

CAPÍTULO

2 EL DIODO SEMICONDUCTOR



2.1. UNIÓN P-N.

Si se ensambla un dispositivo de materiales p y n como consta en la figura, se está construyendo, aunque de forma muy ruda, un diodo de unión.

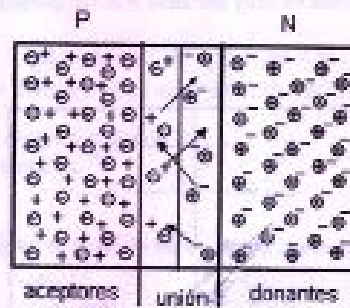
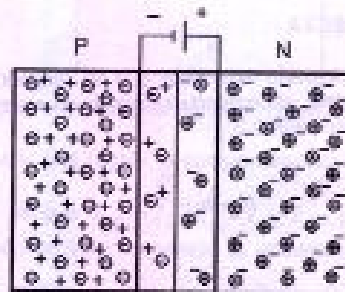


Figura 2.1 Unión de un material tipo n y p.

A una temperatura constante y en ausencia de un potencial eléctrico externo, tanto la región n como la región p son eléctricamente neutras. En primera instancia, existen solamente portadores tipo p a la izquierda de la unión y portadores tipo n a la derecha. Puesto que hay un fuerte gradiente de concentración a través de la unión, los huecos se difundirán a la derecha y los electrones libres a la izquierda de la unión, para recombinarse con los átomos del otro material.

A consecuencia de este desplazamiento de cargas, iones que aparecen a orillas de la unión formarán un dipolo eléctrico y producirán un campo electrostático, con la polaridad indicada en la figura 2.2. Dicho campo tenderá a equilibrar la difusión de electrones a través de la unión, hasta que sea lo bastante fuerte para detener dicho proceso en forma definitiva.



Cargas descubiertas

Figura 2.2 Diagrama de formación de un campo electrostático de un diodo por la unión n-p.

La zona de uniones producida a los dos lados de la unión se denomina zona desértica, puesto que carece de portadores activos, en tanto que el diferencial de potencial obtenido es conocido como *barra de potencial*. Dicho potencial puede ser sustituido imaginariamente por una fuente de voltaje V_b aumenta conforme aumenta también la cantidad de electrones libres y huecos que atraviesan la unión y se recombinan con los átomos del otro lado. El flujo de portadores mayoritarios de un lado a otro, sean estos huecos o electrones, producen una pequeña corriente llamada corriente de recombinación (I_r), la cual, como ya se mencionó, disminuye al aumentar V_b .

Existe también una corriente de portadores minoritarios, llamada corriente de generación térmica (I_g), que es mucho menor a la producida por los portadores mayoritarios, y que en esencia es muy sensible a la temperatura.

$$I_g = I_{g_n} + I_{g_p} \quad \text{o} \quad I_r = I_{r_n} + I_{r_p} \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

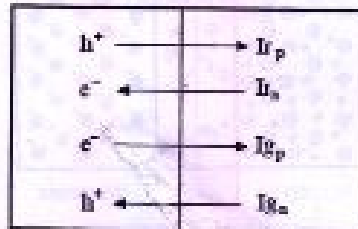


Tabla 2.1 Corrientes de recombinación y de generación térmica.

De esta manera se aprecia que los electrones libres se mueven de n a p (tabla 2.1), mientras que los huecos se mueven de p a n. Cabe señalar también que el sentido convencional que se adopta para la corriente, es el correspondiente al sentido de movimiento de los huecos, de modo que $I = I_r - I_g$.



Figura 2.3 Representación de un Diodo de Unión

2.2. POLARIZACIÓN DIRECTA

Con la física moderna se ha logrado demostrar que en condiciones de equilibrio y en ausencia de polarización externa, el comportamiento de un elemento como el diodo de unión viene regulado por la ecuación 2.2:

$$I_r = I_{r_0} e^{\frac{V_b}{V_t}} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Donde:

- I_r es la corriente de recombinación dada por el número real de portadores que atraviesan la barrera.

