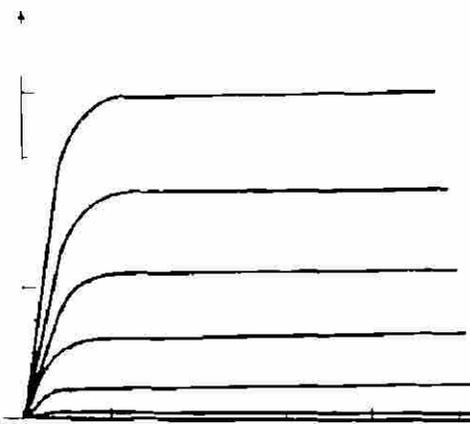


Figura 7.24 Características de drenador

Para los niveles de $V_{GS} > V_T$ la corriente de drenador esta relacionada al voltaje compuerta-fuente aplicado mediante la siguiente relacion no lineal esto es:

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$$

El termino k es una constante que, a su vez, es una funcion de la fabricacion del dispositivo. El valor de k se puede calcular a partir de la siguiente ecuacion:

$$k = \left(\frac{I_D}{(V_{GS} - V_T)^2} \right)$$

sustituyendo la $I_{D(sat)} = 10$ mA donde $V_{GS(sat)} = 8$ V a partir de las características de la figura 7.24 se obtiene:

$$k = \frac{10 \text{ mA}}{(81 - 21)} = \frac{10 \text{ mA}}{(60)} = \frac{10 \text{ mA}}{360}$$

$$k = 0.278 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

una ecuación general para I_D , para las características de la figura 7.24 nos da:

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (V_{GS} - 2 \text{ V})^2$$

Sustituyendo $V_{GS} = 4 \text{ V}$ se encuentra que:

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (4 \text{ V} - 2 \text{ V})^2$$

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (2)^2$$

$$I_D = 0.278 \times 10^{-3} (4)$$

$$I_D = 1.11 \text{ mA}$$

En la figura 7.25 las características de drenador y de transferencia se han colocado lado a lado para describir el proceso de transferencia tanto de una como de la otra. En esencia es exactamente igual al ejemplo que se presentó para el JFET y el MOSFET de tipo decremental. La corriente de drenador es de 0 mA para $V_{GS} = V_T$.

Ahora el dispositivo de canal-n (inducido) está totalmente en la región de V_{GS} positiva y no aumenta hasta que $V_{GS} = V_T$.

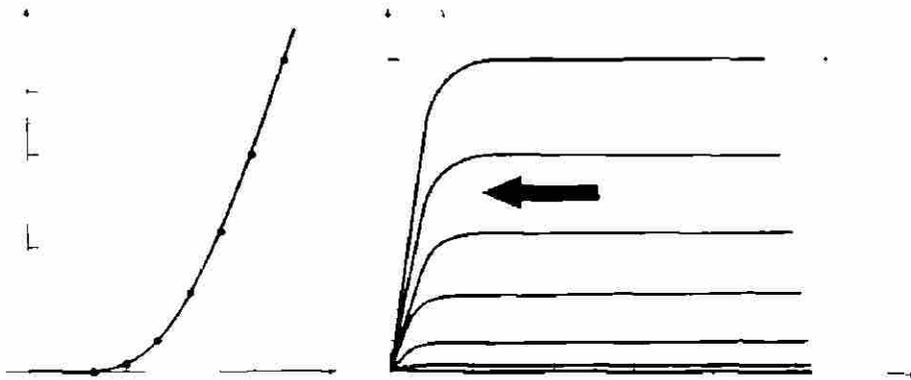


Figura 7.25 Curva de transferencia para características de drenador

MOSFET de tipo incremental de canal-p

La construcción de un MOSFET de tipo incremental de canal-p es exacto al inverso que aparece en la figura 7.21 como se muestra en la figura 7.26. Esto es, ahora existe un sustrato de tipo-n y regiones dopadas-p bajo las conexiones del drenador y de la fuente.

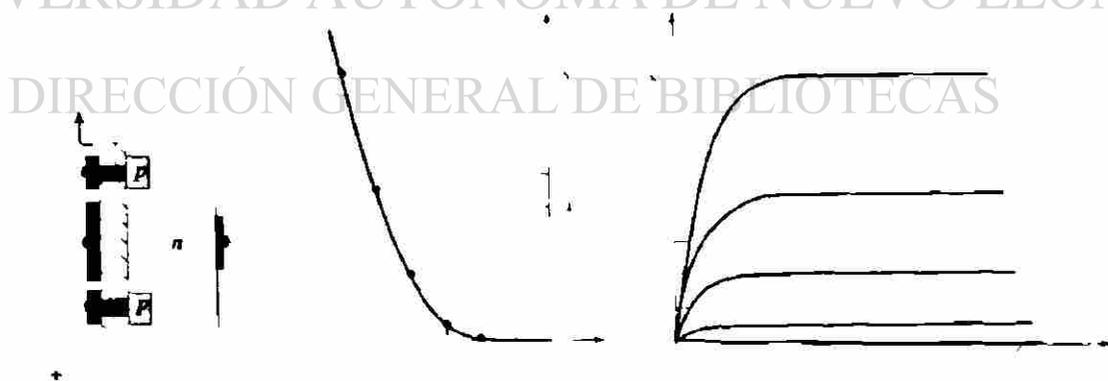


Figura 7.26 MOSFET tipo incremental canal-p

Símbolos

Los símbolos en la figura 7.27 intentan reflejar la construcción real del dispositivo. Se eligió la línea punteada entre el drenador y la fuente para reflejar el hecho de que no existe un canal entre los dos bajo condiciones de no polarización. Esta es la única diferencia entre los símbolos para el MOSFET de tipo decremental y de tipo incremental.

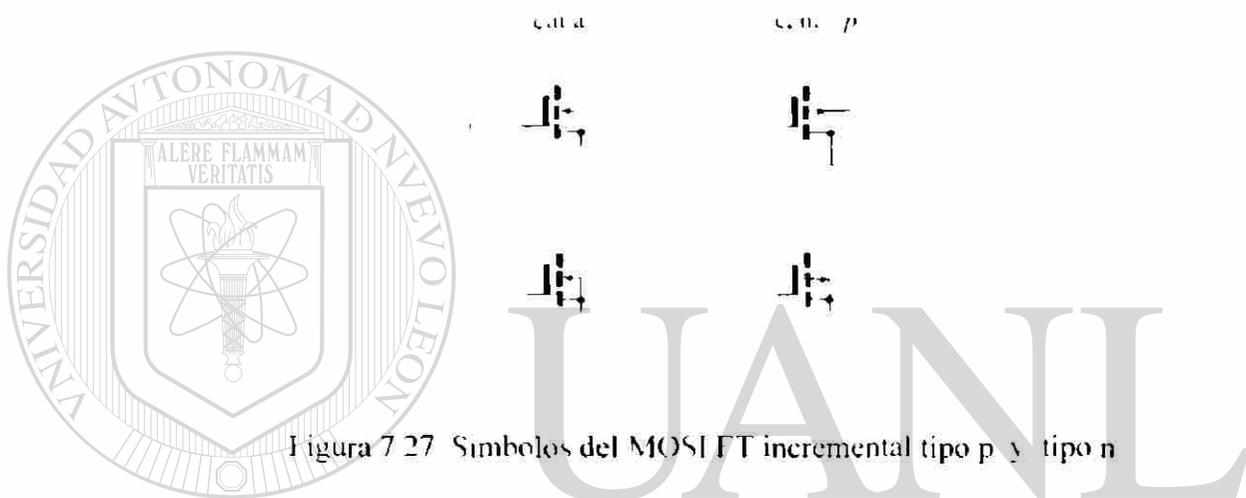


Figura 7.27 Símbolos del MOSFET incremental tipo p y tipo n

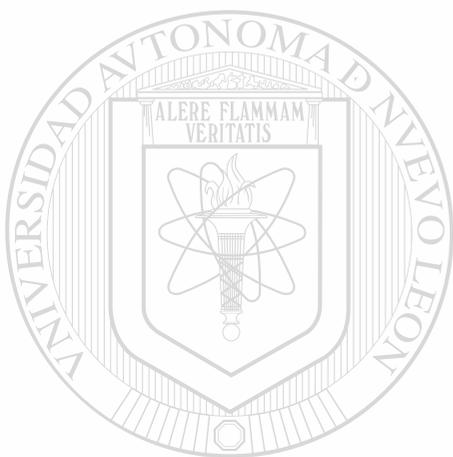
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Manejo del MOSFET

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La delgada capa de SiO₂ que se encuentra situada entre la compuerta y el canal de los MOSFET tiene el efecto positivo de ofrecer una característica de alta impedancia de entrada para el dispositivo, pero por esta capa extremadamente delgada se deben tener precauciones para su manejo. A menudo existe suficiente acumulación de carga estática (la cual se capta de los electrones) que establece una diferencia de potencial a través de la delgada capa, de tal forma que la puede romper y establecer la conducción a través de ella, por tanto, es muy importante que se deje el papel de embarque (o anillo) de corto circuito, porque interconecta las terminales hasta que el dispositivo se va a insertar en el sistema.

Con el anillo la diferencia de potencial se mantiene en 0 V entre dos terminales cualquiera. Por lo menos, siempre se debe hacer tierra para permitir la descarga de la estática acumulada antes de manejar el dispositivo, y siempre levantar el transistor por el encapsulado.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

CAPITULO 8

POLARIZACIONES DEL FET

8.1 INTRODUCCIÓN

Para el transistor de efecto de campo la relación entre las cantidades de entrada y de salida es no lineal debido al término cuadrático en la ecuación de Shockley.

Las relaciones no lineales dan por resultado curvas como las que se obtuvieron para las características de transferencia de un JFET. La relación no lineal entre la I_D y V_{GS} puede complicar el método matemático del análisis de cd de las configuraciones a FET. Una solución gráfica limita las soluciones a una precisión de décimas, pero resulta un método más rápido para la mayoría de los amplificadores.

Las relaciones generales que pueden aplicarse al análisis en cd de todos los amplificadores a FET son:

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

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

Para los MOSFET de tipo incremental se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$I_D = k (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

Todas las ecuaciones anteriores son solo para el dispositivo, estas no cambian con cada configuración red, siempre y cuando el dispositivo se encuentre en la región activa. La solución a los problemas con FET puede determinarse mediante el uso del método matemático o método gráfico.

8.2 CONFIGURACIÓN DE POLARIZACIÓN FIJA

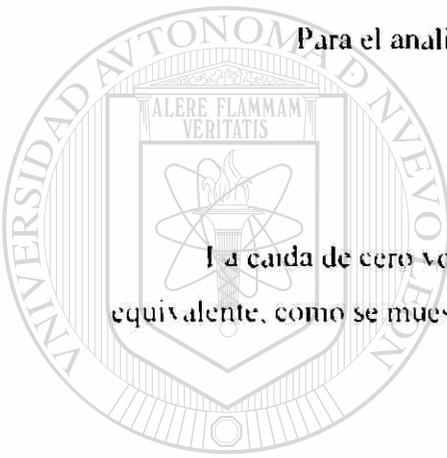
En la figura 8.1 se muestra un arreglo de polarización más simple para el JFET de canal-n, este es llamado configuración de polarización fija. En la misma figura se incluyen los niveles de V_G y V_D y los capacitores de acoplamiento (C_1 y C_2) hay que recordar que los capacitores de acoplamiento son 'circuitos abiertos' para el análisis de corriente directa e impedancias bajas y esencialmente corto-circuitos para el análisis en corriente alterna.

Para el análisis de cd tenemos:

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

$$V_{R_G} = I_G R_G = (0 \text{ A}) R_G = 0 \text{ V}$$

La caída de cero volts a través de R_G permite reemplazar V_G por un corto-circuito equivalente, como se muestra en la figura 8.2



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

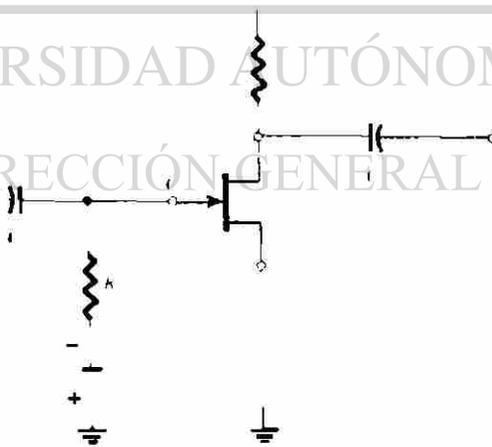


Figura 8.1 Configuración de polarización fija



Figura 8.2 Malla de entrada

La terminal negativa de la batería esta conectada en forma directa al potencial positivo definido V_{CS} refleja bien que la polarización de V_{CS} esta colocada de manera opuesta y directamente a la de V_{GS} . Al aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff en la direccion de las manecillas del reloj en la malla indicada obtenemos:

$$-V_{CC} - V_{CS} = 0 \text{ V}$$

$$V_{CS} = -V_{CC}$$

Debido a que V_{CC} es una fuente fija de corriente directa, el voltaje V_{CS} es de una magnitud fija lo que da por resultado un "configuración de polarización fija".

El voltaje de drenador a la fuente en la seccion de la salida se calcula a partir de la ley de voltajes de Kirchhoff de la siguiente manera:

$$+ V_{DS} - I_D R_D - V_{DD} = 0$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D$$

Los voltajes de un solo subindice se refieren al voltaje en un punto respecto a tierra

$$V_S = 0 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_D = V_{DS} + V_S = V_{DS} + 0 \text{ V}$$

$$V_S = V_{DS}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = V_{GS} + 0 \text{ V}$$

$$V_G = V_{GS}$$

La desventaja que presenta este tipo de polarización es que necesita 2 fuentes de cd y su empleo esta limitado.

Ejemplo 8.1 - Calcular lo siguiente para la red de la figura 8.3

a) V_{DSQ}

b) I_{DQ}

c) V_{DSQ}

d) V_D

e) V_G

f) V_S

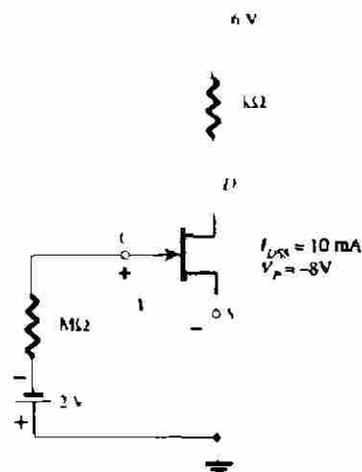


Figura 8.3 Circuito para el ejemplo 8.1

Solución:

Método matemático:

$$a) V_{GSQ} = -V_{GS} = -2 \text{ V}$$

$$b) I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 10 \text{ mA} \left(1 - \frac{-2}{-8} \right)^2 = 2.5 \text{ mA}$$

$$I_{DQ} = 10 \text{ mA} (1 - 0.25)^2 = 10 \text{ mA} (0.75)^2 = 10 \text{ mA} (0.5625)$$

$$I_{DQ} = 5.625 \text{ mA}$$

$$c) V_{DS} = V_{DD} - I_{DQ} R_D = 6 \text{ V} - (5.625 \text{ mA})(2 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{DS} = 4.75 \text{ V}$$

$$d) V_D = V_{DS} = 4.75 \text{ V}$$

$$e) V_G = V_{GS} = -2 \text{ V}$$

$$f) V_S = 0 \text{ V}$$

Método gráfico

La curva de Shockley resultante y la línea vertical en $V_{GS} = -2 \text{ V}$ se proporcionan en la figura 8.4

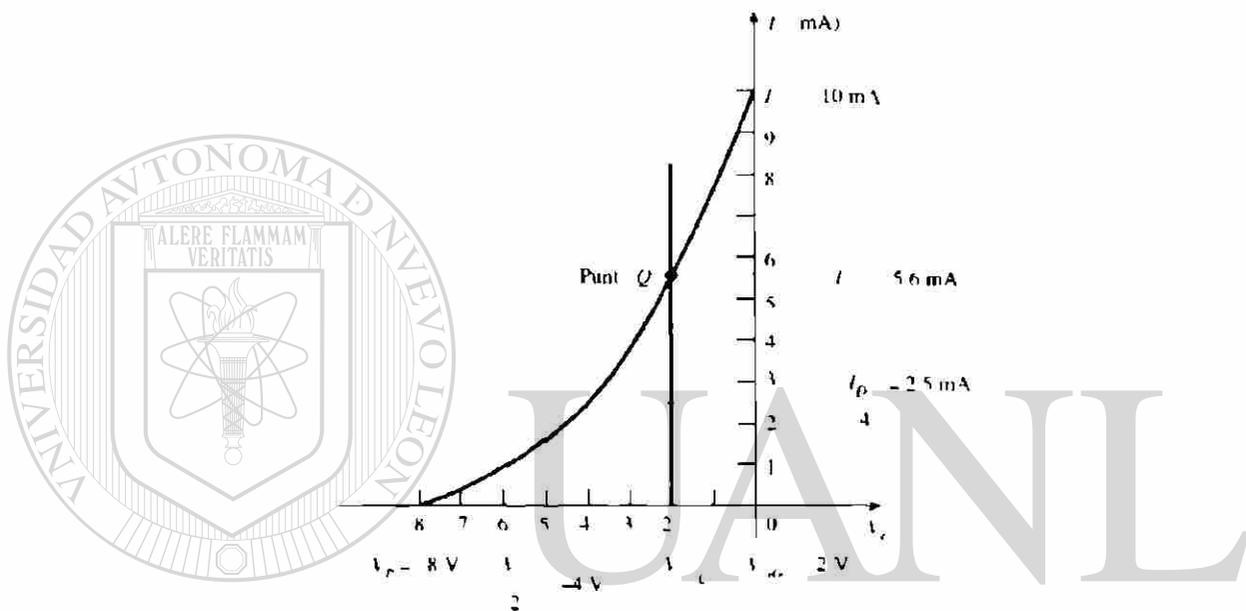
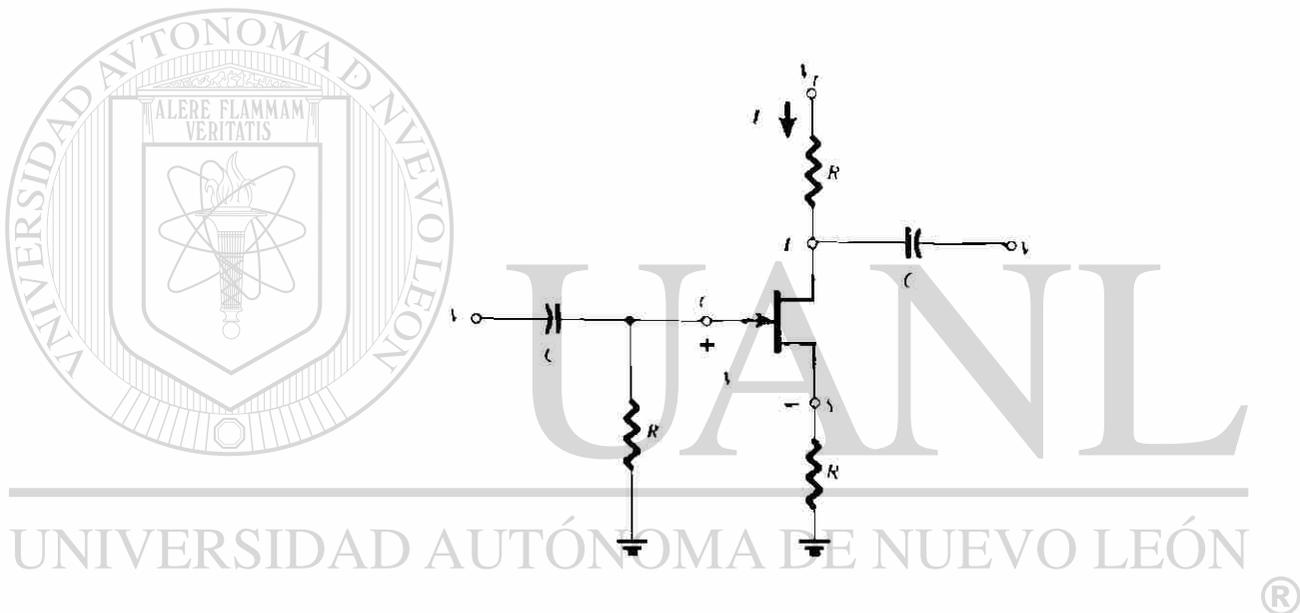


Figura 8.4 Solucion grafica para la figura 8.3

- $V_{GS} = V_{GS} = -2 \text{ V}$
- $I_{D0} = 5.6 \text{ mA}$
- $V_{DS} = V_D - I_D R_D = 16 \text{ V} - (5.6 \text{ mA})(2 \text{ K}\Omega) = 4.8 \text{ V}$
- $V_D = V_{DS} = 4.8 \text{ V}$
- $V_G = V_{GS} = -2 \text{ V}$
- $V_S = 0 \text{ V}$