- I_0 es la corriente de recombinación inicial dada por el número neto de portadores que inician el camino a través de la unión.
- V_T es el voltaje térmico igual a 26 [mV], sea cual fuere el tipo de diodo usado; y
- V_0 es el voltaje de barrera descrito anteriormente, que tiene los valores aproximados de 0.6 [V] o 0.3 [V] dependiendo si el diodo es de silicio o germanio respectivamente.

Donde V_T viene dada por la ecuación 2.3:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad \text{(Ecuación 2.3)}$$

En la ecuación 2.3:

- k es la constante de Boltzman y su valor es $1.38 \times 10^{-16} \left[\frac{\text{Ergios}}{^{\circ}\text{K}} \right]$.
- T es la temperatura en grados Kelvin, y
- q es la carga de un electrón.

Como sabemos $I_r = I_g$ en el caso de no aplicar una tensión externa, tenemos:

$$I_g = I_{r_0} e^{\frac{V_0}{V_T}} = I_{sat} \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$

si aplicamos una tensión externa de modo que el ánodo del elemento se conecta al terminal positivo de una batería, y el cátodo al terminal negativo, estamos polarización directamente al diodo; y de acuerdo con eso:

$$I_r = I_{r_0} e^{\frac{(V_0 - V)}{V_T}} = I_{r_0} e^{\frac{V_0}{V_T}} e^{-\frac{V}{V_T}} = I_{sat} e^{-\frac{V}{V_T}} \quad \text{(Ecuación 2.5)}$$

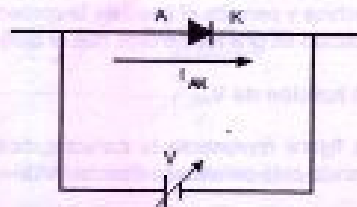


Figura 2.4 Diagrama Circuital de un diodo en polarización directa

La ecuación anterior es la que regula el comportamiento de un diodo en polarización directa.

Se había mencionado ya que $I_{ac} = I_r - I_g = I_r - I_{sat}$, por lo que al sustituir estos términos en la ecuación previa obtenemos la ecuación que es de nuestro mayor interés:

$$I_{AK} = I_{sat} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = I_{sat} e^{\frac{V}{V_T}} \quad \text{(Ecuación 2.6)}$$

si la relación $V/V_T > 5$.

En la realidad esta expresión no es completa, puesto que en la fabricación de un diodo de unión, se introducen ciertas resistencias internas que de alguna manera alteran el comportamiento ideal; de ellas se hablará en detalle mas adelante.

Desde el punto de vista atómico, cuando se aplica un potencial positivo al material p y un potencial negativo al material tipo n, se produce una disminución en el ancho de la zona desértica, esto trae como consecuencia que el flujo de portadores mayoritarios crezca exponencialmente, mientras que el flujo de los portadores minoritarios no se ve alterado.

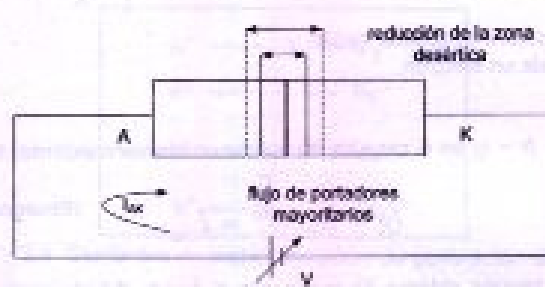


Figura 2.5 Diagrama esquemático del diodo en polarización directa

EN RESUMEN:

- La corriente de polarización directa se debe exclusivamente a los portadores mayoritarios.
- La corriente es siempre grandes en orden de los miliamperios [mA].
- La zona desértica se achica y permite el paso de la corriente eléctrica.
- Si la corriente ánodo-cátodo es grande se dice que el diodo es conductor.
- Variación de I_{AK} como función de V_{AK} .

La curva de la siguiente figura representa la característica estática de corriente – voltaje de un diodo real cuando está polarizado directamente.

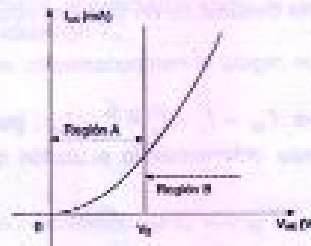


Figura 2.6 Curva Característica del diodo en polarización directa

V_b como ya se ha indicado, es el voltaje de barrera, conocido también como voltaje codo o voltaje umbral, y puede variar dentro de los siguientes intervalos:

Para el silicio	Entre 0.5 y 0.7 V
Para el germanio	Entre 0.2 y 0.3 V

Tabla 2.2 Voltaje Umbral para el Si y el Ge.

Para discusiones y análisis posteriores se considerará que el diodo de Si tiene un voltaje de barrera de 0.7 [V], en tanto que el diodo de Ge, un voltaje de 0.3 [V].

Es necesario resaltar el hecho de que la anterior curva está dividida en dos regiones principales: La zona a la izquierda del voltaje de barrera, la cual sigue un comportamiento exponencial, como el indicado por la ecuación general; y la zona a la derecha de voltaje de barrera, que es, mas bien, una región de comportamiento lineal.

2.3. POLARIZACIÓN INVERSA

Si al diodo de unión se le aplica un voltaje exactamente opuesto al voltaje exactamente opuesto al voltaje de polarización directa, decimos que el diodo está polarizado de manera inversa. A nivel atómico, lo que se produce es un a aplicación de la zona desértica; esto significa una mayor dificultad para los portadores mayoritarios de poder atravesar dicho potencial. Sin embargo el flujo de portadores minoritarios no ha cambiado, y se ha vuelto realmente significativo en comparación al pequeño número de portadores mayoritarios que pueden atravesar la zona desértica.

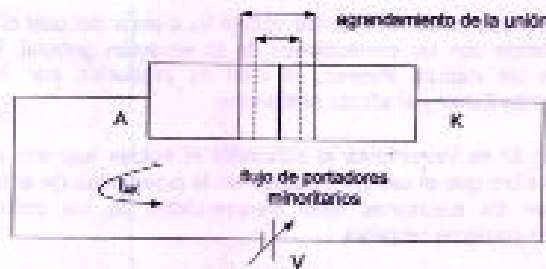


Figura 2.7 Apreciación de una Polarización Inversa

Esto explica matemáticamente de la siguiente manera:

$$I_r = I_{sa} e^{-\frac{V_b}{V_T}} = I_{sa} e^{-\frac{V_b}{V_T}} e^{-\frac{V}{V_T}} = I_{sa} e^{-\frac{V}{V_T}} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

Pero $I_{AK} = I_r - I_s = I_r - I_{sa}$, entonces:

$$I_{AK} = I_{sa} \left(e^{-\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Resulta evidente entonces que si $V/V_T > 5$, $I_{sc} \approx I_{sat}$.

- **Característica en la polarización Inversa.**

Al igual que en polarización directa es posible obtener una característica estática para un diodo real en polarización inversa.

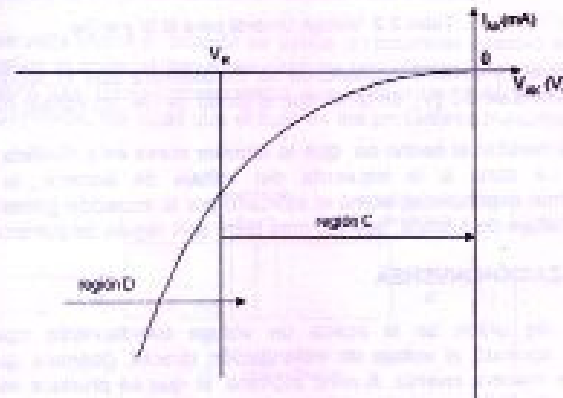


Figura 2.8 Curva de un diodo en polarización Inversa

Nótese la diferencia de escala respecto a la característica en polarización directa.