8.3 CONFIGURACIÓN DE AUTOPOLARIZACIÓN

Este tipo de polarización elimina la necesidad de dos fuentes de corriente directa. El voltaje de control de la compuerta a la fuente ahora lo determina el voltaje a través del resistor R_s , que se conecta en la terminal de la fuente de la configuración como es mostrado en la figura 8.5



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Figura 8.5 Configuración de autopolarización por resistencia en el surtidor

La resistencia R_s se cambia por un corto circuito equivalente dado que $I_G = 0A$

El resultado es la red de la figura 8.6 La corriente a través de R_s es la corriente de la fuente I_s pero la $I_s = I_D$ por lo tanto.

$$V_{R_s} = I_D R_s \quad -V_{G_S} - V_{R_S} = 0 \text{ V} \quad V_{G_S} = -V_{R_S} \quad V_{G_S} = -I_D R_s$$

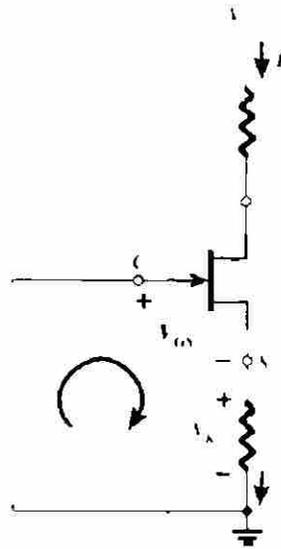


Figura 8.6 Malla de entrada

Una solución matemática mediante la simple sustitución de la ecuación de Shockley

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS0}}\right)^2$$

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{I R}{V_{GS0}}\right)^2$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$I_D = I_{DSS} \left(1 + \frac{I R}{V_{GS0}}\right)^2$$

Al reorganizar los términos se desarrolla una ecuación cuadrática

El método gráfico requiere que primero se establezcan las características de transferencia del dispositivo como se muestra en la figura 8.7. Debido a que la ecuación define una línea recta en la misma gráfica, primero se identifican dos puntos sobre la gráfica que se localizan sobre la línea y simplemente se dibuja una línea recta entre

ambos puntos. La condición más obvia de aplicación es $I_D = 0$ A ya que nos da como resultado $V_{GS} = -I_D R_S = (0 \text{ A}) R_S = 0$ V. Por tanto, para la ecuación se define un punto sobre la línea recta mediante $I_D = 0$ A y $V_{GS} = 0$ V tal y como aparece en la figura 8.7

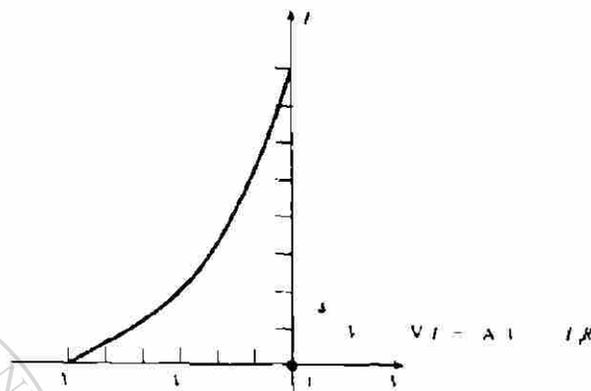


Figura 8.7 Definición de un punto sobre la curva de transferencia

El segundo término de la ecuación requiere de la selección de un nivel de V_{GS} o de I_D y calcular el valor correspondiente de la otra cantidad con la ayuda de la ecuación.

Los niveles resultantes de I_D y de V_{GS} definirán otro punto sobre la línea recta y permitirán un dibujo real de dicha línea, por ejemplo se selecciona un nivel de I_D igual a la mitad del nivel de saturación, esto es:

$$I_D = \frac{I}{2}$$

$$V_{GS} = -I_D R_S = -\frac{I}{2} R$$

El resultado es un segundo punto con el objeto de dibujar la línea recta como se muestra en la figura 8.8 luego se dibuja la línea recta por medio de la ecuación y se obtiene el punto estable en la intersección de la línea recta y la curva característica del dispositivo. Los valores estables de I_D y de V_{GS} pueden determinarse y utilizarse para encontrar las otras cantidades de interés.

Puede calcularse el valor de V_{DS} al aplicar la ley de voltajes de Kirchhoff al circuito de salida esto nos da como resultado

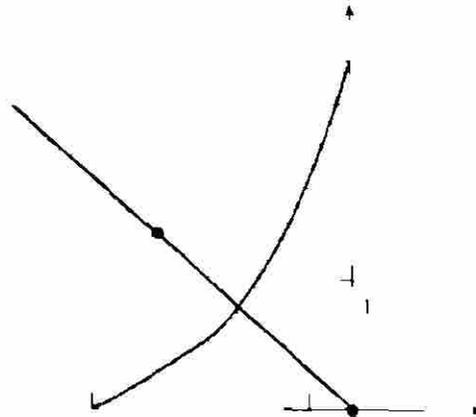


Figura 8.8 Trazo de la recta de autopolarización

$$V_{RS} + V_{DS} + V_{RD} - V_{DD} = 0$$

$$V_{DS} = V_{DD} - V_{RS} - V_{RD} = V_{DD} - I_D R_S - I_D R_D$$

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

$$V_S = I_D R_S$$

$$V_G = 0 \text{ V}$$

$$V_D = V_{DS} + V_S = V_{DD} - V_{RD}$$

Ejemplo 8.2 - Calcular los siguientes incisos para la figura 8.9

a) V_{GS}

b) I_{DQ}

c) V_{DS}

d) V_S

e) V_G

f) V_D

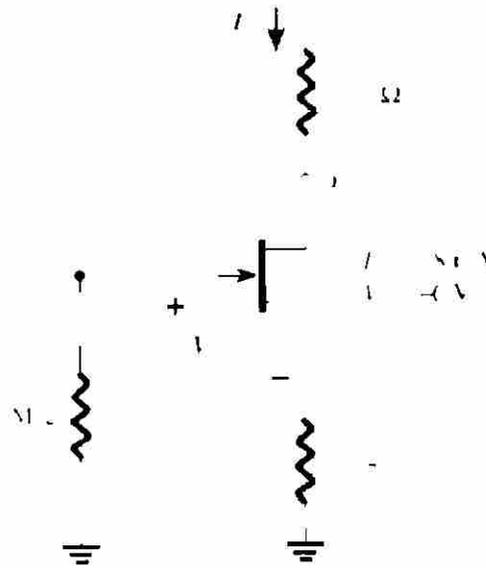


Figura 8.9 Circuito para el ejemplo 8.2

Solución:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

a) El voltaje compuerta-fuente se determina por:

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$V_{GS} = -I_D R_s$$

Si se elige $I_D = 4\text{ mA}$ se obtiene:

$$V_{GS} = -(4\text{ mA})(1\text{ k}\Omega) = -4\text{ V}$$

El resultado es la grafica de la figura 8.10 como se definió mediante la red.

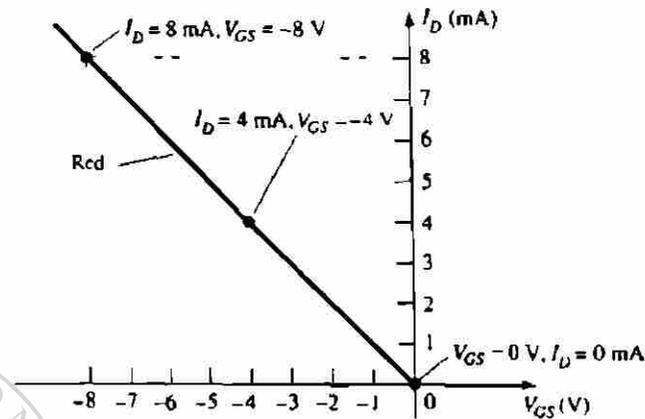


Figura 8.10 Trazo de la recta para la figura 8.9

En caso de elegir $I_D = 8 \text{ mA}$, el valor de V_{GS} resultante sería de -8 V , como se muestra en la misma grafica. En cualquier caso se obtendría la misma línea recta, demostrando que puede seleccionarse cualquier valor adecuado de I_D siempre y cuando se utilice el valor determinado por V_{GS} . Además debe tenerse en cuenta que puede seleccionarse el valor de V_{GS} y calcular el valor de I_D para obtenerse el mismo resultado. [®]

Si se selecciona $V_{GS} = V_{GS} = -3 \text{ V}$ para la ecuación de Shockley, se tiene que $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2 = 8 \text{ mA} \left(1 - \frac{-3}{-4}\right)^2 = 2 \text{ mA}$ y resultaría la grafica de la figura 8.11 la cual representa los valores máximos del dispositivo. La solución se encuentra al sobreponer las características de la red definidas mediante la figura 8.10 sobre las características del dispositivo de la figura 8.11 y encontrando el punto de intersección de ambas como se indica en la figura 8.12. El punto de operación resultante está en un valor de voltaje compuerta-fuente estable de.

$$V_{GSQ} = -2.6 \text{ V}$$

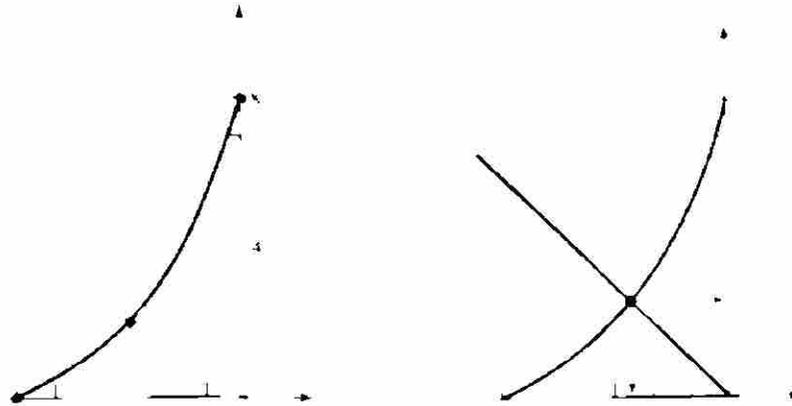


Figura 8.11 Características para el JFET de la figura 8.9

Figura 8.12 Punto "Q" para la figura 8.9

b) En el punto estable:

$$I_{DQ} = 2.6 \text{ mA}$$

c) $V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_S + R_D)$

$$V_{DS} = 20\text{V} - (2.6\text{mA})(1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega)$$

$$V_{DS} = 20\text{V} - 11.18\text{V}$$

$$V_{DS} = 8.82 \text{ V}$$

d) $V_S = I R_S$

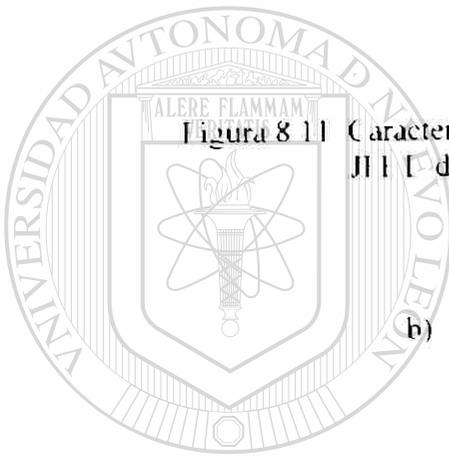
$$V_S = (2.6 \text{ mA})(1 \text{ k}\Omega)$$

$$V_S = 2.6 \text{ V}$$

e) $V_G = 0\text{V}$

f) $V_D = V_{DS} + V_S = 8.82\text{V} + 2.6 \text{ V} = 11.42\text{V}$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 20 \text{ V} - (2.6 \text{ mA})(3.3 \text{ k}\Omega) = 11.42 \text{ V}$$



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



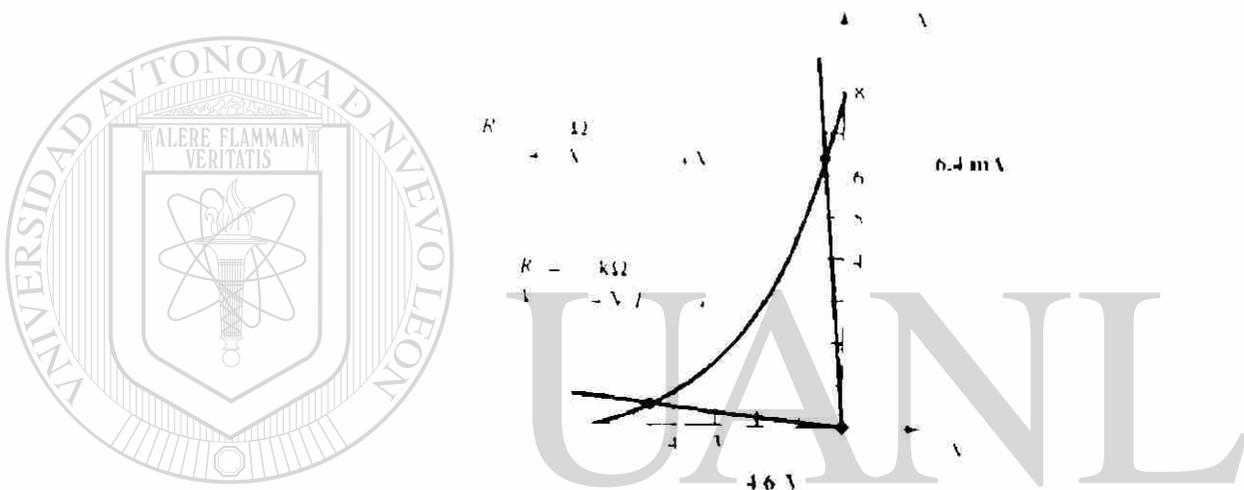
Ejemplo 8.3 Encontrar el punto de operación para la red de la figura 8.9 si:

a) $R_s = 100\Omega$

b) $R_s = 10K\Omega$

Solución:

Observese la figura 8.13



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Figura 8.13 Grafica del ejemplo 8.3

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

a) En el eje de I_D

$$I_D = 6.4 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = -0.64 \text{ mV}$$

b) En el eje de V_{GS}

$$V_{GS} = -4.6 \text{ mV}$$

$$I = 0.46 \text{ mA}$$

Podemos observar como los niveles mas bajos de R_s acercan la recta de carga de la red hacia el eje I mientras que los niveles mas altos de R_s acercan la recta de carga de la red hacia el eje V_{GS} .

Ejemplo 8.4 Determine lo siguiente para la configuracion de compuerta comun de la figura 8.14

a) V_{GS}

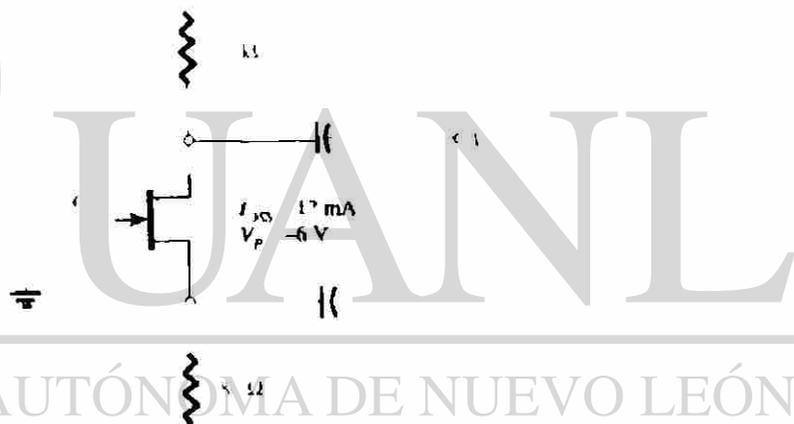
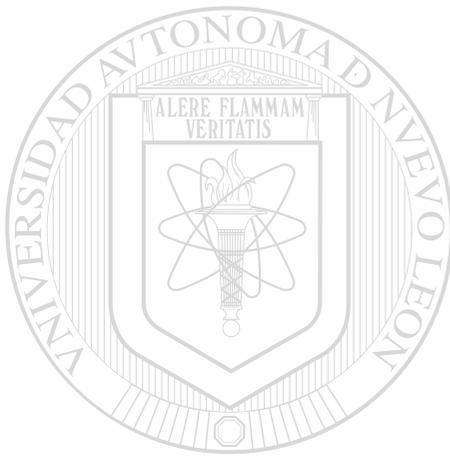
b) I_{DQ}

c) V_D

d) V_G

e) V_s

f) V_{DS}



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Figura 8.14 Circuito del ejemplo 8.4

Solución:

En la figura 8.15 la terminal de la compuerta conectada a tierra y la ubicacion de la entrada establecen fuertes similitudes con el amplificador a BJT de base comun. Aunque es diferente en apariencia, en relacion con la estructura basica, la red posee la misma estructura basica. Por tanto, puede proceder el analisis en cd de la misma forma que en los ejemplos anteriores.

Las características de transferencia y la recta de carga aparecen en la figura 8.16. En este caso se determino el segundo punto para el trazo de la recta de carga seleccionando (en forma arbitraria) $I_D = 6 \text{ mA}$ y resolviendo para V_{GS} esto es:

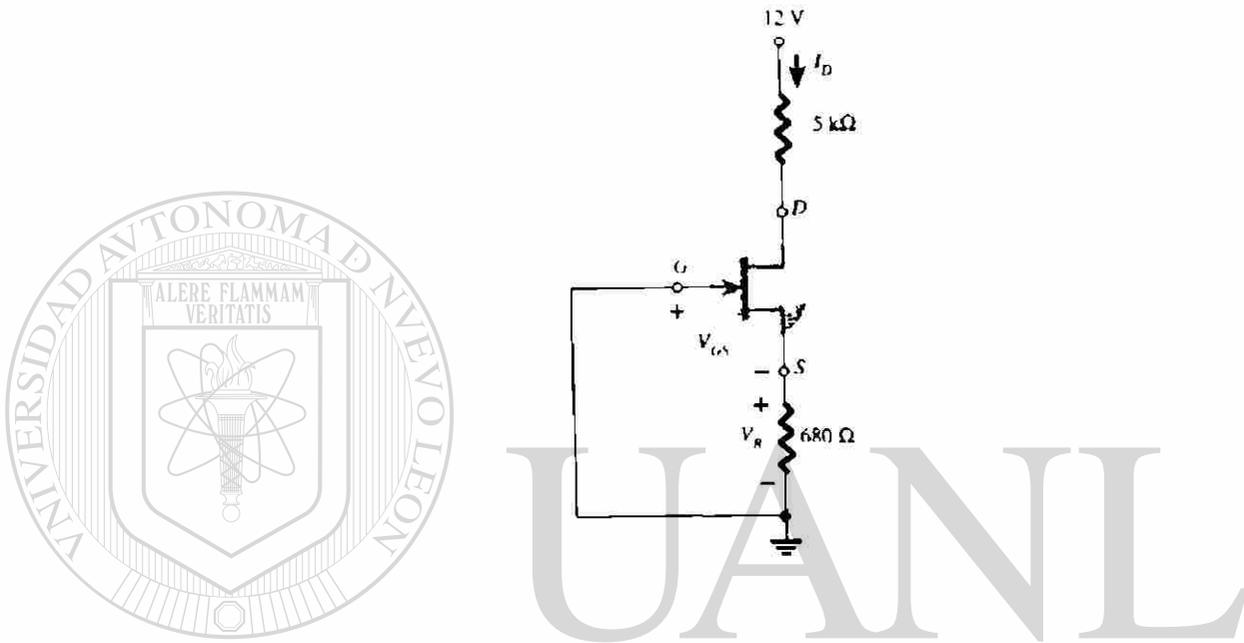


Figura 8.15 Circuito equivalente de la figura 8.14

$$V_{GS} = I_D R_s = (6 \text{ mA})(680 \Omega) = -4.08 \text{ V}$$

como se muestra en la figura 8.16 La curva de transferencia de dispositivo se trazo usando:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

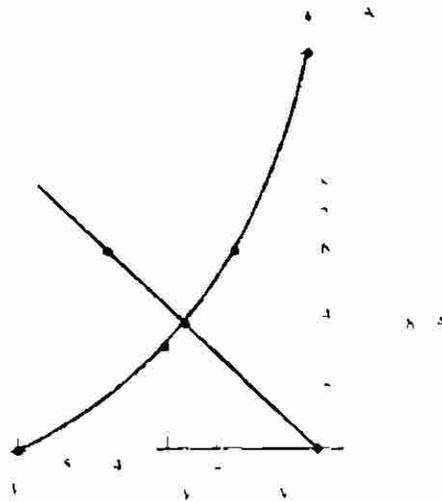


Figura 8.16 Punto "Q" para la figura 8.14

Para el valor de V_{GS} ,

$$V_{GS} = \frac{I_D}{2} \left(\frac{6I_D}{2} + 3I_D \right)$$

de la figura 6.19 se obtienen los siguientes puntos de operación:

b) $V_{GSQ} = -2.6 \text{ V}$

$$I_{DQ} = 3.8 \text{ mA}$$

b) $V_D = V_{DD} - I_D R_D$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS $V_D = 12 \text{ V} - (3.8 \text{ mA})(1.5 \text{ k}\Omega)$

$$V_D = 6.3 \text{ V}$$

c) $V_S = 0 \text{ V}$

d) $V_S = I_D R_S = (3.8 \text{ mA})(680 \Omega)$

$$V_S = 2.58 \text{ V}$$

f) $V_{DS} = V_D - V_S$

$$V_{DS} = 6.3 \text{ V} - 2.58 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 3.72 \text{ V}$$

8.4 POLARIZACIÓN MEDIANTE DIVISOR DE VOLTAJE

Este tipo de polarización aparece en la figura 8.17. Para los amplificadores FET la $I_G = 0$ A. Para el análisis de corriente directa se redibuja la red de la figura 8.17 como se muestra en la figura 8.18 vemos que todos los capacitores, incluyendo el capacitor de desvío C_s , han sido reemplazados por un "circuito abierto" equivalente. Además, se separa la fuente V_{DD} en dos fuentes equivalentes esto con el objeto de permitir una separación mayor de las regiones de entrada y la salida de la red. Debido a que $I_G = 0$ A, la ley de corriente de Kirchhoff requiere que $I_R = I_D$. El voltaje V_C es igual al voltaje a través de R_s , puede encontrarse si se utiliza la regla del divisor de voltaje esto es,

$$V_C = \frac{V_{DD} R_s}{R_s + R_s}$$

Si aplicamos la ley de voltaje de Kirchhoff en el sentido de las manecillas del reloj obtenemos:

$$V_G - V_{GS} - V_{RS} = 0$$

$$V_{GS} = V_G - V_{RS}$$

sustituyendo $V_{RS} = I_D R_s = I_D R_s$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_s$$

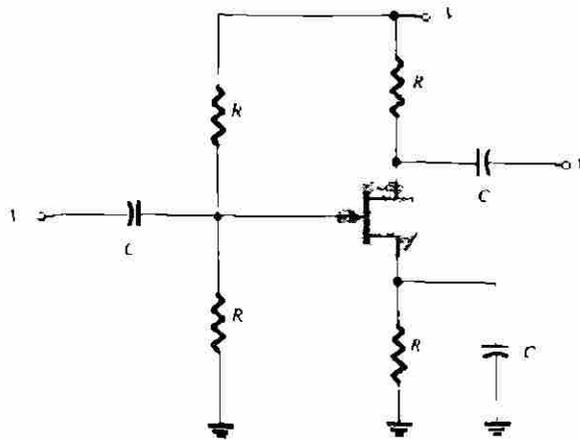


Figura 8.17 Polarización por divisor de voltaje

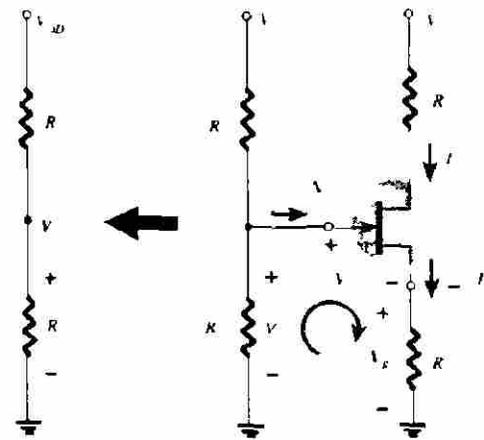


Figura 8.18 Redibujo de la figura 8.17

El resultado es una ecuación que todavía incluye las mismas dos variables que aparecen en la ecuación de Shockley: V_{GS} e I_D . Las cantidades V_G y R_S están fijas por la construcción de la red.

En cualquier punto a lo largo del eje horizontal de la figura 8.19 la corriente $I_D = 0 \text{ mA}$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$V_{GS} = V_G - (0 \text{ mA}) R_S$$

$$V_{GS} = V_G = V_G$$

El resultado especifica que siempre que se grafique la ecuación, en caso de haber seleccionado $I_D = 0 \text{ mA}$, el valor de V_{GS} para el dibujo será de V_G volts. Este punto aparece en la figura 8.19

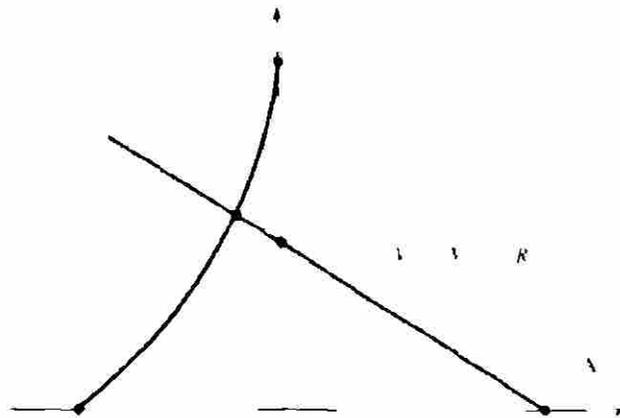


Figura 8.19 Trazo de la ecuación de la red por divisor de voltaje

Para el otro punto se utiliza el hecho de que en cualquier punto sobre el eje vertical $V_{GS} = 0$ V, y se resuelve para el valor calculado de I_D

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S$$

$$0 \text{ V} = V_G - I_D R_S$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los dos puntos definidos anteriormente permiten dibujar una línea recta con el objeto de representar la ecuación. La intersección de la línea recta con la curva de transferencia en la región a la izquierda del eje vertical definirá el punto de operación y los niveles correspondientes de I_D y de V_{GS} .

Debido a que la intersección sobre el eje vertical se calcula mediante $I_D = V_G / R_S$ y V_G está fijo debido a la red de entrada, los valores mayores de R_S reducirán el nivel de la intersección I_D , como se muestra en la figura 8.20.

Cuando aumentan los valores de R_S dan por resultado valores menores estables de I_D así como valores más negativos de V_{GS} .

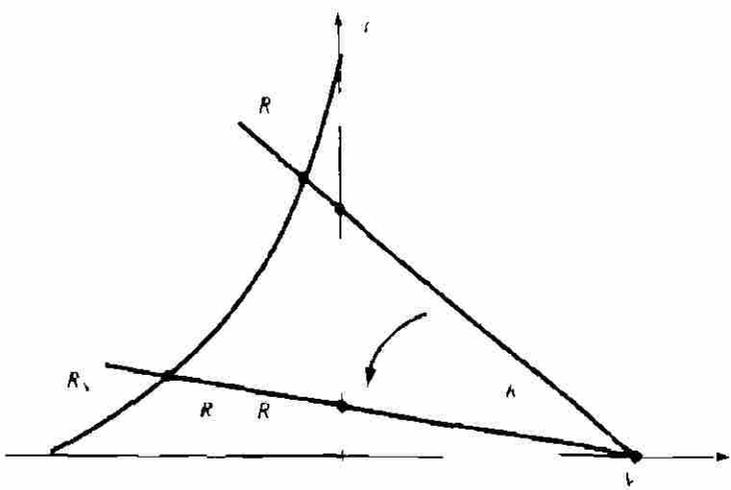


Figura 8.20 Tecto de R_L sobre el punto Q

Una vez calculados los valores estables de I_{D0} y de $V_{C_{S0}}$ el análisis restante se desarrolla facilmente, esto es :

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

$$V_D = V_{D0} - I_D R_D$$

$$V_S = I_D R_S$$

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

Ejemplo 8.5 Determinar los siguientes incisos para la red de la figura 8.21

- a) I_{D0} y $V_{C_{S0}}$
- b) V_D
- c) V_S
- d) V_{DS}
- e) V_x

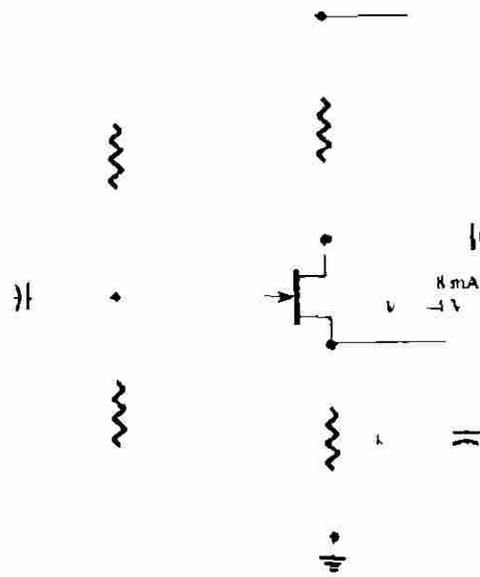


Figura 8.21 Circuito para el ejemplo 8.5

Solucion:

Para las características de transferencia, si $I_D = I_{SS} = 8\text{mA} = 2\text{mA}$ entonces $V_{GS} = V_P = -4\text{V} = -2\text{V}$. La curva resultante que representa la ecuación de Shockley aparece en la figura 8.22.

$$V_G = \frac{V \cdot R}{R + R}$$

$$V = \frac{(16\text{V})(270\text{k}\Omega)}{21\text{M}\Omega + 0.27\text{M}\Omega}$$

$$V = 1.82\text{V}$$

$$V_{GS} = V - I_D R_s$$

$$V_{GS} = 1.82\text{V} - I_D (1.5\text{k}\Omega)$$

Cuando la $I_D = 0\text{mA}$ tenemos:

$$V_{GS} = 1.82\text{V}$$

Cuando el $V_{GS} = 0 \text{ V}$, tenemos:

$$I_D = \frac{1.82 \text{ V}}{1.5 \text{ k}\Omega} = 1.21 \text{ mA}$$

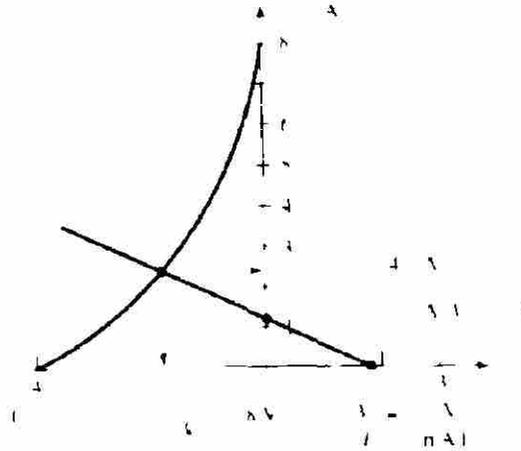


Figura 8.22 Punto Q para la figura 8.21

La recta de polarización que se obtuvo aparece en la figura 8.22 con los valores del punto de operación los cuales son:

$$I_{DQ} = 2.4 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -1.8 \text{ V}$$

$$b) \quad V_D = V_{DD} - I_D R_S$$

$$V_D = 16 \text{ V} - (2.4 \text{ mA})(2.4 \text{ k}\Omega)$$

$$V_D = 10.24 \text{ V}$$

$$c) \quad V_S = I_D R_S = (2.4 \text{ mA})(1.5 \text{ k}\Omega)$$

$$V_S = 3.6 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
 \text{d)} \quad V_s &= V_{D1} + I_D (R_D + R_S) \\
 V_s &= 16\text{V} + (2.4\text{mA})(2.4\text{k}\Omega + 1.5\text{k}\Omega) \\
 V_s &= 6.64\text{V} \\
 \text{e)} \quad V_{IX} &= V_D - V_{GS} \\
 V_{IX} &= 10.24\text{V} - 1.82\text{V} \\
 V_{IX} &= 8.42\text{V}
 \end{aligned}$$

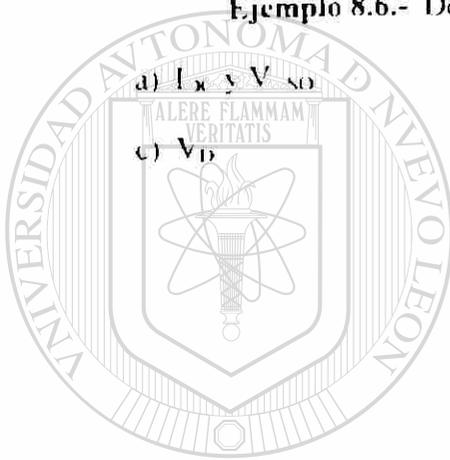
Ejemplo 8.6.- Determinar los siguientes incisos para la red de la figura 8.23

a) I_{D1} y V_{GS1}

b) V_{DS}

c) V_{D1}

d) V_{S1}



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

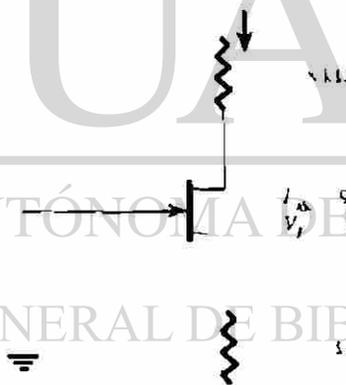


Figura 8.23 Circuito para el ejemplo 8.6

Solución:

- a) Se obtiene una ecuación para V_{GS} en términos de I_D al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff a la sección de entrada a la red como es redibujada en la figura 8.24

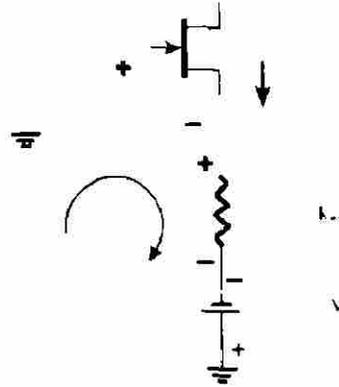


Figura 8.24 Red redibujada de la figura 8.23

$$-V_{GS} - I_S R_S + V_{SS} = 0$$

$$V_{GS} = V_{SS} - I_S R_S$$

$$V_{GS} = V_{SS} - I_D R_S$$

El resultado es una ecuación muy similar en su formato a la ecuación que puede superponerse a las características de transferencia.

$$V_{GS} = 10\text{V} - I_D (1.5\text{k}\Omega)$$

Para $I_D = 0\text{ mA}$

$$V_{GS} = V_{SS} = 10\text{ V}$$

Para $V_{GS} = 0\text{ V}$

$$0 = 10\text{ V} - I_D (1.5\text{ k}\Omega)$$

$$I_D = \frac{10\text{ V}}{1.5\text{ k}\Omega} = 6.67\text{ mA}$$

Los puntos que se obtienen para la gráfica se muestran en la figura 8.25

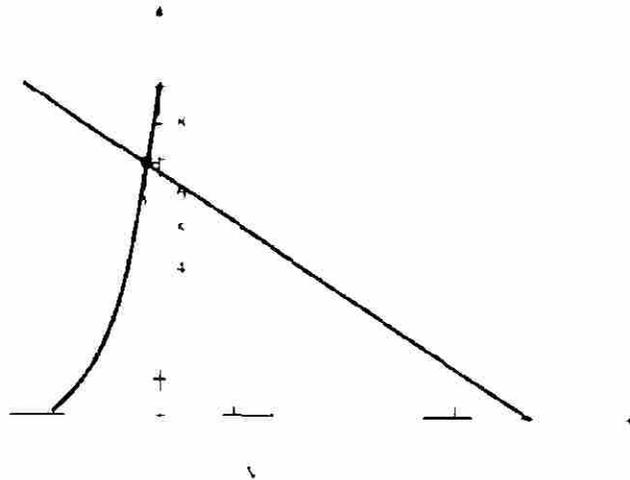


Figura 8.25 Determinación del punto Q Para la figura 8.23

Se graficaron las características de transferencia utilizando el punto de la grafica establecido por: $V_{GS} = V_P = -3V = -1.5V$

$$I_D = I_{DSS} = 9mA = 2.25mA$$

El punto de operación establece los siguientes niveles de estabilidad:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
 $I_{DQ} = 6.9mA$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
 $V_{DSQ} = -0.35V$

- b) Al aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff en la malla de salida de la figura 8.23 se obtiene .

$$-V_{SS} + I_S R_S + V_{DS} + I_D R_D - V_{DD} = 0$$

sustituyendo $I_S = I_D$ y reorganizando los terminos se obtiene:

$$V_{DS} = V_{DD} + V_{SS} - I_D (R_D + R_S)$$

$$V_{DS} = 20V + 10V - (6.9mA)(1.8k\Omega + 1.5k\Omega)$$

$$V_{DS} = 30V - 22.77V$$

$$V_{DS} = 7.23V$$

$$c) \quad V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_D = 20V - (6.9mA)(1.8k\Omega) = 20V - 12.42V$$

$$V_D = 7.58V$$

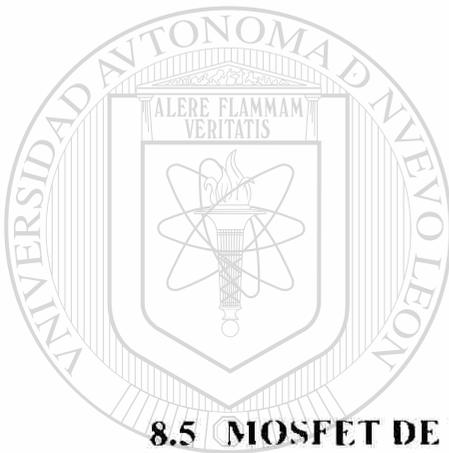
$$d) \quad V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_S = V_D - V_{DS}$$

$$V_S = 7.58V - 7.23V$$

$$V_S = 0.35V$$



8.5 MOSFET DE TIPO DECREMENTAL

Las similitudes que hay en la apariencia entre las curvas de transferencia de los BJT y de los MOSFET de tipo decremental permiten un análisis similar de cada uno para cd. La diferencia más importante entre los dos es el hecho de que el MOSFET de tipo decremental permite puntos de operación con valores positivos de V_{GS} y niveles de I_D que exceden el I_{DSS} .

Ejemplo 8.7 Para el MOSFET de tipo decremental de canal-n de la figura 8.26 determinar lo siguiente:

a) I_D y V_{SD}

b) V_{GS}

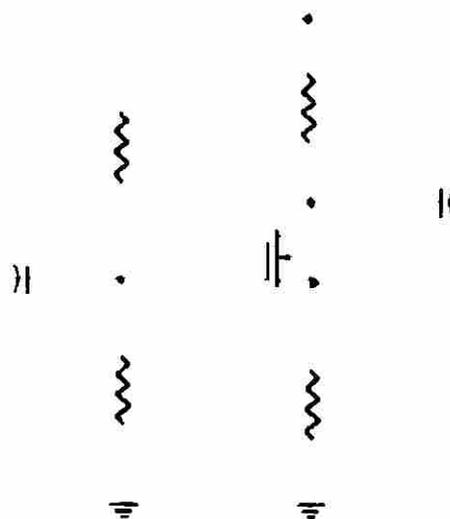


Figura 8.26 Circuito para el ejemplo 8.7

Solución:

a) Para las características de transferencia se define un punto en la gráfica de I_D

$$I_{DSS} = 4 \text{ mA} \quad \mu = 4 \quad V_{GS} = -1.5 \text{ V}$$

$$V_{GS} = V_{P2} = -3 \text{ V} \quad -1.5 \text{ V}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Al considerar el nivel de V_{GS} y el hecho de que la ecuación de Shockley define una curva que se eleva con mayor rapidez a medida que V_{GS} se hace más positivo, se detalla un punto de la gráfica en $V_{GS} = +1 \text{ V}$, esto es,

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$I_D = 4 \text{ mA} \left(1 - \frac{+1 \text{ V}}{-3 \text{ V}} \right)^2 = 6 \text{ mA} \left(1 + \frac{1}{3} \right)^2$$

$$I_D = 10.67 \text{ mA}$$

La curva de transferencia que resulto aparece en la figura 8.27

$$V_G = \frac{18V(10M\Omega)}{10M\Omega + 110M\Omega} = 1.5V$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_s$$

$$V_{GS} = 1.5V - I_D (750 \Omega)$$

Haciendo que la $I_D = 0m A$, obtenemos:

$$V_{GS} = V_G = 1.5V$$

Haciendo que el $V_{GS} = 0V$, obtenemos:

$$I_D = \frac{V_G - V_{GS}}{R_s} = \frac{1.5V - 0V}{750\Omega} = 2mA$$

En la figura 8.27 aparecen tanto los puntos de la grafica como la recta de polarización obtenida, el punto de operacion resultante es :

$$I_D = 3.1mA$$

$$V_{GS} = -0.8V$$

$$b) V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_s)$$

$$V_{DS} = 18V - (3.1mA)(1.8k\Omega + 750 \Omega)$$

$$V_{DS} = 10.1V$$

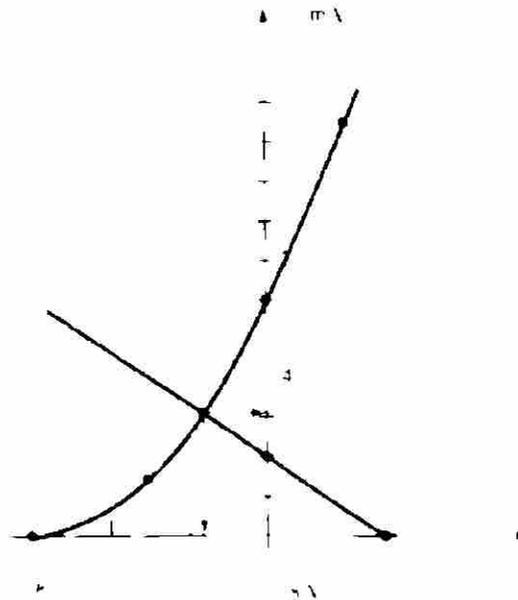
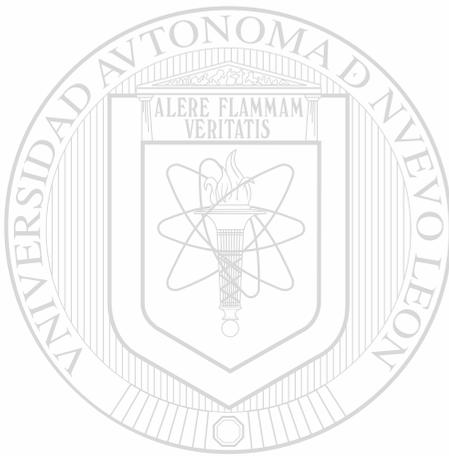