Obsérvese también que existe un valor de voltaje V_R a partir del cual el diodo ya no se comporta de acuerdo con las predicciones de la ecuación general. Este voltaje se denomina voltaje de ruptura inverso, el cual es producido por dos efectos de importancia: el efecto Zener y el efecto Avalancha.

- **Efecto Zener:** Si se incrementa lo suficiente el voltaje aplicado en polarización inversa, es posible que el campo eléctrico en la proximidad de la unión se vuelva tan fuerte que los electrones sean desprendidos de los enlaces covalentes generando una corriente negativa.
- **Efecto Avalancha:** Si los electrones se desprenden de sus átomos debido a un incremento en la temperatura o a la existencia de un potencial excesivamente alto, pueden ser acelerados a grandes velocidades mientras cruzan la unión. Esto produciría eventuales choques con otros electrones, que a su vez, se desprenderían de sus enlaces y se acelerarían hasta chocar con otros átomos y desprender sus electrones. Este efecto continuaría en forma de avalancha hasta producir una corriente considerable en el sentido negativo.

Ambos fenómenos ocurren generalmente a partir de los -5.5 V. Ahora, ya es posible contar con una característica estática para el diodo de unión, para el dominio del voltaje.

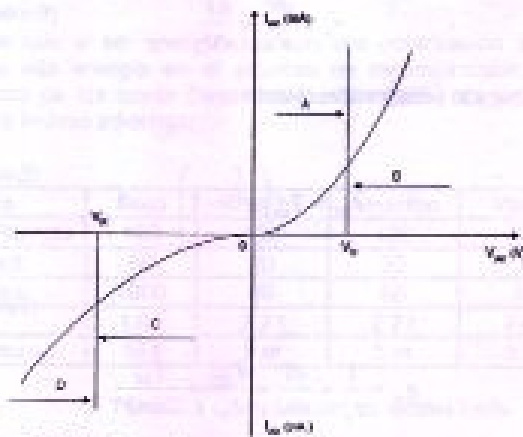


Figura 2.9 Regiones de un diodo en Polarización directa e inverso

• Resistencia Estática del Diodo (R_{ed}).

Al aplicar al diodo un voltaje conocido, estará automáticamente determinado la magnitud de la corriente que atraviesa por él. Esto es fácil de ver si nos referimos a la característica anterior.

Se define entonces como resistencia estática a la relación entre V_{DC} e I_{DC} .

$$R_{ed} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \text{(Ecuación 2.8)}$$

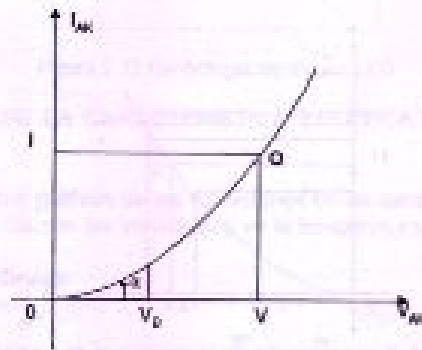


Figura 2.10 Resistencia estática de un diodo

Con esta relación, dados los valores de voltaje y corriente es posible sustituir al diodo por una resistencia de valor R_{ed} y proseguir al análisis del circuito.

• Resistencia Dinámica del Diodo (r_d).

Si el voltaje aplicado al diodo oscila alrededor de un valor DC, se obtendrá una variación constante del valor de R_{ed} . Esta variación corresponde a la siguiente expresión:

$$r_d = \frac{dV}{dI} \approx \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{Ecuación 2.9}$$

Dada la expresión para la polarización directa:

$$I_{DC} = I_{sat} \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \tag{Ecuación 2.10}$$

podemos obtener:

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \frac{dI}{dV} \approx \frac{I_{DC}}{V_T} = \frac{I_{DC}}{26mV} \tag{Ecuación 2.11}$$

Entonces:

$$r_d = \frac{26mV}{I_{DC}} \tag{Ecuación 2.12}$$

Debe entenderse entonces el significado de esta ecuación: "La resistencia dinámica del diodo puede obtenerse directamente si se conoce el valor DC de la corriente que atraviesa por él".