Figura 8.27 Cálculo del punto Q para la figura 8.26



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Ejemplo 8.8 En este ejemplo repetir el anterior con una $R_s = 150 \Omega$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Solución:

- a) Los puntos de la gráfica son los mismos de la curva de transferencia como se muestra en la figura 8.28.

$$V_{GS} = V_c - I_D R_s$$

$$V_{GS} = 1.5V - I_D (150 \Omega)$$

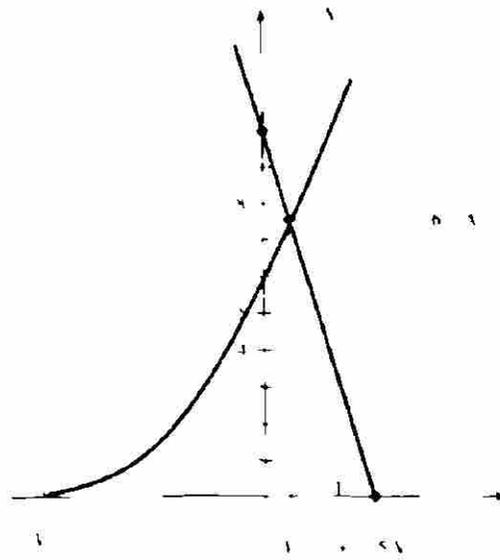


Figura 8.28 Gráfica para el ejemplo 8.8

haciendo que la $I_D = 0 \text{ mA}$ se obtiene:

$$V_{DS} = 15 \text{ V}$$

haciendo que el $V_{DS} = 0 \text{ V}$ se obtiene:

$$I_D = \frac{V_{DS} - 15 \text{ V}}{R_S} = \frac{0 - 15 \text{ V}}{150 \Omega} = -10 \text{ mA}$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

La recta de polarización está incluida en la figura 8.28 en este caso se observa que el punto de operación da por resultado una corriente de drenador que excede el valor de I_{DSS} con un valor positivo de V_{DS} . El resultado será

$$I_D = 7.6 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = +0.35 \text{ V}$$

$$b) \quad V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

$$V_{DS} = 18 \text{ V} - (7.6 \text{ mA})(8 \text{ k}\Omega + 150 \Omega)$$

$$V_{DS} = 3.18 \text{ V}$$

Ejemplo 8.9 De la siguiente red de la figura 8.29 determinar.

a) I_{x0} y V_{CS}

b) V_{CS}

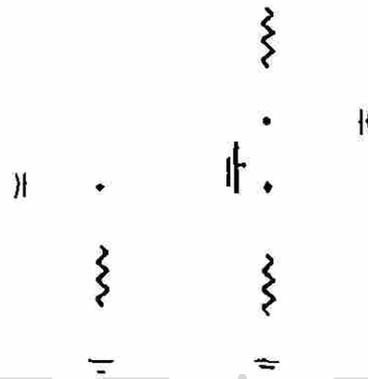
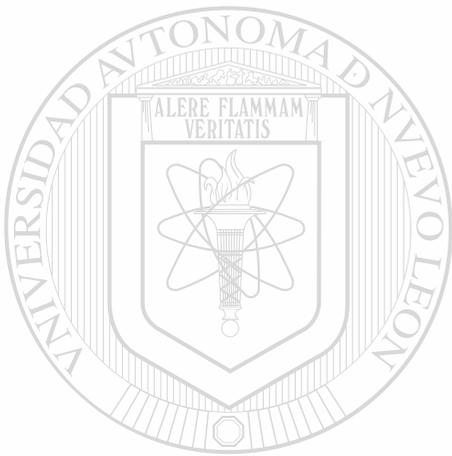


Figura 8.29 Circuito para el ejemplo 8.9

Solución:

a) Este tipo de polarización nos da por resultado:

$$V_{CS} = -I_{x0} R_S$$

Un punto de la grafica para las características de transferencia de $V_{CS} = 0V$

$$I_{x0} = \frac{I}{4} = \frac{8mA}{4} = 2mA$$

$$V_{CS} = \frac{8V}{2} = 4V$$

puesto que $V_p = 8V$, para $V_{CS} = 0V$ se seleccionara

$$V_{GS} = +2V$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 = 8 \text{ mA} \left(1 - \frac{+2V}{8V} \right)^2$$

$$I_D = 12.5 \text{ mA}$$

En la figura 8.30 aparece la curva de transferencia que se obtuvo. Para la recta de polarización en $V_{GS} = 0V$, y la $I_D = 0 \text{ mA}$. Al elegir $V_{GS} = -6V$ se obtiene

$$I_D = \frac{V_{GS} - 6V}{R_S} = 2.5 \text{ mA}$$

El punto resultante Q sera :

$$I_{DQ} = 1.7 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = -4.3 \text{ mA}$$

$$b) \quad V_{DQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_D$$

$$V_{DQ} = 20V - (1.7 \text{ mA})(6.2 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{DQ} = 9.46V$$

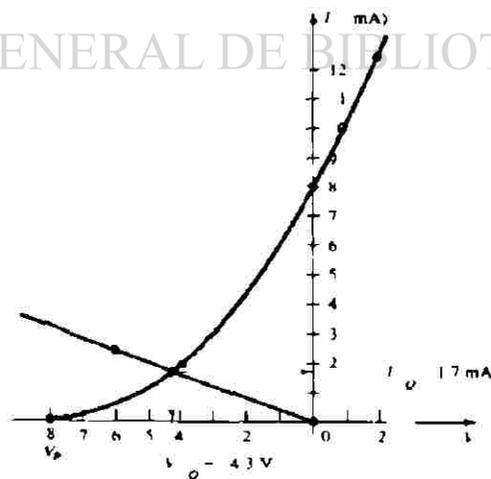


Figura 8.30 Cálculo del punto Q para la figura 8.29

Ejemplo 8.10 Determinar V_{GS} para la red de la figura 8.31

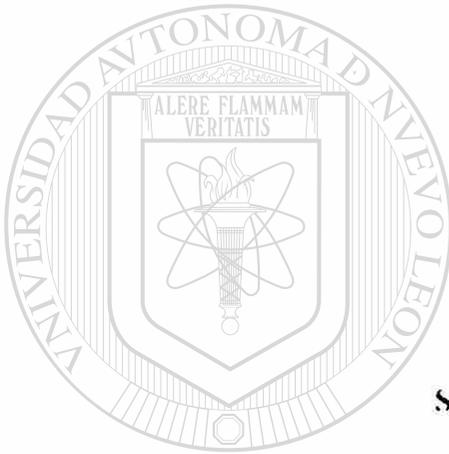
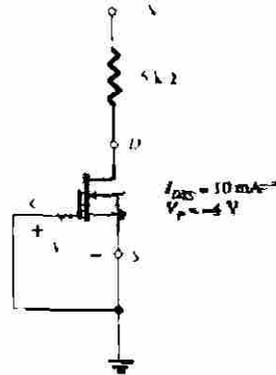


Figura 8.31 Circuito para el ejemplo 8.10

Solución:

La conexión directa entre las terminales de compuerta y fuente requiere que

$$V_{GS} = 0V$$

Debido a que V_{GS} está fija en $0V$ la corriente de drenador I_D debe de ser I_{DSS} , esto es

$$V_{GS} = 0V$$

$$I_D = 10mA$$

por lo tanto no existe la necesidad de dibujar la curva de transferencia, esto es,

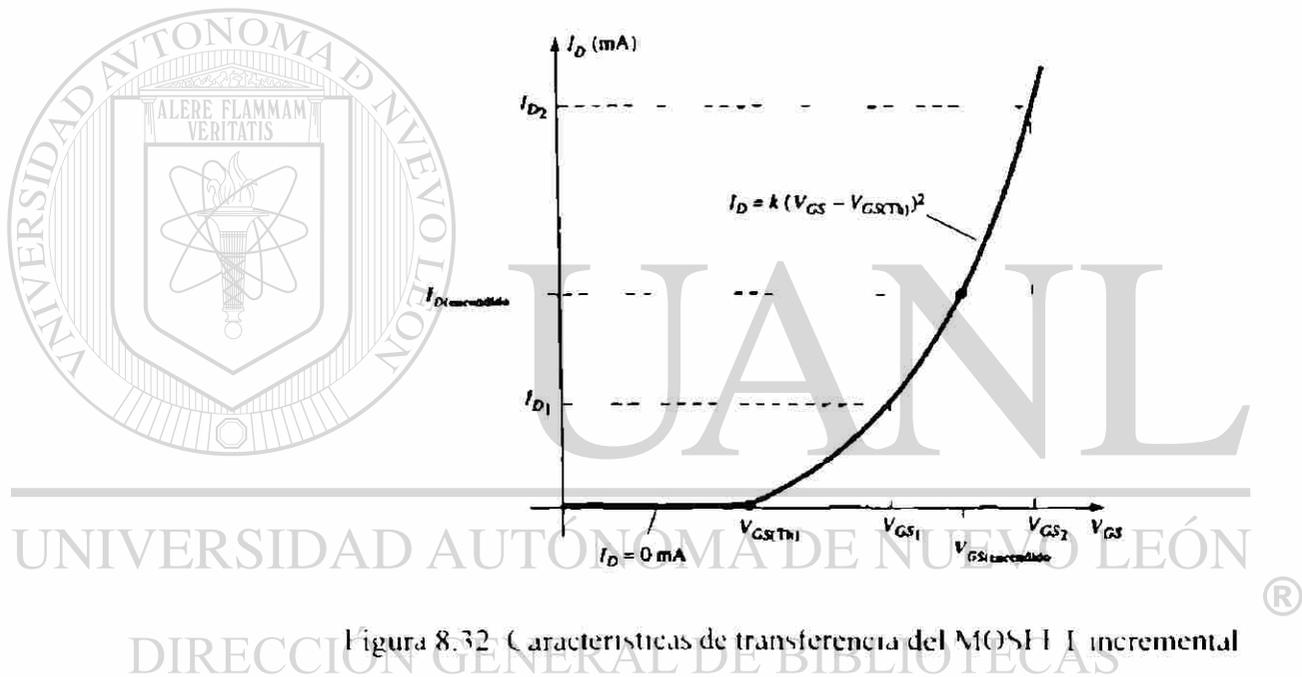
$$V_D = V_S - I_D R_S = 20V - (10mA)(15k\Omega)$$

$$V_D = 20V - 15V$$

$$V_D = 5V$$

8.6 MOSFET DE TIPO INCREMENTAL

Las características de transferencia del MOSFET de tipo incremental son muy diferentes de las encontradas para el JFET y los MOSFET de tipo decremental. En el MOSFET de tipo incremental de canal-n la corriente de drenador es cero para aquellos niveles de voltaje compuerta-fuente menores que el nivel de umbral $V_{GS(th)}$ como se muestra en la figura 8.32



$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

Ya que las hojas de especificaciones proporcionan el voltaje de umbral y un nivel de corriente de drenador $I_{D(cortado)}$, así como su nivel correspondiente de $V_{GS(th)}$, pueden definirse dos puntos de inmediato como se muestra en la figura 8.32 para completar la curva, primero se tiene que determinar la k de la ecuación anterior. A partir de los datos de las hojas de especificaciones mediante la sustitución de la ecuación y resolviendo para k de la siguiente manera

$$I_D = k(V_{GS} - V_{ST})^2$$

$$I_{D(encendido)} = k(V_{GS(encendido)} - V_{ST})^2$$

$$k = \frac{I_{D(encendido)}}{(V_{GS(encendido)} - V_{ST})^2}$$

Arreglo de polarización por retroalimentación

En la figura 8.33 se proporciona un arreglo común de polarización para los MOSFET de tipo incremental. La resistencia R_G proporciona un voltaje suficientemente grande a la compuerta para "encender" el MOSFET. Debido a que $I_G = 0$ mA y $V_{RG} = 0$ V, la red equivalente de cd aparece como se muestra en la figura 8.34.

Existe ahora una conexión directa entre el drenador y la compuerta esto es:

$$V_D = V_G$$

$$V_{DS} = V_{GS}$$

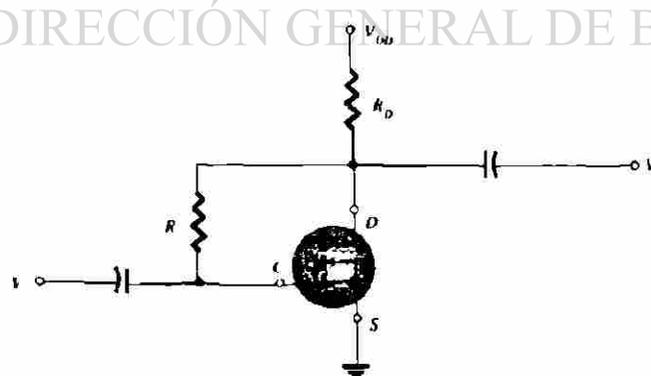


Figura 8.33 Circuito de polarización por retroalimentación

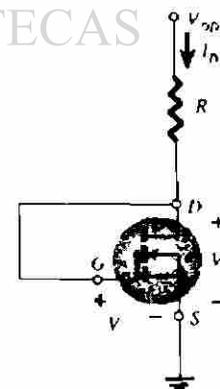


Figura 8.34 Circuito equivalente para la figura 8.33

para el circuito de salida, tenemos.

$$V_{GS} = V_{DS} - I_D R$$

Para el cual se convierte en la siguiente ecuación:

$$V_{GS} = V_{DS} - I_D R$$

sustituyendo $I_D = 0$ mA en la ecuación anterior se obtiene:

$$V_{GS} = V_{DD} - I_D R$$

sustituyendo $V_{GS} = 0$ V, también en la ecuación, obtenemos:

$$I_D = \frac{V_{DD} - R_D V_{GS}}{R_D} = \frac{V_{DD} - R_D \cdot 0}{R_D}$$

Las gráficas definidas por las ecuaciones anteriores aparecen en la figura 8.35 con el punto de operación resultante

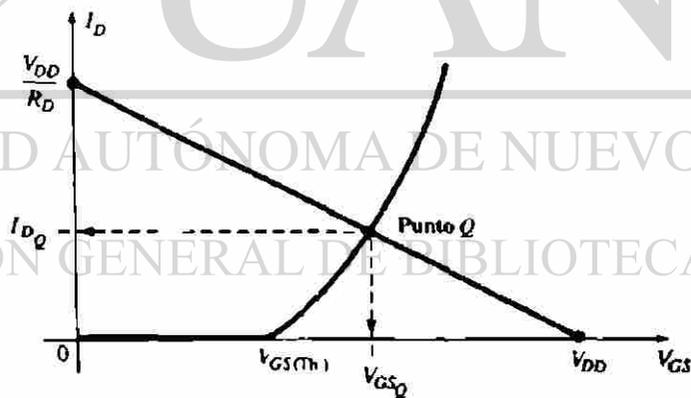


Figura 8.35 Cálculo del punto Q para la figura 8.33

Ejemplo 8.11. Determinar I_{DQ} y V_{GS} para el MOSFET tipo incremental de la figura 8.36

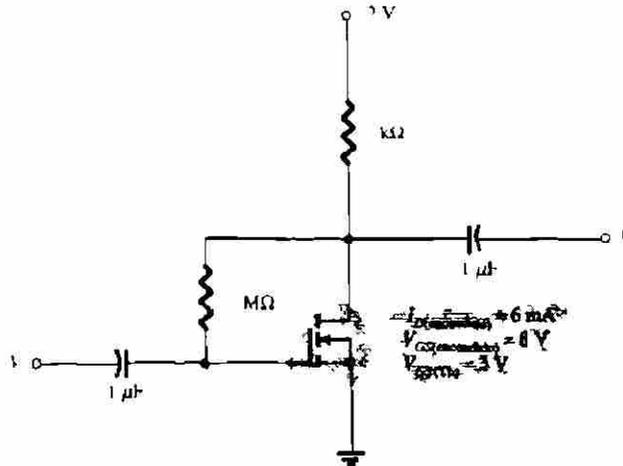


Figura 8.36 Circuito para el ejemplo 8.11

Solución:

Gráfica de la curva de transferencia. Se definen 2 puntos como se muestra en la figura 8.37 y resolviendo para k se tiene:

$$k = \left(\frac{I_D}{V_{GS} - V_{GS(th)}} \right)^2$$

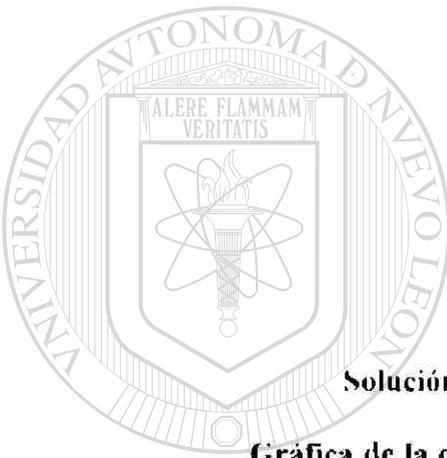
$$k = \frac{6 \text{ mA}}{(8 \text{ V} - 3 \text{ V})^2} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ A}}{25} \text{ A/V}^2$$

$$k = 0.24 \times 10^{-3} \text{ A/V}^2$$

Para $V_{GS} = 6 \text{ V}$ (entre 3 V y 8 V)

$$I_D = 0.24 \times 10^{-3} (6 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 = 0.24 \times 10^{-3} (9)$$

$$I_D = 2.16 \text{ mA}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

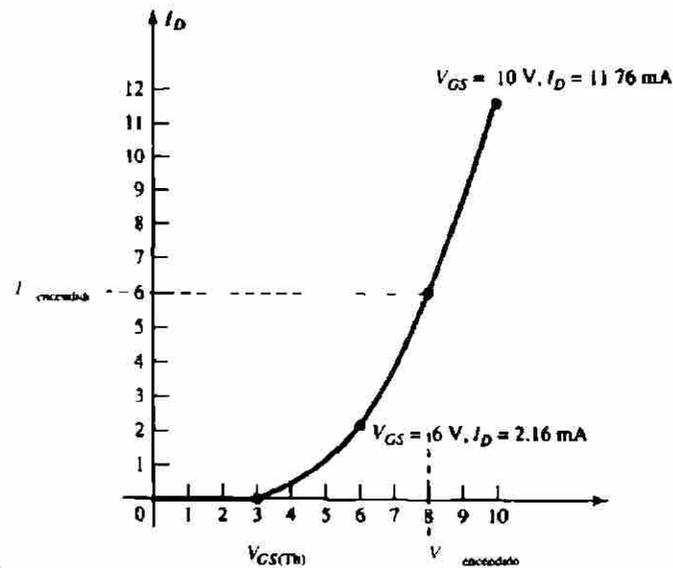


Figura 8.37 Curva de transferencia del MOSFET de la figura 8.36

como se muestra en la figura 8.36 para $V_{GS} = 10 \text{ V}$. Esto es, ligeramente mayor que el $V_{GS(1)}$:

$$I_D = 0.24 \times 10^{-4} (10 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 = 0.24 \times 10^{-4} (49)$$

$$I_D = 11.76 \text{ mA}$$

Los cuatro puntos son suficientes para graficar la curva total para el rango de interés como es mostrado en la figura 8.37

Para la red de la recta de polarización:

$$V_{GS} = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_{GS} = 12 \text{ V} - I_D (2 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{GS} = V_{GS(1)} = 12 \text{ V} - I_D (2 \text{ k}\Omega)$$

$$I_D = \frac{V_{GS(1)} - R_D}{R_D} = \frac{12 \text{ V} - 2 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega}$$

$$I_D = 6 \text{ mA} \quad V_{GS} = 6 \text{ V}$$

La recta de polarización que resulto aparece en la figura 8.38. esto es

$$I_{DQ} = 2.75 \text{ mA}$$

$$V_{DSQ} = 6.4 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_{CS} = 6.4 \text{ V}$$

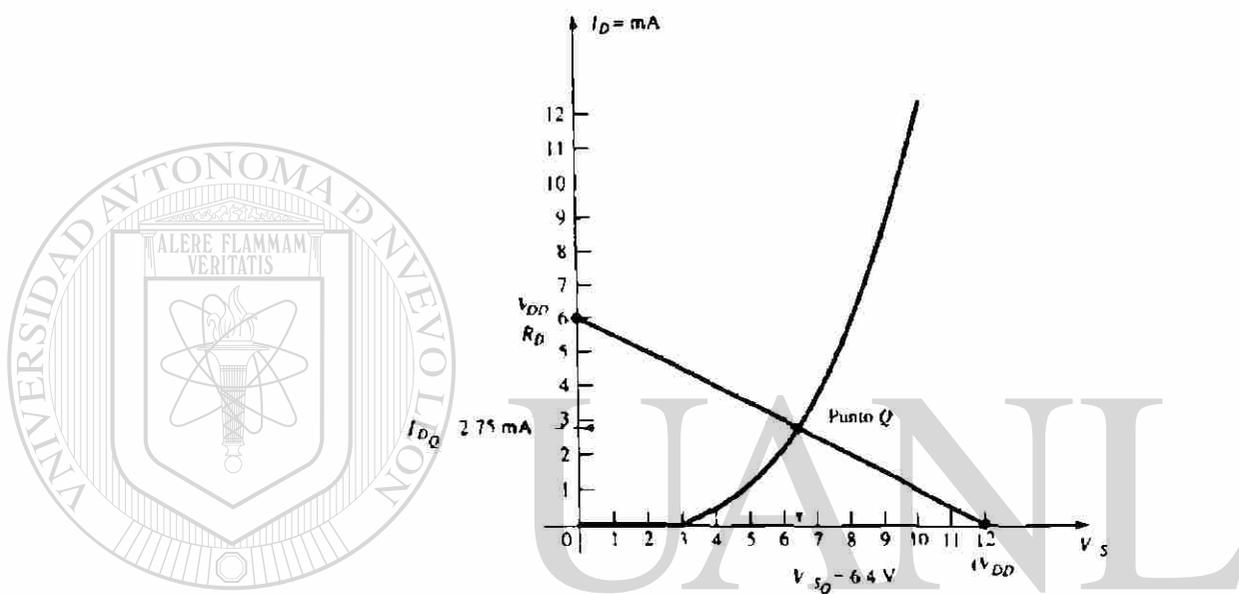


Figura 8.38 Cálculo del punto Q para la figura 8.36

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

8.7 POLARIZACIÓN POR DIVISOR DE VOLTAJE

En la figura 8.39 aparece un segundo arreglo de polarización común para el MOSFET de tipo incremental. Como que $I_G = 0 \text{ mA}$ da como resultado la siguiente ecuación para V_G , aplicando la regla del divisor de voltaje, esto es

$$V_G = \frac{R_2 V_{DD}}{R_1 + R_2}$$

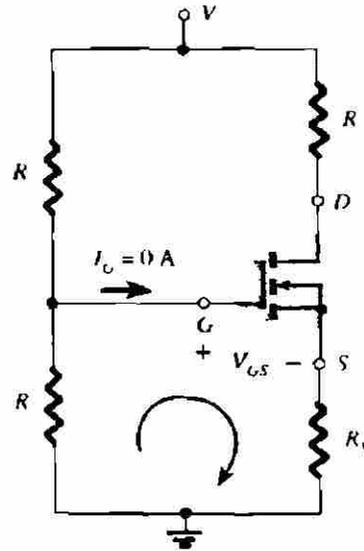


Figura 8.39 Polarización por divisor de voltaje del MOSFET incremental canal-n

Cuando se aplica la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de la malla indicada en la figura 8.39 resulta

$$+V_G - V_{GS} - V_{RS} = 0$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &= V - V_{RS} \\ V_{GS} &= V - I_D R_S \end{aligned}$$

Para la malla de salida

$$V_{RS} + V_{DS} + V_{RD} - V_{DD} = 0$$

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

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

EJEMPLO 8.12

Determinar I_D , V_{GS} así como V_{DS} para la red de la figura 8.40

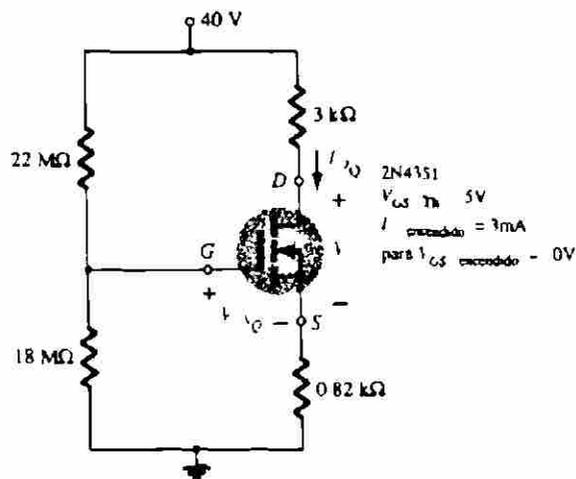


Figura 8.40 Circuito para el ejemplo 8.12

Solución:

$$V_{GS} = \frac{I_D R}{R + R} = \frac{(40V)(18M\Omega)}{22M\Omega + 18M\Omega} = 18V$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S = 18V - I_D (0.82k\Omega)$$

Cuando $I_D = 0\text{mA}$

$$V_{GS} = 18V - (0\text{mA})(0.82k\Omega) = 18V$$

tal como aparece en la figura 8.41 Cuando $V_{GS} = 0\text{V}$

$$V_{GS} = 18V - I_D (0.82k\Omega)$$

$$0 = 18V - I_D (0.82k\Omega)$$

$$I_D = \frac{18V}{0.82k\Omega} = 21.95\text{mA}$$

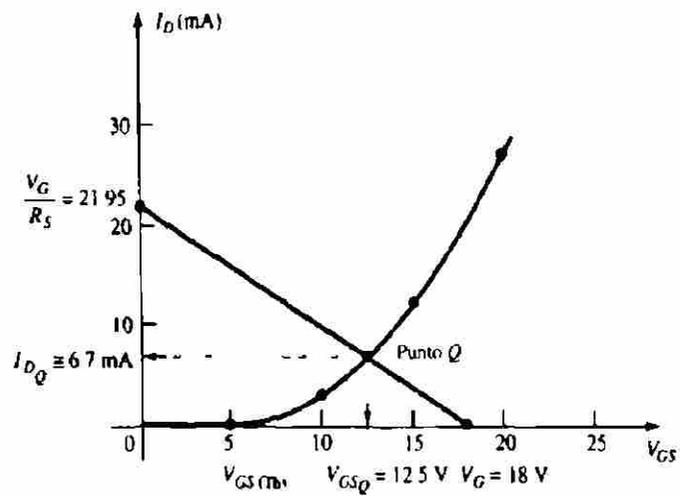


Figura 8.41. Determinación del punto Q para el ejemplo 8.12

De las hojas de especificaciones

$$V_{GS} = 5 \text{ V}, I_{DQ} = 3 \text{ mA, con un } V_{GS} = 10 \text{ V}$$

$$k = 10^{-4} \text{ A/V}^2, \quad f = 3 \text{ mF}, \quad 0.12 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

$$I_D = 0.12 \times 10^{-4} (V_{GS} - 5 \text{ V})^2$$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
la cual se traza sobre la misma gráfica (figura 8.41).

$$I_{DQ} = 6.7 \text{ mA}$$

$$V_{GSQ} = 12.5 \text{ V}$$

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

$$V_{DS} = 4 \text{ V} - (6.7 \text{ mA})(0.82 \text{ k}\Omega + 3.0 \text{ k}\Omega)$$

$$V_{DS} = 4 \text{ V} - 25.6 \text{ V}$$

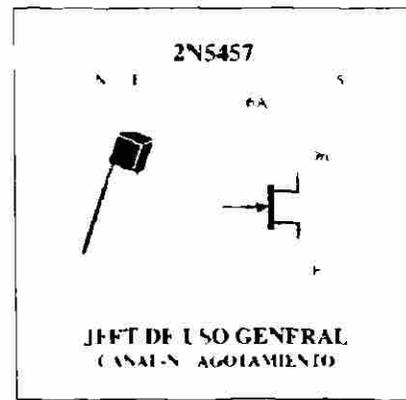
$$V_{DS} = 14.4 \text{ V}$$

Tipo	Figura	Ecuaciones	Sobregrafa
FET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
FET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
JFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
JFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
JFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
JFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
MOSFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
MOSFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
MOSFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	
MOSFET polarización		$V_G = V_{GS} = V_{DS} = V_{DD} - I_D R$	

Tabla 7.2 Resumen de configuración de polarizaciones

VALORES NOMINALES MÁXIMOS

Clasificación	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje drenaje-fuente	V_{DS}	25	Vdc
Voltaje drenaje-compuerta	V_{GS}	25	Vdc
Corriente de la compuerta	I_G	0	mAdc
Dissipación total de dispositivo @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	P	3.0	W
Pérdida de disipación arriba de 25°C		2.82	mW/°C



Reférase al 2N4220 para graficas.

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Característica	Símbolo	Mínimo	Tipo	Máximo	Unidad
----------------	---------	--------	------	--------	--------

CARACTERÍSTICAS APAGADO

Voltaje drenaje-compuerta	V_{GS}				Vdc
Corriente drenaje	I_D				A
Voltaje de corte compuerta fuente $V_{GS} = 5\text{ Vdc}$ ($I_D = 10\ \mu\text{A}$)	$V_{GS(off)}$	-5		6.0	Vdc
Capacitancia de compuerta	C_{iss}		5		pF

CARACTERÍSTICAS ENCENDIDO

Corriente de drenaje con voltaje de cero en la entrada $V_{GS} = 5\text{ Vdc}$ $V_{DS} = 5\text{ Vdc}$	I_{DSS}		3.0	5.0	mAdc
---	-----------	--	-----	-----	------

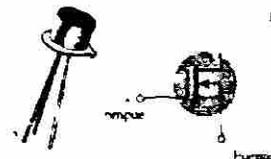
CARACTERÍSTICAS EN PEQUEÑA SEÑAL

Transconductancia	g_m		4		mA/V
Capacitancia de salida	C_{oss}				pF
Capacitancia de drenaje	C_{ds}				pF

Tabla 7.3 Hoja de especificaciones JFET canal-n 2N5457

2N3797

N P S A E TIL
X K AAA



MOSFET DE AUDIO DE BAJA POTENCIA

CANAL N - AGOTAMIENTO

VALORES NOMINALES MAXIMOS

Clasificación	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje drenaje-fuente 2N3797	V_{DS}	20	Vdc
Corriente del drenaje	I_D	20	mAdc
Disipación total del dispositivo @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Pérdida de disipación arriba de 25°C	P_D	200 1.14	mW mW/°C
Raja máxima de aire	T	-55 a +70	°C

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Característica	Símbolo	Mínimo	Tipo	Máximo	Unidad
----------------	---------	--------	------	--------	--------

CARACTERÍSTICAS APAGADO

Voltaje de corte con puerta fuertemente drenada	V_{GS}				V
Voltaje de corte con puerta fuertemente drenada	V_{GS}				Vdc
Voltaje de corte con puerta fuertemente drenada	V_{GS}				Vdc

CARACTERÍSTICAS ENCENDIDO

Corriente de drenaje con voltaje de corte en la entrada	I_{DSS}	20	29	60	mAdc
Corriente de drenaje en el estado encendido	$I_{D(on)}$	90	4	18	mAdc

CARACTERÍSTICAS EN PEQUEÑA SEÑAL

Frecuencia	f				Hz
Frecuencia	f				kHz
Frecuencia	f				MHz
Frecuencia	f				MI

CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

Resistencia	R				Ω
Resistencia	R				Ω

Tabla 7.4 Hoja de especificaciones MOSFET tipo decremental canal-n 2N3797

VALORES NOMINALES MAXIMOS

Clasificación	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje drenaje-fuente	V_{DS}	25	Vdc
Corriente del drenaje	I_D	30	mAdc
Disipación térmica del dispositivo $T_A = 25^\circ\text{C}$ Pérdida de disipación arriba de 25°C	P	300	mW
		7	mW/°C

2N4351
NAPS AX TI
mA

CONMUTACION DEL MOSFET
CANAL N-INCREMENTAL

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Característica	Símbolo	Mínimo	Máximo	Unidad
----------------	---------	--------	--------	--------

CARACTERÍSTICAS "APAGADO"

Voltaje de apagado	V_{GS}	-5		Vdc
Corriente de apagado	I_{GS}			μAdc
			2	μA

CARACTERÍSTICAS "ENCENDIDO"

Voltaje de umbral de la compuerta $V_{GS} = I_D V_{DS} = 0 (\mu\text{A})$	$V_{GS(th)}$	1	5	Vdc
Corriente de drenaje en encendido $(V_{GS} = 1\text{V}, V_{DS} = 10\text{V})$	$I_{D(on)}$	30		mAdc

CARACTERÍSTICAS EN PEQUEÑAS SEÑALES

Admittancia de transconductancia	g_m	100		μS
Capacitancia de entrada	C_{iss}			pF
Capacitancia de salida	C_{oss}			pF
Resistencia de transconductancia	$r_{ds(on)}$		10	m Ω

CARACTERÍSTICAS DE CONMUTACIÓN

Resistencia de drenaje en estado de corte	$r_{DS(off)}$	1		Ω
Resistencia de drenaje en estado de saturación	$r_{DS(on)}$		10	m Ω

Tabla 7.5 Hoja de especificaciones MOSFET tipo incremental canal-n 2N4351

CAPÍTULO 9

SPICE

9.1 INTRODUCCIÓN.-

SPICE es el acrónimo de **Simulación Program with Integrated Emphasis**. Este programa ha sido escrito en varios lenguajes de programación y ha sido modificado y actualizado para expandir sus capacidades de simulación. El SPICE lee datos de entrada, los procesa en un computador central y presenta los resultados en forma tabular o gráfica en cualquier impresora común.

El SPICE es un programa de simulación apoyado en una computadora, esto es, el ingeniero diseña el circuito y luego lo proporciona al SPICE para su simulación. Con la simulación no es necesario implementar y probar el circuito antes de completar el diseño. Se pueden cambiar los componentes del circuito y observar los resultados de esos cambios en el desempeño del circuito.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El programa SPICE se diseñó para determinar los parámetros desconocidos utilizando las ecuaciones de corriente de Kirchhoff (análisis de nodos). Este tipo de análisis requiere que los transistores y diodos sean caracterizados por un circuito equivalente. El tipo de circuito equivalente por utilizar se construye en el programa y se determina por el tipo de transistor o diodo especificado en los archivos del programa.

Una de las primeras operaciones que efectúa el programa SPICE es determinar el punto de operación de cd o el punto Q . Una vez realizado esto el programa toma en consideración la entrada de ca y efectúa los cálculos para una sola frecuencia.

Si se requieren de mas frecuencias el programa lo hace para cada una de ellas y el programa termina al haber realizado toda la inspeccion de las frecuencias deseadas.

Como el SPICE utiliza el analisis nodal con el metodo de solucion, posee ciertas limitaciones las cuales son

1 - Solo se pueden utilizar fuentes de corriente controladas por voltaje. Si existen otras fuentes hay que convertirlas a fuentes controladas de voltaje ya sea internamente o externamente.

2 - Como el analisis de SPICE se basa en operaciones sobre matrices utilizando las funciones de admitancia no se pueden incluir resistencias de valor cero, o la matriz tendra determinante cero y no se encontraran soluciones.

3 - Los elementos multiterminales que no tienen una representacion de matriz de admitancia (por ejemplo un transformador ideal) se deben convertir para permitir que exista una matriz de admitancia

4 - Solo se pueden incluir en el circuito resistencias no lineales controladas por voltaje; los elementos como lamparas de neon y SCR no se pueden evaluar utilizando el analisis nodal

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El comportamiento del circuito se puede simular con respecto al tiempo, la frecuencia y las variaciones de voltaje. Esto se puede realizar especificando la forma en que SPICE analizara el circuito por medio de **proposiciones de análisis**

El SPICE puede simular las siguientes formas de analisis

- cd no lineal
- transitorio no lineal
- ca lineal de pequena senal

El análisis de cd determina los voltajes de nodo en el circuito con los inductores en corto-circuito y los capacitores abiertos, esto para cd. Este análisis se realiza antes del análisis transitorio o de ca, y determina las condiciones iniciales necesarias para el análisis transitorio. El análisis de cd determina los modelos de pequeña señal linealizados de los dispositivos no lineales que se usaran en el análisis de ca.

También se puede utilizar un análisis de cd para determinar el valor en pequeña señal de la función de transferencia, las curvas de transferencia de cd y las sensibilidades en pequeña señal de variables de salida específicas. Estas opciones de análisis de cd se especifican por medio de las proposiciones de control.

```
.DC 11 OP SENS
```

Las variables de voltaje y corriente de salida se computan como función del tiempo sobre un intervalo de tiempo especificado utilizando un análisis transitorio. Todas las fuentes que no dependan del tiempo se colocan en sus valores de cd. Las opciones para el intervalo transitorio y el análisis de Fourier se definen por medio de las proposiciones:

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

```
TRAN FOURIER
```

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Las variables de voltaje y corriente como función de la frecuencia se computan utilizando análisis de ca a pequeña señal. El que diseña el circuito especifica el intervalo de frecuencias para el cual se debe llevar a cabo este análisis. La salida del análisis de ca es una función de transferencia (ejemplo: ganancia de voltaje, transimpedancia). Si el circuito solo tiene una entrada de ca, es conveniente fijar la entrada a una magnitud unitaria y de fase cero. De esta forma las variables de salida tienen el mismo valor como función de transferencia de la variable de salida con respecto a la entrada.

Cuando se trabaja en el análisis de ca. se puede analizar también el ruido generado por las resistencias y dispositivos semiconductores y las distorsiones características del circuito en pequeña señal. Estas opciones se especifican por medio de las siguientes proposiciones de control:

AC NOISE DISTO

Una vez creado el archivo del circuito por proposiciones que describen el circuito, y definido el tipo de análisis, se puede llevar a cabo la simulación del circuito.

9.2 INFORMACIÓN SOBRE PROGRAMACIÓN

Cada computadora tiene un conjunto único de instrucciones para editar programas. Estas instrucciones deben conocerse antes de intentar simulaciones con el programa. Existe un apéndice donde se describen circuitos que contienen resistencias, capacitores, inductores, fuentes independientes de tensión y corriente, cuatro tipos de fuentes dependientes, y los cuatro dispositivos más comunes: diodos, BJT, JFET, MOSFET.

El programa SPICE fija los valores para los parámetros no definidos por el usuario en las proposiciones del modelo del transistor. Estos valores por omisión deben estar disponibles para su revisión en las instrucciones de la versión particular del programa SPICE que se está utilizando. Las cinco áreas de programación se introducen en la siguiente secuencia:

1. Descripción de elementos
2. Descripción de fuente
3. Subcircuitos
4. Análisis requerido
5. Salida requerida

9.3 FORMATO

SPICI utiliza formato libre para las entradas. Los campos de dato se encuentran separados por uno o más delimitadores (un bloque, un coma, un signo igual o un paréntesis izquierdo o derecho). Una proposición se puede continuar si se coloca un signo más (+) en la columna 1 de la siguiente línea de la proposición. Un campo de nombre debe iniciar con una letra y no debe contener delimitadores. Solo se toman en cuenta las primeras ocho letras del nombre para la identificación. Todo campo de número puede contener un entero (por ejemplo 2, -35, 77) un número en punto flotante (por ejemplo 3.1416, 5.3) un entero o un número en punto flotante seguido por un exponente entero (1E3, 3.2E-4), o un entero o un número en punto flotante seguido por uno de los factores de escala siguientes.

Factores de Escala

MII	2.54E-6	M	1E-3
-----	---------	---	------

K	1E3	U	1E-6
---	-----	---	------

MI G	1E6	N	1E-9
------	-----	---	------

G	1E9	P	1E-12
---	-----	---	-------

T	1E12	F	1E-15
---	------	---	-------

Se ignoran las letras inmediatas a un número (que no sean factores de escala) y las letras inmediatas a un factor de escala. Esto es, 10, 10V, 10 VOLTS y 10 HD representan el mismo número. Además, M, MA, MSIC y MMHOS representan el mismo factor de escala, 10^3 . Una proposición de comentario se debe indicar colocando un asterisco en la primera columna.

9.4 Descripción del circuito

Cada elemento en el circuito por analizar debe estar definido por números de nodo. Todos los nodos del circuito se numeran. Los números de nodo no necesitan ser consecutivos. El nodo 0 es tierra o nodo de referencia. El circuito es descrito a SPICE por un archivo de proposiciones de elementos, el cual define la topología del circuito y los valores de los elementos, así como un conjunto de proposiciones de control que definen los parámetros de modelos y los controles de ejecución. La primera proposición en el archivo debe ser de título, mientras que la última debe ser una proposición de fin (END). Las proposiciones intermedias, excepto las de continuación, pueden estar en cualquier orden.