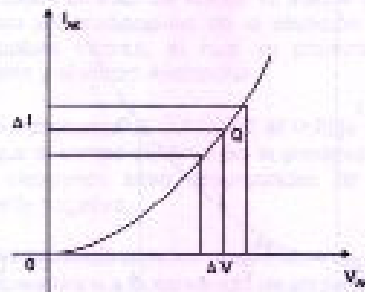


Figura 2.11 Representación de la resistencia dinámica de un diodo

2.4. DIODOS EMISORES DE LUZ

Existen en el mercado dispositivos optoelectrónicos como los diodos emisores de luz, comúnmente conocidos como LEDs.

Estos elementos son utilizados como indicadores en paneles electrónicos de control, sin ser esa ni la única, ni la más importante de sus aplicaciones. Los LEDs son generalmente fabricados con Arseniuro de Galio (GaAs), Fosfuro de Galio (GaP), o bien Fosfuro Arseniuro de Galio (GaAsP).

Estos materiales que al ser energizados con una polarización directa, desprenden fotones de muy alta energía en el proceso de recombinación, lo que a su vez proporciona haces de luz cuyas frecuencias están dentro de prácticamente todo el espectro visible e incluso infrarrojo.

Parámetro	Rojo	Rojo nF	Amarillo	Verde	Unidades
Disipación de Potencia	100	120	120	120	MW
I directa med.	50	20	20	30	mA
I directa pico	1000	60	60	60	mA
V codo	1.6 t	2.2 t	2.2 t	2.4 t	V
V inv. de ruptura	10 t	5 m	5 m	5 m	V

Tabla 2.3 Comparación de diodos Leds.

Donde:

- t significa valor típico.
- m significa valor mínimo.

Estos son los símbolos que convencionalmente se usan para en LED en un circuito.

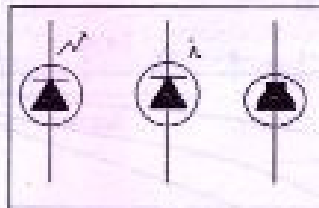


Figura 2.12 Simbología de diodos LED

2.5. DEPENDENCIA DE LA CARACTERÍSTICA ESTÁTICA DEL DIODO CON LA TEMPERATURA.

Obsérvese los siguientes gráficos de las variaciones en las características corriente – voltaje de un diodo de Ge con las variaciones en la temperatura.

Para la polarización directa:

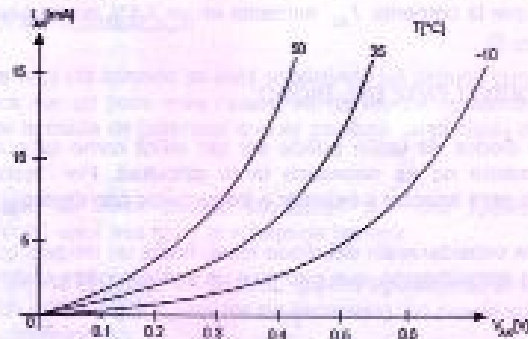


Figura 2.13 Curva de un diodo en polarización directa

Para polarización inversa y considerando solo el efecto Avalanche.