Cada elemento del circuito es especificado por una proposición de elemento que contiene el nombre del elemento, los nodos del circuito a los cuales se conecta este, y el valor de los parámetros que determinan las características eléctricas del elemento. La primera letra en el nombre del elemento especifica el tipo de este. Las cadenas xxxxxx e yyyyyyy denotan un nombre de referencia alfanumérico especificado por el usuario para el elemento correspondiente. Por ejemplo, un resistor, un capacitor y un inductor se pueden definir como R10AD, C3S11 y L3S12, respectivamente. Los campos de datos encerrados entre son opcionales. Los nodos de elementos deben ser nodo de tierra siempre debe numerarse con 0. Cada nodo debe tener al menos dos conexiones y una trayectoria de ed hacia tierra cuando los capacitores se abren y los inductores se llevan a cortocircuito. Con respecto a las tensiones y corrientes de ramas, SPICE utiliza los sumideros como referencia (es decir, los flujos de corriente en dirección de la caída de tensión).

9.5 DATOS DE ENTRADA.

En esta seccion, se define la manera como se forman los datos de entrada para que los acepte el programa SPICE

Descripcion de elementos.

Cada elemento requiere una definicion de las características del dispositivo de modo que SPICE pueda analizar el circuito en forma apropiada

Elementos pasivos las descripciones de los elementos y los formatos asociados se muestran en la siguiente lista

Tipo	formato			
Resistor	Rxxxxxxx	n1	n2	valor
Capacitor	Cxxxxxxx	n+	n-	valor
Inductor	Lxxxxxxx	n+	n-	valor
Diodo	Dxxxxxxx	n+	n-	valor

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Las designaciones de los elementos se muestran en la figura 9.1

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

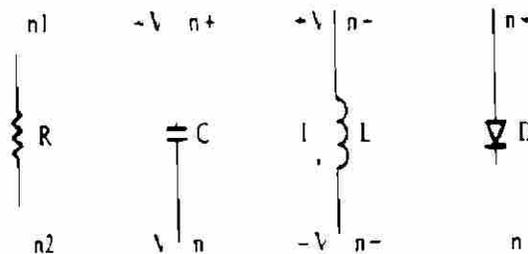


Figura 9.1 Designaciones de los elementos

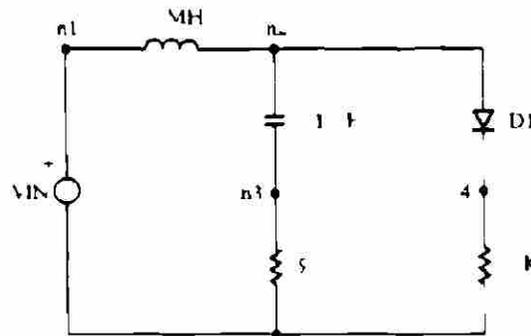


Figura 9.2 Ejemplo de un circuito con componentes pasivos

El nombre del modelo (NOMMOD) se introduce para referirse a la proposición MODI correspondiente

Se ilustra el procedimiento para el ejemplo de un circuito pasivo, como se muestra en la figura 9.2. Nótese que los nodos han sido numerados de n0 a n4. El formato utilizado en la introducción de las descripciones de los elementos para una evaluación por SPICE se muestra en seguida (se imprimen los nombres de los elementos sin subíndices ya que así es como aparecen en los computadores, por ejemplo

I se lista como IEN)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RC1 SETUP

*DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS

R1	3	0	500
RD	4	0	1K
IEN	1	2	10MH
CBATERIA	2	3	1U
D1	2	4	MODEL
MODEL	MODEL	D	(VJ 0.7)

*DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE

V1N	1	0 DC	5
-----	---	------	---

END

Componentes activos la identificación del transistor en el formato para dispositivos activos es como sigue: el colector (o drenador) va en primer lugar

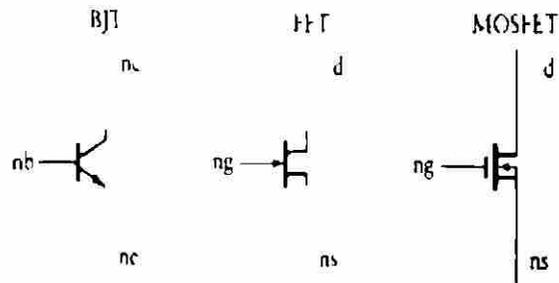


Figura 9.3 Designaciones de los elementos activos.

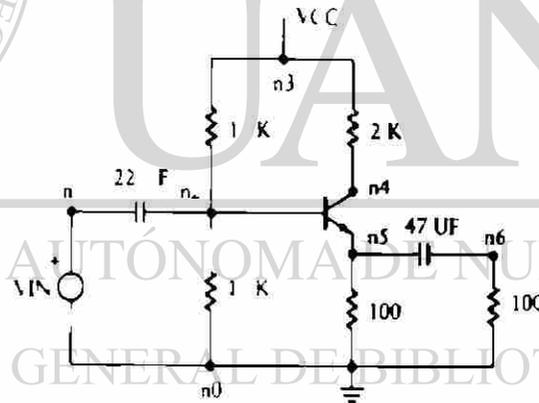
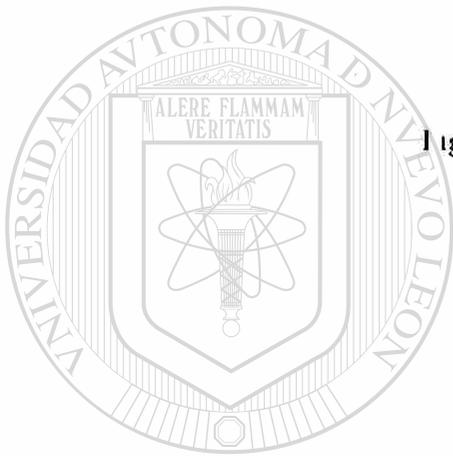


Figura 9.4 Ejemplo de un amplificador con transistor

La base (o compuerta) en segundo y el emisor (o fuente) al final. Esto se ilustra como sigue.

Tipo	Formato	nc	nb	ne	nommod
BJT	Qxxxxxx	nc	nb	ne	nommod
JFET	Jxxxxxx	nd	ng	ns	nommod
MOSFET	Mxxxxxx	nd	ng	ns	nommod

Las designaciones de los elementos activos se muestran en la figura 9.3. El nombre de un modelo se introduce junto con la correspondiente proposición `MODEL` para especificar el tipo de transistor (**nnp**, **npn** canal **n** o canal **p**). La proposición `MODEL` también se puede utilizar para establecer el máximo valor de beta, o de la tensión de ruptura base-emisor en el BJT, y para establecer la tensión de umbral o la transconductancia de los dispositivos FET. Existen otros parámetros que se pueden establecer, dependiendo del análisis por realizar.

En la figura 9.4 se presenta un ejemplo de amplificador con transistor. Nótese que los nodos han sido numerados de `n0` a `n6`. El formato para introducir las descripciones de los elementos para la evaluación por SPICE se muestra en seguida.

```

EMITTER FOLLOWS SETUP
* DESCRIPCION DE ELEMENTOS
R1          2      0      10K
R2          2      3      10k
RC          3      4      2k
RI          5      0      100
RI          6      0      100
CEN        2      1      22UF
CO         5      6      47UF
Q1          4      2      511AMI
* MODEL 511AMI NPN ( BETA = 75 )
* DESCRIPCION DE FUENTES
VCC         3      0      DC 12
VIN         1      0      AC
END

```

Dispositivos semiconductores Existen muchos parámetros que se pueden definir en las proposiciones **MODEL** de **SPICE** aproximadamente 40 parámetros para **BJT**, 12 para **JFET** y 38 para **MOSFET**. La versión particular de la instrucciones del programa **SPICE** identifica los parámetros que se pueden utilizar y los valores de omisión típicos asignados por el programa. Las abreviaturas de la proposición **MODEL** se muestran en seguida.

FORMATO DE MODELO

MODEL nommod tipo pnom1 pval1 pnom2 pval2 pnom3 pval3

Tipo	Dispositivo de aplicación
NPN	BJT npn
PNP	BJT pnp
D	Diodo
NJ	JFET canal n
PJ	JFET canal p
NMOS	MOSFET canal n
PMOS	MOSFET canal p

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

LISTA DE OPCIONES DE PARÁMETROS DE MODFLO (parámetros principales)

Parámetro	pnom	MODFLO	pval por omisión
Potencial de union	VJ	Diodo	1V
Tension de ruptura inversa	BV	Diodo	Infinito
Resistencia ohmica	RS	Diodo	0 ohms
Inversa de tension	VAR	BJT	Infinita
Beta directa maxima	BI	BJT	100
Tension base-emisor	VJE	BJT	75V
Capacitancia colector-base	CJC	BJT	0

Capacitancia base-emisor	CIF	BJT	0
Tiempo de transito directo	TF	BJT	0
Tension de umbral	VTO	JFET	-2
Transconductancia	BETA	JFET	1E-4 VV
Capacitancia de union G-S	CGS	MOSFET	0
Capacitancia de union G-D	CGD	MOSFET	0
Tension de umbral	VTO	MOSFET	0
Transconductancia	KP	MOSFET	2 VV
Capacitancia de union Sust-DI	CBD	MOSFET	0
Capacitancia de union Sust-SJ	CBS	MOSFET	0

El nombre de modelo (nommod) incluido en la proposicion MODFET corresponde al nombre de modelo especificado en las proposiciones de componentes activos y de descripcion del diodo. Se puede utilizar una proposicion MODFET para referirse a todos los dispositivos con el mismo nombre de modelo siempre que las especificaciones del dispositivo sean identicas. Como ejemplo de las proposiciones MODFET se muestran en la figura 9.5

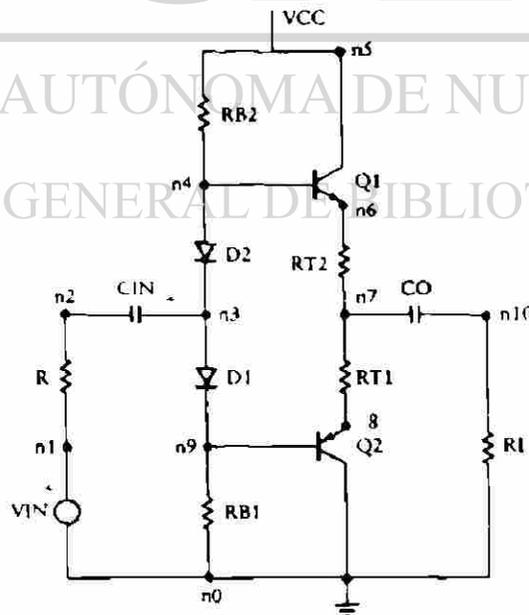


Figura 9.5 Utilizacion de las proposiciones MODFET

CSDC SETUP

*DESCRIPCION DE ELEMENTOS

R1	2	1	50
R11	7	8	1
R12	6	7	1
RB1	9	0	700
RB2	4	5	700
C1N	3	2	327U
C0	7	10	995U
D1	3	9	MOD1
D2	4	3	MOD1
Q1	5	4	6 MOD1OP
Q2	0	9	8 MODBOT
MOD1	MOD1		D(VI 7 RS 10)
MOD1	MOD1OP		NPN(BE 75 VJE 7)
MOD1	MOD1OP		PNP(BE 75 VJE 7)

*DESCRIPCION DE FUENTES

VCC	5	0	DC 12
VIN	1	0	AC 1M 90 DEGRIS

END

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Descripción de fuente

Las fuentes que se encuentran en circuitos electrónicos son de tensión y de corriente. Ahora analizaremos como se introducen en el programa SPICE las fuentes de tensión y de corriente lineales tanto independientes como dependientes.

Fuentes lineales dependientes Los cuatro tipos de fuentes dependientes de tensión y de corrientes se listan en seguida.

Tipo de fuente	Formato	
De corriente cont. por tension	Gxxxxxxx	n+ n- nc+ nc- valor
De tension cont. por tension	Ixxxxxxx	n+ n- nc+ nc- valor
De corriente cont. por corriente	Fxxxxxxx	n+ n- vnom valor
De tension cont. por corriente	Hxxxxxxx	n+ n- vnom valor

La fuente de control es definida por las tensiones en los nodos de control (nc+ y nc-) o el nombre de las fuentes de tension a traves de las cuales fluye la corriente de control (vnom). Si ninguna fuente de tension esta contenida en el lazo de corriente, se puede utilizar una fuente de cd de valor cero para medir la corriente de control. La direccion positiva para el flujo de corriente de control va del nodo positivo, a traves de la fuente, al nodo negativo de la fuente de tension aplicable. Una fuente de corriente de valor positivo fuerza a la corriente a fluir del nodo positivo al negativo a traves de la fuente. Los valores de salida se refieren a la transconductancia, la ganancia de tension, la ganancia de corriente o la transresistencia, respectivamente.

En la siguiente figura 9-6 se muestra como se forma una fuente de corriente dependiente para introducirla al SPICE, esto es:

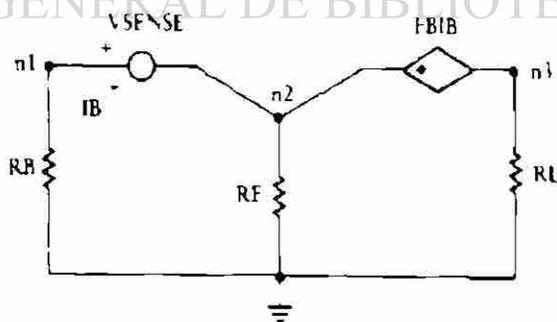


figura 9-6 Ejemplo de una fuente de corriente dependiente

DEPENDENT SOURCE SETUP

RB	1	0	20k
RF	2	0	100
RI	3	0	2k
FBIB	3	2	VSI NSI 100
VSI NSI	1	2	

END

Fuentes lineales independientes: Existen dos fuentes lineales, de tensión y de corriente, las cuales son de cd o de ca. El formato es el siguiente.

Tipo de fuente	Entrada de la fuente
----------------	----------------------

Tensión	Vxxxxxxx n+ n- DC d t AC mag fase
Corriente	Ixxxxxxx n+ n- DC d t AC mag fase

A una fuente independiente se le asigna una magnitud de ca y una fase (mag. fase) que se excita solo durante el análisis en ca, un valor de cd (d t) para determinar la solución de polarización a pequeña señal para análisis en ca y transitorio, o una función dependiente del tiempo (d/t) para el análisis transitorio y de cd (utilizando un valor de tiempo cero) o todos estos simultáneamente. Si se omite la magnitud de ca luego de la palabra clave AC, se supone un valor uno. Si se omite la fase de ca, se supone un valor cero.

Las funciones dependientes del tiempo pueden ser senoidales o trenes de pulsos. Se supone que fluye corriente positiva del nodo positivo hacia el negativo a través de la fuente. Una fuente de corriente de valor positivo fuerza a la corriente a salir del nodo positivo, y entrar al nodo negativo a través de la fuente. Las fuentes de tensión, además de excitar al circuito, se pueden utilizar como amperímetros en SPICE. Esto es, se puede insertar una fuente de tensión de valor cero con el fin de medir corriente.

Ejemplos de fuentes dependientes del tiempo y fuentes de pulso

Formato senoidal

SIN (vo va frec td theta)

Parámetro	valores por omisión
vo (desplazamiento)	0
va (amplitud)	1
frec (frecuencia)	1 tstop
td (tiempo de retardo)	0
theta (factor de amotiguamiento)	0

Formato de pulsos

PULSE (v1 v2 td tr tf pw periodo)

Parametro	valores por omisión
v1 (valor inicial)	-
v2 (valor de pulso)	-
td (tiempo de retardo)	0
tr (tiempo de subida)	tstep
tf (tiempo de bajada)	tstep
pw (ancho de pulso)	tstop
periodo	tstop

Después de presentar las técnicas para describir al circuito, ya es posible hacer uso del programa para realizar el análisis, este puede ser de tres tipos: análisis de cd, análisis en ca y análisis transitorio. Cada uno de ellos se analiza por separado.

El Pspice se puede ejecutar en un sistema compatible con IBM adecuadamente configurado. Las versiones superiores a la 6.0 se ejecutarán en un sistema 486 de cualquier velocidad y con 4MB de RAM o más. La más reciente versión para evaluación viene en siete discos de 3.5" o en un CD-ROM.

9.6 OPERACIÓN GENERAL PARA EL USO DE PSPICE

Para efectuar un análisis Pspice se debe proceder de la siguiente manera

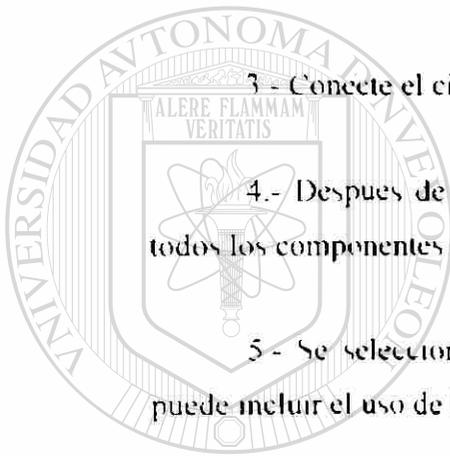
1 - Seleccione Files en la línea de menú superior. escoja New para un circuito nuevo u Open para obtener un archivo de circuito previamente creado.

2 - Seleccione y coloque componentes en el área de trabajo usando Draw-Get New Part desde la barra de menú

3 - Conecte el circuito usando Draw-wire desde la barra de menú

4.- Después de que el circuito este terminado y se hayan dado los valores de todos los componentes deseados, incluya los valores de la alimentación de cd o de ca

5- Se selecciona el análisis deseado usando Analysis-Setup. Si se desea esto puede incluir el uso de PROBE para obtener las formas de onda de entrada y salida



U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Nombres de archivo



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Los archivos que se usan con Pspice tienen extensiones de tres letras estándar

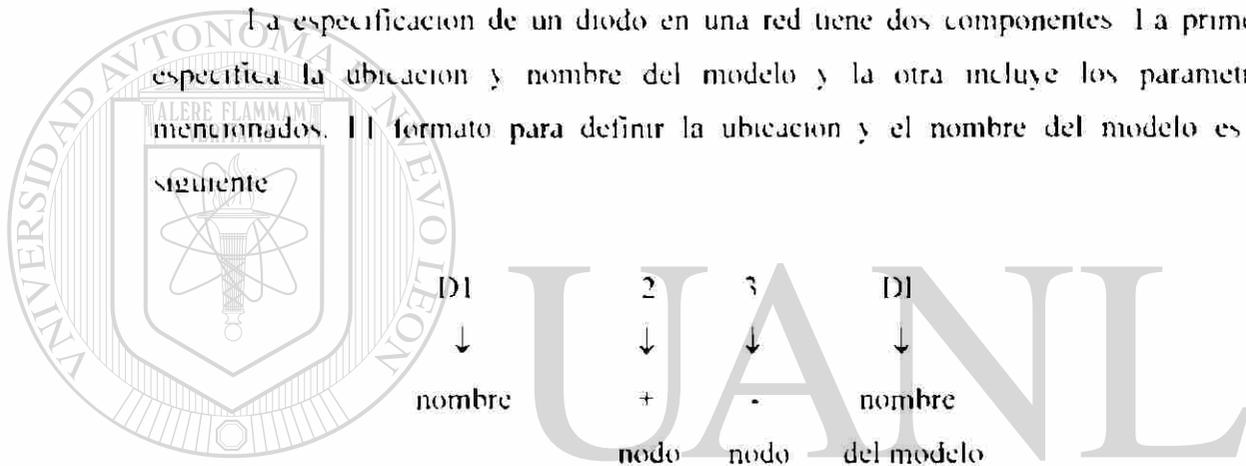
- .ALS archivo que contiene nombres de alias e información de circuito
- .CIR archivo de texto que describe el circuito
- .DAT archivo que contiene datos PROBE
- .LIB archivo que contiene información de biblioteca sobre componentes de circuito especiales
- .NET archivos que contienen listas de redes esquemáticas
- .OUT archivo que contiene información de texto de salida
- .SCH archivo gráfico que describe el circuito

9.7 ANÁLISIS POR COMPUTADORA

PSpice (version DOS)

La descripción en el manual de PSpice comprende un total de 14 parámetros para definir sus características terminales. Estas incluyen la corriente de saturación, la resistencia serie, la capacitancia terminal, el voltaje de rompimiento inverso, la corriente de rompimiento inverso y otros factores que se pueden especificar si se necesita para un diseño o análisis por realizar.

La especificación de un diodo en una red tiene dos componentes. La primera especifica la ubicación y nombre del modelo y la otra incluye los parámetros mencionados. El formato para definir la ubicación y el nombre del modelo es el siguiente:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Un diodo se especifica por la letra mayúscula D al principio de la línea, seguida por la etiqueta aplicada al diodo en el diagrama o esquema. La secuencia de los nodos define el potencial en cada nodo y la dirección de conducción para el diodo; en otras palabras, la conducción se especifica en dirección del nodo positivo al negativo. El nombre del modelo es asignado a la descripción del parámetro a seguir.

El mismo nombre del modelo puede aplicarse a cualquier número de otros diodos en la red, tales como D2, D3.

Los parámetros se especifican por medio de la instrucción `MODIFI` que tiene el siguiente formato para un diodo:

MODEL	DI	D(IS=2L-15)
	↓	√
	nombre del modelo	especificaciones del parámetro

La especificación comienza con la entrada MODEL seguida por el nombre del modelo como se especificó en la descripción de la ubicación, y la letra mayúscula D para especificar un diodo. Las especificaciones del parámetro aparecen entre paréntesis y debe usarse la rotación especificada en el manual de PSpice. La corriente de saturación inversa se inscribe como IS y se le asigna el valor de 2×10^{-15} A. Este valor se escogió porque resulta típicamente en un voltaje de diodo de alrededor de 0.7 V.

Ejemplo de análisis de un circuito con diodo

El primer paso sería volver a trazar la red como se ilustra en la figura 9.7 identificando los nodos y numerándolos en un orden lógico. La tierra se elige como el nivel de referencia y se le asigna el número 0. El diodo de silicio se localiza entre los nodos 2 y 3. El voltaje de salida del ejemplo V_{34} se halla del nodo 3 a tierra. El voltaje V_{12} está entre los nodos 1 y 2, y V_{34} se encuentra entre los nodos 3 y 4.

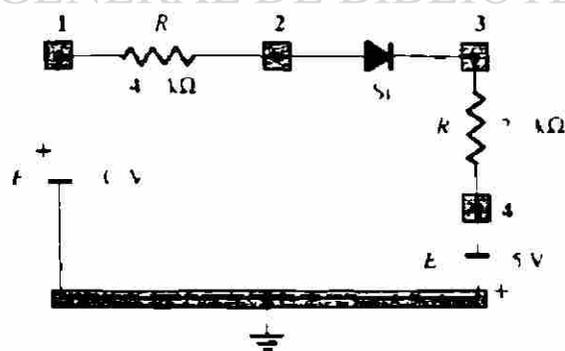


Figura 9.7 Circuito para el ejemplo con diodo

La información de la red se introduce a la computadora en un archivo de entrada. La primera entrada debe ser una línea de título para identificar el análisis por realizarse. El siguiente conjunto de datos (o serie de entradas) es una descripción de la red utilizando los nodos seleccionados y el formato específico requerido por Pspice para cada elemento.

La última entrada debe ser la instrucción END exactamente en la forma indicada. Ignorar el punto que antecede a la instrucción invalidará el archivo de entrada por completo.

El archivo de entrada para la red de la figura 9.7 se proporciona en la figura 9.8. La línea de título especifica el "circuito de diodo para la red de la figura 9.7" como el circuito por analizarse. La primera línea de la descripción de la red especifica la fuente de cd de 10V. Para todas las fuentes de cd, la primera letra de la línea debe ser la letra mayúscula V seguida del nombre de la fuente.

A continuación se introduce el nodo del lado positivo de la fuente seguido de la polaridad negativa. La magnitud de la fuente se introduce luego tal como se indica.

Circuito de diodo para la red de la figura 9.7

VE1	1	0	10V
R1	1	2	4.7K
DI	2	3	DI
R2	3	4	2.2K
VE2	0	4	5V

.MODEL DI D (IS = 2E-15)

.DC VE1 10V 10V 1V

PRINT DC V(3) I(D1) V(1,2) V(3,4) V(2,3)

.OPTIONS NOPAGE

END

Figura 9.8 Archivo de entrada para la red de la figura 9.7

El siguiente registro de entrada es una resistencia que requiere una letra mayúscula R a comenzar la línea, seguida por su nombre elegido. La "presión" de la fuente de 10V sugiere que la corriente resultante establecerá al nodo 1 como positivo respecto del nodo 2, de aquí viene el orden de los nodos en el archivo de entrada. La magnitud del resistor se especifica como de 4.7 k Ω .

La línea 3 de la descripción de la red y la descripción del modelo del diodo en la línea 6. Recuerdese que IS se especificó como 2E-15 para obtener una caída de 0.7V.

Las dos siguientes entradas de registro son las correspondientes al segundo resistor y a la otra fuente de cd. Adviertase en cada caso un intento de definir los nodos positivo y negativo en el orden de las entradas de los nodos. Sin embargo, una suposición incorrecta resultaría simplemente en un signo negativo para el voltaje a través de un elemento particular.

La entrada DC especifica un análisis de cd con una fuente E de 10 V. El análisis DC puede especificarse para un intervalo de valores, de aquí la repetición del nivel de 10V en la línea de entrada. Si se repite el nivel, como en este caso, el análisis solo puede realizarse para el nivel indicado.

Si el segundo nivel fuera diferente, el análisis se realizaría del primero al segundo nivel a los niveles definidos por el incremento especificado como la siguiente entrada de la línea. Aun cuando nuestro análisis es solamente a un nivel, se requiere una entrada para el incremento como se indica por la cantidad de 1V típicamente utilizada para este propósito. Por tanto, el programa, una vez que está en ejecución y que el sistema de computadora advierte la repetición del nivel de 10V, efectuará el análisis a un nivel de solamente (10V) y hará caso omiso de la entrada que define el incremento. No es necesario incluir la segunda fuente de cd en esta instrucción.

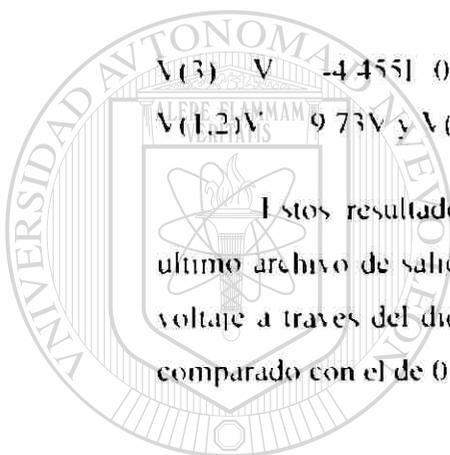
La instrucción `PRINT` define aquellas cantidades que se incluirán en los datos de salida. La cantidad `V(3)` es el voltaje desde el nodo 3 hasta el nivel de tierra, el voltaje de salida de la figura 9.7. La siguiente es la corriente a través del diodo seguida por los voltajes entre los nodos indicados.

La entrada `OPTIONS NOPAGE` es un mandato para "ahorrar papel".

Una vez que el archivo de entrada se introduce correctamente, la información deseada en el formato del archivo de salida que aparece en la figura 9.9. A continuación se muestran los parámetros del modelo especificado seguidos de los resultados deseados, estos son:

`V(3) = -4.455101 = -0.4455 V`, corriente de diodo `I(D1) = 2.07mA`, el voltaje `V(1,2) = 9.73V` y `V(3,4) = 4.554V`.

Estos resultados son comparados con los del ejemplo 3.4 y concuerdan. El último archivo de salida para la red de la figura 9.7 y observado en la figura 9.9 es el voltaje a través del diodo, el cual es para el nivel de corriente `IS` elegido de `0.715 A`, comparado con el de `0.7 V` utilizado en el ejemplo 3.4.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Circuito de diodo para la red de la figura 9.7

```
VF1 1 0 10V
R1 1 2 4.7K
D1 2 3 DI
VE2 0 4 5V
MODEL DI D(IS=2E-15)
DC VE1 10V 10V 1V
.PRINT DC V(3) I(D1) V(1,2) V(3,4) V(2,3)
OPTIONS NOPAGE
.END
```

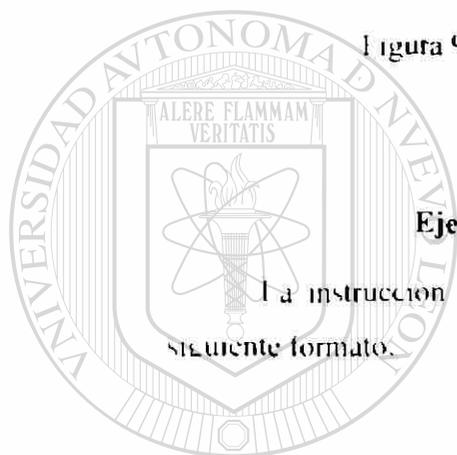
**** PARAMETROS DEL MODELO DEL DIODO

DI
IS 2.000000E-15

**** DI CURVAS DE CD TEMPLRATURA 27 000 DFG C

VF1	V(3)	I(D1)	V(1,2)	V(3,4)	V(2,3)
1.000E+01	-4.455E-01	2.070E-03	9.730E+00	4.554E+00	7.155E-01

Figura 9.9 Archivo de salida para la red de la figura 9.7



Ejemplo de análisis de un circuito con transistor BJT

La instrucción de Pspice para introducir los elementos del transistor tiene el siguiente formato:

Q1 3 1 4 QN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

nombre C B I nombre

del modelo

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

La Q se requiere para identificar el dispositivo como un transistor. El número 1 es el nombre escogido para el transistor, aunque puede incluir siete caracteres (entre números y letras). Las terminales se introducen en el orden antes mencionado.

La última entrada es el nombre del modelo para dirigir el paquete de programación al sitio de los parámetros que definen al transistor, esto es

.MODFL	QN	NPN	(BF 140 IS 2E-15)
	~	~	
	nombre	tipo	paramteros para
	del modelo		especificarse

La lista de parametros que aparece en el manual de Pspice es bastante extensa y de hecho incluye 40 terminos. para nuestras necesidades hay dos parametros que requieren especificarse estos son el valor de Beta, referido como BF, y la corriente de saturacion inversa IS.

La red del ejemplo 6.3 se ha vuelto a dibujar en la figura 9.10 con la seleccion de los nodos para el analisis con el programa Pspice. El archivo de entrada para la red aparece en la figura 9.11. Si se requieren cantidades especificas tales como $I(RC)$, I_C y $V(3,4) = V_{CE}$ en vez de un simple listado de todos los voltajes en los nodos, se puede agregar una proposicion de control DC como se indica en la figura 9.11.

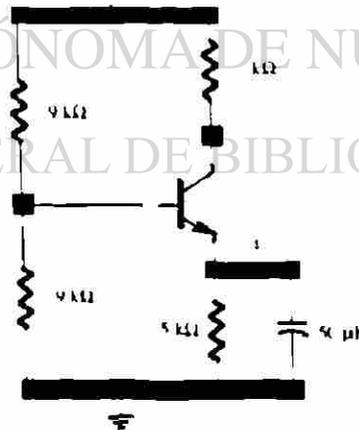


Figura 9.10 Red para analisis mediante el programa Pspice

Polarización de cd del BJT de la figura 9.10

```

VCC 2 0 22V
R1 2 1 39K
R2 1 0 3.9K
RC 2 3 10K
RE 4 0 1.5K
CE 0 4 50UF
Q1 3 1 4QN
MODEL QN NPN (BF 140 IS 2E-15)
.DC VCC 22 22 1
PRINT DC I(RC) V(3,4)
.OPTIONS NOPAGE
END

```

Figura 9.11 Archivo de entrada para la red de la figura 9.10

La proposición PRINT puede escribirse después para especificar las cantidades en el listado del archivo de salida, este aparece en la figura 9.12 con la lista de parámetros del modelo especificados y los niveles de salida deseados tanto I_{CQ} como V_{CEQ} . Los resultados obtenidos utilizando el Pspice coinciden con las soluciones del ejemplo 6.3, esto es $I_{CQ} = 8.5121 \times 10^{-4} = 0.8512 \text{ mA}$ y $V_{CEQ} = 1.2201 \times 10^1 = 12.2 \text{ V}$.

Polarización de cd del BJT de la figura 9.10

```

VCC 2 0 22V
R1 2 1 39K
R2 1 0 3.9K
RC 2 3 10K
RE 4 0 1.5K
CE 4 0 50UF
Q1 3 1 4QN

```

```

MODEL QN NPN (BF 140 IS 2E-15)
DC VCC 22 22 1
PRINT DC I(RC) V(3,4)
OPTIONS NOPAGE
END

```

```

**** PARAMTEROS DEL MODELO BJT

```

```

QN

```

```

NPN

```

```

IS 2 00000E-15

```

```

BF 140

```

```

**** CURVAS DE TRANSFERENCIA DE DC

```

```

VCC I(RC) V(3,4)

```

```

2 200E+1 8.51E-04 1 220E+01

```

```

**** TEMPRATURA 27 000 DEG C

```

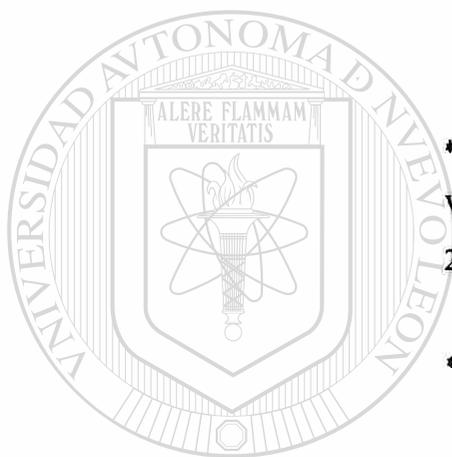


Figura 9.12 Archivo de salida para el análisis de Pspice de la red de la figura 9.10

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Ejemplo de análisis de un circuito con JFET



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

El análisis por computadora de un JFET en el programa Pspice existe un formato específico que debe emplearse para introducir con propiedad los parámetros de JFET. Para un dispositivo canal-n o canal-p el formato es el siguiente:

```

J1 3 1 4 JN
nombre D G S nombre
del modelo

```

La J es una designación del JFET con el número 1 como el nombre escogido, el nombre del modelo debe introducirse para proporcionar un sitio que definirá los parámetros del JFET, este sería el siguiente

MODEL JN NJF(VTO -4V,BF TA 5F-3)

La NJF especifica un JFET de canal-n, mientras que PJF un JFET de canal-p. La elección de los parámetros pueden enumerarse hasta 14, en nuestro caso de análisis bastara con solamente dos los cuales son VTO que es el voltaje de umbral que se especifica como V_p y BF TA que no es la β definida para los transistores BJT sino que se determina mediante la siguiente ecuación:

$$BI TA = \frac{I}{V'}$$

Por ejemplo, si $V_p = -4$ V e $I_{DSS} = 8$ mA se obtendrían $VTO = -4$ V y $BI TA = 0.5 \times 10^{-1}$ V, ambas proposiciones aparecerán en un análisis de Pspice.

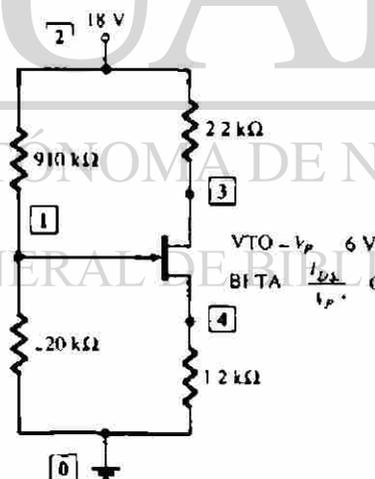


Figura 9.13 Circuito del ejemplo con JFET con los nodos definidos

El siguiente circuito de la figura 9.13 contiene un JFET en la configuración de divisor de voltaje. El enfoque con Pspice es similar al empleado para en el BJT. En la figura 9.13 se tienen los nodos definidos, en la figura 9.14 se describe el análisis Pspice

para la configuración JFET de la figura 9.13. El voltaje se le da como $V(1,4)$ es V_s y la corriente $I(RD)$ es I_x , esto es $V_s = -1.57\text{ V}$ y la $I_x = 4.23\text{ mA}$.

Polarización de cd del JFET de la figura 9.13

```
VDD 2 0 18V
R1 2 1 910K
R2 1 0 220K
RD 2 3 2.2K
RS 4 0 1.2K
J1 3 1 4JN
.MODEL JN NJF(VTO =6V BETA =222E-3)
.DC VDD 18 18 1
.PRINT DC V(1,4) I(RD)
.OPTIONS NOPAGE
END
```

**** PARAMETROS DEL MODELO JFET

JN
NJF

VTO =-6
BETA =222.000000E-6

**** CURVAS DE TRANSFERENCIA DE CD

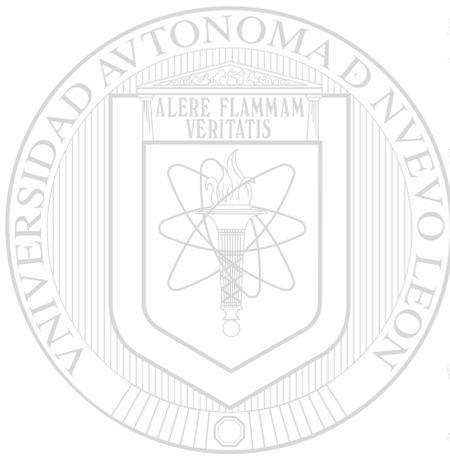
VDD V(1,4) I(RD)

1.80E+01 1.57E-01 4.23E-2

**** TEMPERATURA 27.000 DEG C

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Figura 9.4 Archivo de salida para la red de la figura 9.13



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



CAPITULO 10

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo tuvo su origen en una problemática existente en instituciones de educación superior en las áreas de ingeniería en electrónica y comunicaciones.

Elas tienen el compromiso de crear profesionales egresados de las carreras relacionadas con la ingeniería electrónica que sean capaces no solo de contar con los conocimientos más nuevos sobre su especialidad, sino reafirmar bases establecidas y poder adaptarse a los cambios tan rápidos en estas disciplinas.

Para satisfacer los perfiles ideales de los egresados, las universidades deben de invertir demasiado dinero en infraestructura para las carreras en esta área.

Con el propósito de contribuir en algo a la solución parcial de la problemática planteada, se propuso en este trabajo la simplificación de las actividades de análisis y solución de algunos circuitos electrónicos.

Se establecieron los aspectos más básicos del análisis de circuitos electrónicos por computadora usando un paquete de software (Pspice).