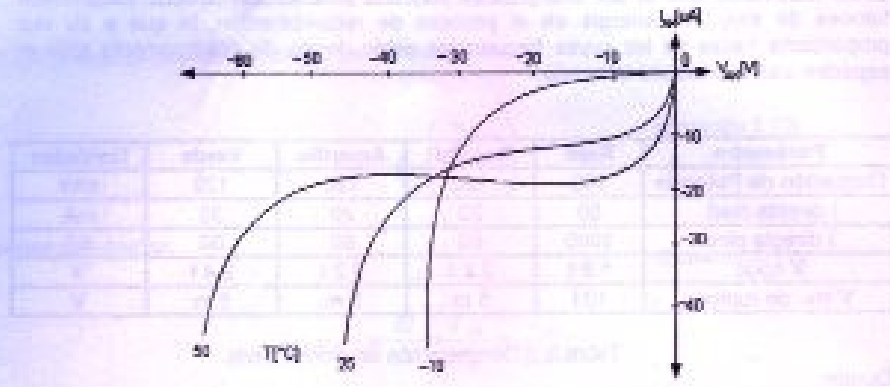


Figura 2.14 Efecto Zener respecto a la Temperatura

Para el efecto Zener:

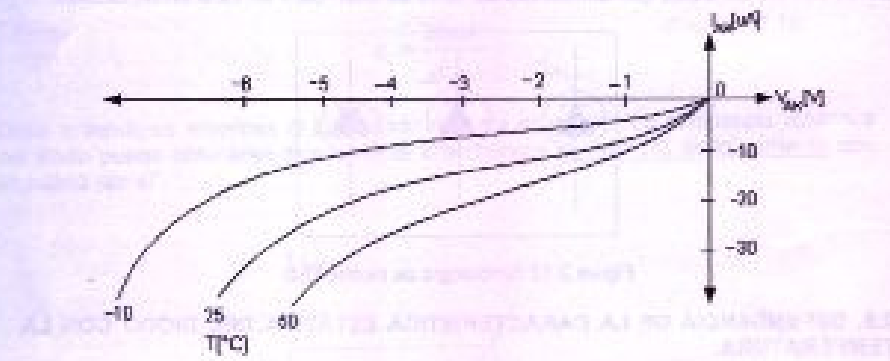


Figura 2.15 Efecto Zener respecto a la Temperatura

De todas estas gráficas, lo mas relevante es el hecho de que en polarización directa, por el incremento de temperatura en 1 [°C], el voltaje ánodo – cátodo (V_{AK}) disminuye en 2mV mientras que la corriente I_{AK} aumenta en un 7.5% aproximadamente, ya sea el diodo de Ge o de Si.

2.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO.

El análisis de los diodos de unión puede ser tan difícil como se quiera, pero en la técnica y la ingeniería no es necesaria tanta dificultad. Por esta razón existen diferentes modelos para analizar y estudiar a los circuitos con diodos.

Estos van desde la consideración del diodo ideal, hasta un modelo que abarca dos o tres parámetros de aproximación, que permiten un análisis más exacto de la situación.

Se debe tener en cuenta que el modelo más aproximado no siempre es el que incluye mayor número de cálculos, sino aquel que se adapte mejor al problema particular que se pretende resolver.

2.6.1 DIODO IDEAL

La visualización del diodo como un elemento ideal es siempre un buen camino para empezar el estudio del mismo.

El comportamiento de un diodo ideal se asemeja al comportamiento de un simple interruptor bipolar; es decir, cuando el voltaje aplicado es mayor que cero, el diodo actúa como un cortocircuito, y la corriente que circula por él será determinada por el resto de parámetros en la red; y por el contrario, cuando el voltaje aplicado es menor que cero, el diodo actúa como un circuito abierto, que es mismo que decir, que su corriente se reduce a cero.

Esta situación se ilustra en la figura 2.16:

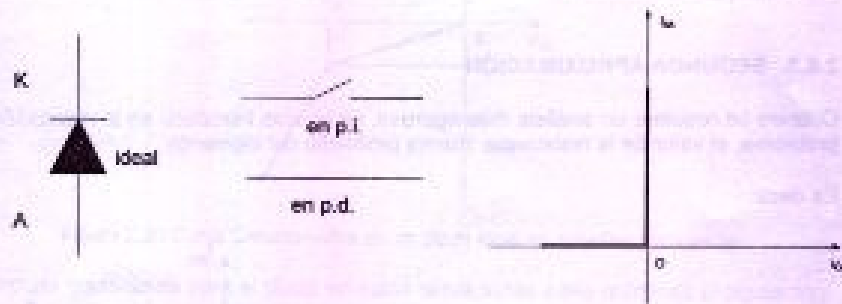


Figura 2.16 Representación de un Diodo Ideal y Curva Característica

En resumen: en polarización directa $V_{Dc} = 0V$, mientras que en polarización inversa $I_{Dc} = 0mA$.

2.6.2. PRIMERA APROXIMACIÓN

El diodo ideal es muy útil cuando se está analizando un circuito con un breve vistazo, pero si queremos ser un poco más reales, es de mucha conveniencia introducir en nuestros cálculos la caída de potencial que se produce en el diodo debido a la barrera de voltaje.

Esto significa que el diodo puede sustituirse por una fuente de voltaje (no independiente), cuyo valor sea igual al voltaje de barrera.

De este modo, cuando el voltaje en el diodo supere ligeramente al valor de V_D (0.7 V para los diodos de silicio o 0.3 V para los de germanio), se puede sustituir al elemento por la siguiente configuración:

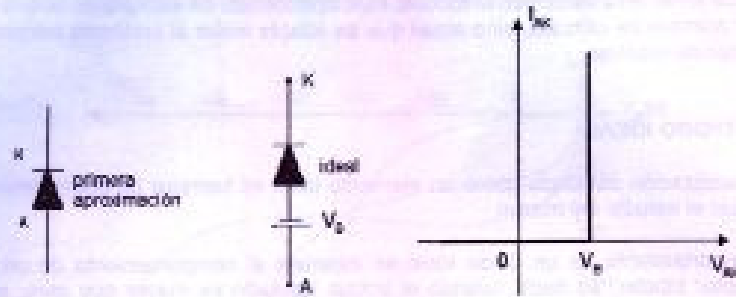


Figura 2.17 Equivalencia de un Diodo Ideal (Primera aproximación)

Nótese también que en polarización inversa el diodo sigue actuando como un circuito abierto.

Esta primera aproximación es útil cuando el voltaje en el diodo es comparable con el resto de voltajes en la red.

2.6.3. SEGUNDA APROXIMACIÓN

Cuando se requiere un análisis más riguroso, es posible introducir en la resolución del problema, el valor de la resistencia interna promedio del elemento.

Es decir:

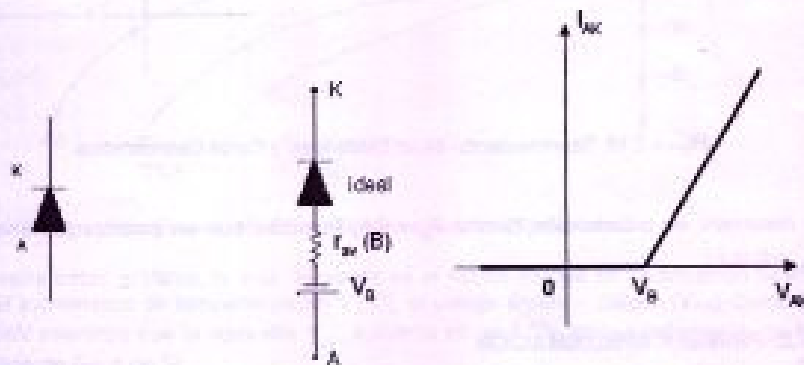


Figura 2.18 Equivalencia de un Diodo Ideal (Segunda aproximación)

Debe quedar claro que al ser superados los 0.7 [V] (o 0.3 V) del potencial de barrera, el diodo empieza a conducir, pero conforme aumentamos la corriente que circula por el elemento, se podrá verificar una ligera caída adicional de voltaje debido a la resistencia interna $r_{av}(b)$.