10.2 RECOMENDACIONES

El campo de la electrónica analógica es muy amplio. Este trabajo se limitó al análisis de circuitos electrónicos con diodos con entradas de cd y ca, transistores bipolares y transistores de efecto de campo en un análisis de corriente directa, por lo que es factible extenderse en los siguientes tópicos:

- Análisis de señal de circuitos con transistores bipolares y de efecto de campo y sus respuestas en frecuencia
- Circuitos amplificadores multietapa
- Circuitos amplificadores operacionales
- Simulación de circuitos electrónicos en su análisis transitorio con Pspice

Nota:

Los autores de esta tesis cuentan con un formato de preguntas y problemas propuestos así como sus respuestas, si el interesado requiere de más información comunicarse a psilva@gama.fime.uanl.mx

hfiguero@gama.fime.uanl.mx

BIBLIOGRAFIA

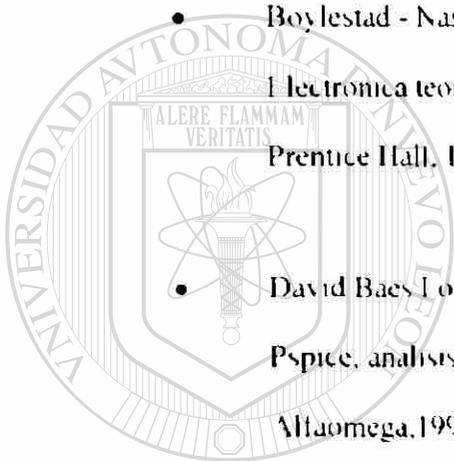
- Albert Paul Malvino
Principios de Electronica
Mc Graw Hill, 1989

- Boylestad - Nashelsky
Electronica teoria de circuitos
Prentice Hall, 1996

- David Baes Lopez
Pspice, analisis de circuitos por computadora
Alfaomega, 1995

- Savant - Carpenter - Roden
Diseño Electronico
Addison-Wesley, Iberoamericana, 1991

- Schilling - Belove
Circuitos Electronicos Discretos e Intergrados
Mc Graw Hill, 1989



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTADO DE TABLAS

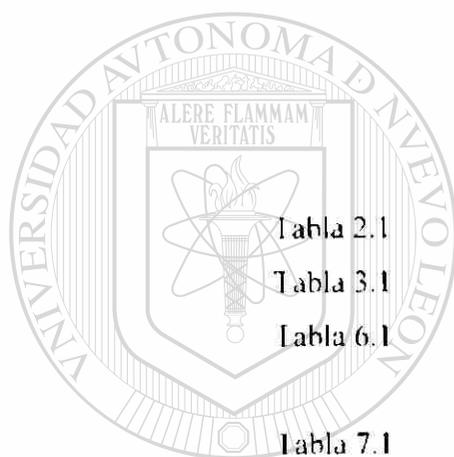


Tabla 2.1	Niveles de resistencia	23
Tabla 3.1	Hoja de especificaciones del diodo	59
Tabla 6.1	Hoja de especificaciones del transistor bipolar BJT 2N4123	122
Tabla 7.1	Relacion de V_{GS} en funcion de I_D	132
Tabla 7.2	Resumen de configuracion de polarizaciones	193
Tabla 7.3	Hoja de especificaciones JFET canal-n 2N5457	194
Tabla 7.4	Hoja de especificaciones MOSFET tipo decremental canal-n 2N3797	195
Tabla 7.5	Hoja de especificaciones MOSFET tipo incremental canal-n 2N4351	196

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1-	Definición de las unidades métricas de resistividad	4
Figura 2.2-	Estructura de un solo cristal de germanio y silicio	5
Figura 2.3-	Estructura atómica de germanio y silicio	6
Figura 2.4-	Unión covalente del átomo de silicio	6
Figura 2.5-	Niveles de energía	7
Figura 2.6-	Impurezas de boro en el material tipo-p	9
Figura 2.7-	Impurezas de antimonio en el material tipo-n	9
Figura 2.8-	Flujo de electrones en función del flujo de huecos	10
Figura 2.9a-	Material tipo-n	11
Figura 2.9b-	Material tipo-p	11
Figura 2.10-	Unión p-n sin polarización externa	12
Figura 2.11-	Diodo semiconductor sin polarización	12
Figura 2.12-	Unión p-n con polarización inversa	13
Figura 2.13-	Unión p-n con polarización directa	13
Figura 2.14-	Características del diodo semiconductor de silicio	14 [®]
Figura 2.15-	Comparación de diodos semiconductores Si y Ge	15
Figura 2.16-	Determinación de la resistencia estática	16
Figura 2.17-	Gráfica del ejemplo 2.1	17
Figura 2.18-	Definición de la resistencia dinámica o en ac	18
Figura 2.19-	Determinación de la resistencia en ac en un punto Q	18
Figura 2.20-	Gráfica del ejemplo 2.2	19
Figura 2.21-	Determinación de la resistencia en ac promedio entre los límites indicados	22
Figura 3.1-	Configuración de diodo en serie, circuito y característica	24
Figura 3.2-	Recta de carga y selección de punto de operación	25

Figura 3.3a - Circuito del ejemplo 3.1	26
Figura 3.3b.- Características del ejemplo 3.1	26
Figura 3.4 - Solución del ejemplo 3.1	27
Figura 3.5.- Circuito para el ejemplo 3.2	28
Figura 3.6.- Circuito para el ejemplo 3.3	28
Figura 3.7.- Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3	29
Figura 3.8 - Circuito para el ejemplo 3.4	29
Figura 3.9 - Estado del diodo para la red de la figura 3.8	30
Figura 3.10.- C cantidades desconocidas para la red de la figura 3.8	30
Figura 3.11 - Red para el ejemplo 3.3	31
Figura 3.12.- Determinación de las cantidades desconocidas para el ejemplo 3.3	31
Figura 3.13 - Circuito para el ejemplo 3.6	32
Figura 3.14 - Determinación de las cantidades desconocidas del ejemplo 3.6	32
Figura 3.15.- Circuito rectificador de media onda	33
Figura 3.16 - Región de conducción ($0 \rightarrow \Gamma/2$)	33
Figura 3.17 - Región de no conducción ($\Gamma/2 \rightarrow \Gamma$)	34
Figura 3.18.- Señal rectificadora de media onda	34
Figura 3.19 - Efecto de V_s sobre la señal rectificadora de media onda	35
Figura 3.20.- Circuito para el ejemplo 3.7	36
Figura 3.21.- V_o resultante para el circuito del ejemplo 3.7	36
Figura 3.22 - Efecto de V_T sobre la salida de la figura 3.21	37
Figura 3.23 - Determinación del PIV	38
Figura 3.24 - Circuito rectificador de onda completa	39
Figura 3.25 - Red para el periodo de ($0 \rightarrow \Gamma/2$)	39
Figura 3.26.- Red de conducción para la región positiva	39
Figura 3.27 - Red de conducción para la región negativa	40
Figura 3.28 - Forma de onda de entrada y salida	40
Figura 3.29.- Determinación de V_{s3} para la configuración puente	41
Figura 3.30 - Determinación del PIV	41
Figura 3.31 - Circuito rectificador con derivación central	42
Figura 3.32 - Condiciones de la red para la región positiva	43

Figura 3.33.- Condiciones de la red para region negativa	43
Figura 3.34.- Red puente para el ejemplo 3.8	44
Figura 3.35.- Red de la figura 3.34 para la region positiva	44
Figura 3.36.- Red redibujada de la figura 3.35	44
Figura 3.37.- Grafica de salida del ejemplo 3.38	45
Figura 3.38.- Circuitos recortadores en serie	46
Figura 3.39.- Circuito recortador en serie con una fuente de cd	47
Figura 3.40.- Determinacion de v	47
Figura 3.41.- Determinacion de los niveles de v	47
Figura 3.42.- Determinacion de v cuando $v < V$	48
Figura 3.43.- Dibujo para v	48
Figura 3.44.- Recortador en serie para el ejemplo 3.9	49
Figura 3.45.- v con el diodo encendido	49
Figura 3.46.- Determinacion del nivel de transicion de la figura 3.43	49
Figura 3.47.- Dibujo de v para el ejemplo 3.9	50
Figura 3.48.- Señal aplicada para el ejemplo 3.10	50
Figura 3.49.- v a $v = +20$ V	51
Figura 3.50.- v a $v = -10$ V	51
Figura 3.51.- Dibujo de v	51
Figura 3.52.- Respuesta de un recortador en paralelo	51
Figura 3.53.- Señal de entrada y circuito del ejemplo 3.11	52
Figura 3.54.- v para la region negativa de v	52
Figura 3.55.- Determinacion del nivel de transicion del ejemplo 3.11	53
Figura 3.56.- Determinacion de v para el circuito abierto del diodo	53
Figura 3.57.- Dibujo de v para el ejemplo 3.11	53
Figura 3.58.- Circuito cambiador de nive	54
Figura 3.59.- Diodo en encendido capacitor cargando a V volts	55
Figura 3.60.- Determinacion de v para el diodo en apagado	55
Figura 3.61.- Grafica de v para la red de la figura 3.57	55
Figura 3.62.- Señal de entrada circuito para el ejemplo 3.12	57
Figura 3.63.- Determinacion de v y V con el diodo encendido	58

Figura 3.64.-	Determinacion de v_c con el diodo apagado	58
Figura 3.65.-	v_1 y v_2 para el cambiador de nivel de la figura 3.64	58
Figura 4.1.-	Diodo ideal, simbolo curva caracteristica	60
Figura 4.2.-	Estados de conduccion y no-conduccion del diodo ideal	61
Figura 4.3a.-	Circuito equivalente simplificado para el diodo semiconductor de silicio	63
Figura 4.3b.-	Diodo ideal y sus caracteristicas	63
Figura 4.4a.-	Diodo zener encendido	63
Figura 4.4b.-	Diodo zener apagado	63
Figura 4.5.-	Region zener	64
Figura 4.6.-	Regulador zener basico	65
Figura 4.7.-	Determinacion del estado del diodo zener	65
Figura 4.8.-	Circuito equivalente zener cuando esta encendido	66
Figura 4.9.-	Circuito del ejemplo 4.1	67
Figura 4.10.-	Circuito equivalente del ejemplo 4.1	67
Figura 4.11.-	Punto de operacion resultante de la figura 4.10	69
Figura 4.12.-	Determinacion de V_o para el regulador de la figura 4.10	69
Figura 4.13.-	Diodo de portadores calientes o de barrera de superficie	69
Figura 4.14.-	Comparacion de curvas caracteristicas del diodo Schottky y de union p-n	69
Figura 4.15.-	Circuito equivalente diodo Schottky	71
Figura 4.16.-	Circuito equivalente aproximado	71
Figura 4.17.-	Caracteristica del varicap	72
Figura 4.18.-	Circuito equivalente en la region de polarizacion inversa y simbolos	73
Figura 4.19.-	Caracteristica del diodo tunel	74
Figura 4.20.-	Circuito equivalente y simbolos del diodo tunel	75
Figura 4.21.-	Arreglo de polarizacion basico construccion y simbolo fotodiodo	75
Figura 4.22.-	Caracteristicas del fotodiodo	76
Figura 4.23.-	Caracteristicas de f_c para el fotodiodo	76
Figura 5.1a.-	Transistor tipo pnp	77

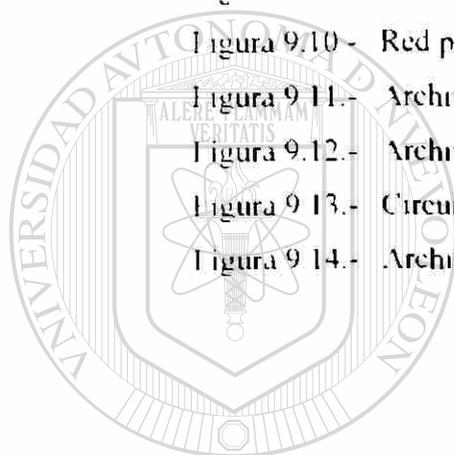
Figura 5.1b	Transistor tipo npn	77
Figura 5.2.-	Union con polarizacion directa de un transistor pnp	78
Figura 5.3	Union con polarizacion inversa de un transistor pnp	79
Figura 5.4 -	Flujo de portadores mayoritarios y minoritarios	79
Figura 5.5a.-	Circuito de configuracion pnp	81
Figura 5.5b	Circuito de configuracion npn	81
Figura 5.6.-	Caracteristicas de entrada de base-comun	81
Figura 5.7.-	Caracteristicas de salida del base-comun	81
Figura 5.8.-	Polarizacion del transistor pnp en base-comun	83
Figura 5.9.-	Accion basica de amplificacion de voltaje de base comun	84
Figura 5.10.-	Notacion y simbolos de la configuracion emisor-comun en un npn y pnp	85
Figura 5.11a	Caracteristica de salida para emisor-comun	86
Figura 5.11b	Caracteristica de entrada para emisor-comun	86
Figura 5.12 -	Notacion y simbolos de la configuracion colector comun	88
Figura 5.13.-	Grafica de la region lineal de operacion para un transistor	89
Figura 6.1.-	Puntos de operacion dentro de los limites de operacion del transistor	97
Figura 6.2.-	Circuito de polarizacion fija	94
Figura 6.3.-	Equivalente del circuito de la figura 6.2	94
Figura 6.4 -	Circuito para la malla base emisor	94
Figura 6.5.-	Circuito de malla colector emisor	95
Figura 6.6.-	Circuito de polarizacion fija para el ejemplo 6.1	96
Figura 6.7a.-	Circuito para el analisis de la recta de carga	97
Figura 6.7b.-	Curvas caracteristicas de salida	98
Figura 6.8.-	Grafica de la recta de carga	98
Figura 6.9 -	Grafica del punto Q con niveles crecientes de I_B	99
Figura 6.10 -	Grafica de niveles crecientes de R	99
Figura 6.11 -	Grafica para niveles pequenos de V	100
Figura 6.12.-	Circuito de polarizacion con resistencia de emisor	100
Figura 6.13 -	Malla base emisor	100

Figura 6.14 - Circuito equivalente para la corriente I_B	101
Figura 6.15 - Circuito con reflexion de impedancia R_i	101
Figura 6.16 - Malla de colector a emisor	102
Figura 6.17 - Circuito para el ejemplo 6.2	103
Figura 6.18.- Grafica de la recta de carga	105
Figura 6.19 - Circuito de polarizacion por divisor de voltaje	106
Figura 6.20.- Grafica del punto Q	106
Figura 6.21.- Redibujo de la malla de entrada de la figura 6.19	106
Figura 6.22.- Circuito para la R_{th}	107
Figura 6.23.- Circuito para el V_{th}	107
Figura 6.24.- Circuito equivalente Thevenin	108
Figura 6.25 - Circuito para el ejemplo 6.3	109
Figura 6.26.- Circuito para calcular el voltaje de base aproximado	109
Figura 6.27.- Circuito con retroalimentacion de voltaje	112
Figura 6.28.- Malla base emisor para la figura 6.27	113
Figura 6.29.- Malla colector emisor para la figura 6.27	114
Figura 6.30.- Circuito para el ejemplo 6.5	114
Figura 6.31.- Circuito para el ejemplo 6.6	116
Figura 6.32.- Circuito para el ejemplo 6.7	117
Figura 6.33.- Circuito para el ejemplo 6.8	119
Figura 6.34.- Determinacion de la R_i	119
Figura 6.35.- Determinacion del V_{th}	119
Figura 6.36.- Sustitucion del circuito equivalente Thevenin	121
Figura 7.1a - Transistores controlados por corriente	123
Figura 7.1b - Transistores controlados por voltaje	123
Figura 7.2 - Transistor de efecto de campo de union (JFET)	125
Figura 7.3 - JFET con $V_{GS} = 0 V$ y $V_{DS} = 0 V$	125
Figura 7.4 - Potenciales variables de polarizacion inversa	125
Figura 7.5 - Grafica de I_D en funcion de V_{DS} para $V_{GS} = 0 V$	127
Figura 7.6 - Estrechamiento del JFET ($V_{GS} = 0 V$, $V_{DS} = V_P$)	127
Figura 7.7.- JFET con aplicacion de voltaje negativo a la entrada	128

Figura 7.8.- Características del JFET canal n	128
Figura 7.9.- JFET canal p	129
Figura 7.10.- Características del JFET canal p	129
Figura 7.11.- Símbolos de JFET canal n y p	130
Figura 7.12.- Curva de transferencia para las características de drenador	132
Figura 7.13.- Curva de transferencia para el ejemplo 7.1	136
Figura 7.14.- MOSFET tipo decremental canal n	137
Figura 7.15.- MOSFET tipo decremental con $V_{GS} = 0V$ y $V_{DS} = 0V$	137
Figura 7.16.- Curvas de transferencia para las características de drenaje	138
Figura 7.17.- Reducción de portadores libres en el canal por potencial negativo	139
Figura 7.18.- Características de transferencia del MOSFET	140
Figura 7.19.- MOSFET tipo decremental canal p	141
Figura 7.20.- Símbolos del MOSFET decremental tipo n y p	142
Figura 7.21.- MOSFET tipo incremental canal n	143
Figura 7.22.- Formación del canal en el MOSFET incremental	144
Figura 7.23.- Cambio de la región de agotamiento y el canal	145
Figura 7.24.- Características de drenador	146
Figura 7.25.- Curva de transferencia para características de drenador	148
Figura 7.26.- MOSFET tipo incremental canal p	148
Figura 7.27.- Símbolos del MOSFET incremental tipo p y tipo n	149
Figura 8.1.- Configuración de polarización fija	152
Figura 8.2.- Malla de entrada	152
Figura 8.3.- Circuito para el ejemplo 8.1	154
Figura 8.4.- Solución gráfica para la figura 8.3	155
Figura 8.5.- Configuración de autopolarización	156
Figura 8.6.- Malla de entrada	157
Figura 8.7.- Definición de un punto sobre la curva de transferencia	158
Figura 8.8.- Trazo de la recta de autopolarización	159
Figura 8.9.- Circuito para el ejemplo 8.2	160
Figura 8.10.- Trazo de la recta para la figura 8.9	161
Figura 8.11.- Característica para el JFET de la figura 8.9	162

Figura 8.12.- Punto Q para la figura 8.9	162
Figura 8.13.- Grafica de ejemplo 8.3	163
Figura 8.14 - Circuito del ejemplo 8.4	164
Figura 8.15.- Circuito equivalente de la figura 8.14	165
Figura 8.16.- Punto Q para la figura 8.14	166
Figura 8.17.- Polarizacion por divisor de voltaje	168
Figura 8.18.- Redibujo de la figura 8.17	168
Figura 8.19 - Trazo de la ecuacion de la red por divisor de voltaje	169
Figura 8.20.- Efecto de R_s sobre el punto Q	170
Figura 8.21.- Circuito para el ejemplo 8.5	171
Figura 8.22.- Punto Q para la figura 8.21	172
Figura 8.23.- Circuito para el ejemplo 8.6	173
Figura 8.24.- Calculo de la ecuacion de la figura 8.23	174
Figura 8.25.- Determinacion del punto Q para la figura 8.23	175
Figura 8.26.- Circuito para el ejemplo 8.7	177
Figura 8.27.- Calculo del punto Q para la figura 8.26	179
Figura 8.28.- Grafica para el ejemplo 8.8	180
Figura 8.29.- Circuito para el ejemplo 8.9	181
Figura 8.30.- Calculo del punto Q para la figura 8.29	182
Figura 8.31 - Circuito para el ejemplo 8.10	183
Figura 8.32.- Caracteristica de transferencia del MOSFET incremental	184
Figura 8.33.- Circuito de polarizacion por retroalimentacion	185
Figura 8.34.- Circuito equivalente para la figura 8.33	185
Figura 8.35.- Calculo del punto Q para la figura 8.33	186
Figura 8.36.- Circuito para el ejemplo 8.11	187
Figura 8.37 - Curva de transferencia del MOSFET de la figura 8.36	188
Figura 8.38.- Calculo del punto Q para la figura 8.36	189
Figura 8.39 - Polarizacion por divisor de voltaje del MOSFET incremental canal-n	190
Figura 8.40 - Circuito para el ejemplo 8.12	191
Figura 8.41 - Determinacion del punto Q para el ejemplo 8.12	192

Figura 9.1.-	Designaciones de los elementos	203
Figura 9.2.-	Ejemplo de un circuito con componentes pasivos	204
Figura 9.3.-	Designaciones de los elementos activos	205
Figura 9.4.-	Ejemplo de un amplificador con transistor	205
Figura 9.5.-	Utilización de las proposiciones MODIFI	208
Figura 9.6.-	Ejemplo de una fuente de corriente dependiente	210
Figura 9.7.-	Circuito para el ejemplo con diodo	215
Figura 9.8.-	Archivo de entrada para la red de la figura 9.7	216
Figura 9.9.-	Archivo de salida para la red de la figura 9.7	218
Figura 9.10.-	Red para análisis mediante el programa Pspice	220
Figura 9.11.-	Archivo de entrada para la red de la figura 9.10	221
Figura 9.12.-	Archivo de salida de la red de la figura 9.10	221
Figura 9.13.-	Circuito del ejemplo con J1E1 con nodos definidos	223
Figura 9.14.-	Archivo de salida de la red de la figura 9.13	224



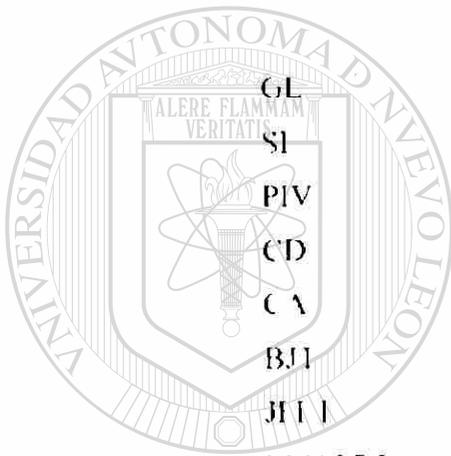
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

GLOSARIO



GL

Germanio

SI

Silicio

PIV

Voltaje de pico inverso

CD

Corriente directa

CA

Corriente alterna

BJT

Transistor bipolar de unión

JFET

Transistor de efecto de campo de unión

MOSFET

Transistor de efecto de campo metal óxido silicio

IGBT

Transistor de efecto de campo de compuerta aislada

PSPICE

Programa de Simulación con Énfasis en Circuitos

Integrados

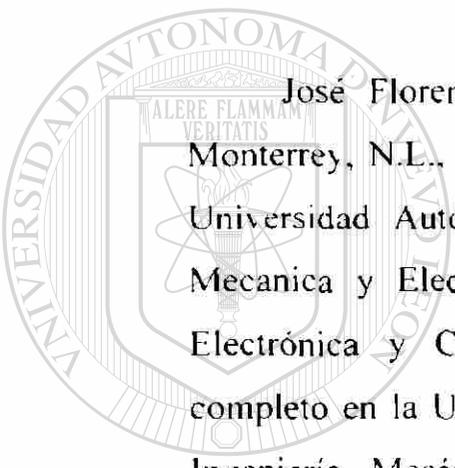
V_{TH}

Voltaje de umbral

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO


 José Florencio Silva García, nació el 15 de Abril de 1955 en Monterrey, N.L., Mexico, tiene nacionalidad mexicana, es egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en el año de 1980 con título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones. Labora como catedrático de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Nuevo León, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, impartiendo materias del área de electrónica, su tesis: **AUTOEVALUACIÓN Y COMPROBACIÓN DE CALIDAD DE APRENDIZAJE EN ELECTRÓNICA** es en opción al Grado de: **MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN ELECTRÓNICA**, sus padres son Florencio Silva Silva y Blanca García de Silva, su esposa es María Guadalupe Guajardo de Silva y sus hijos son: Jose Jesus Eddy Silva Guajardo, Sendy Ahani Silva Guajardo, Zaida Jackeline Silva Guajardo.