Este dato de resistencia interna es por lo general un dato que lo proporciona el fabricante, y que de no ser así, puede evaluarse con la siguiente expresión tomando a consideración dos puntos de la recta de la característica del elemento real:

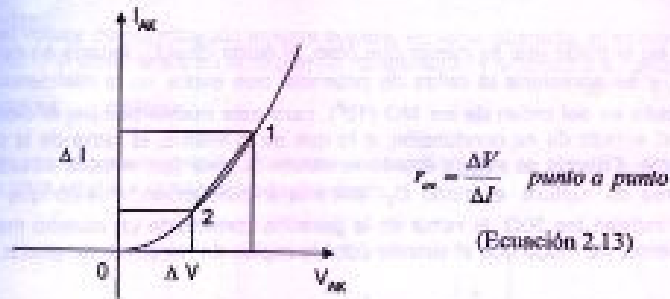


Figura 2.19 Recta característica de un diodo en polarización directa

Si el diodo está polarizado inversamente podemos aproximar la característica real de corriente – voltaje con la siguiente gráfica:

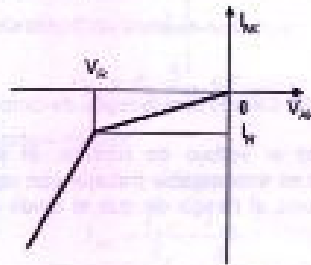


Figura 2.20 Curva Característica de un diodo ideal en polarización inversa

El circuito equivalente para el diodo en estas condiciones sería entonces el siguiente:

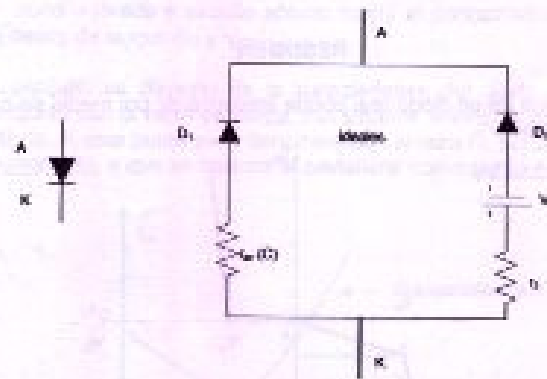


Figura 2.21 Circuito equivalente de un diodo en polarización inversa

Las resistencias $r_v(c)$ y r_s pueden ser obtenidas de la misma manera que $r_v(b)$. Aunque pueda parecer confuso, el resultado de este circuito equivalente es el siguiente:

Si el voltaje en el diodo real es menor que cero, el diodo ideal D_1 estaría en estado de conducción, y se apreciaría la caída de potencial que existe en la resistencia $r_w(c)$, que a propósito es del orden de los $M\Omega$ (10^6), para este mismo tiempo, el diodo ideal D_2 estaría en estado de no conducción, o lo que es lo mismo, la rama de la derecha estaría abierta. Cuando el voltaje ánodo - cátodo supere (en valores absolutos) el voltaje inverso de ruptura, el diodo D_2 entraría a conducción. Puesto que r_s tiene valores que rodean los 10Ω , la rama de la derecha constituiría un camino mas corto para la corriente, de modo que el circuito para la región de rompimiento puede quedar como:



Figura 2.22 Circuito para la región de rompimiento

Esto refleja que, superando el voltaje de ruptura, el diodo se vuelve un buen conductor. Debido a esto, no es aconsejable trabajar con voltajes inversos cercanos al voltaje V_R , puesto que se corre el riesgo de que el diodo entre en conducción en el sentido opuesto.

Esta segunda aproximación del diodo, tanto para polarización directa como inversa, es solo de utilidad cuando se requiere un análisis minucioso del circuito o cuando se está llevando a cabo un proceso de diseño; para la mayoría de aplicaciones es únicamente necesario utilizar la primera aproximación.

RESUMEN:

- La característica de un diodo real puede aproximarse por medio de cuatro segmentos lineales:

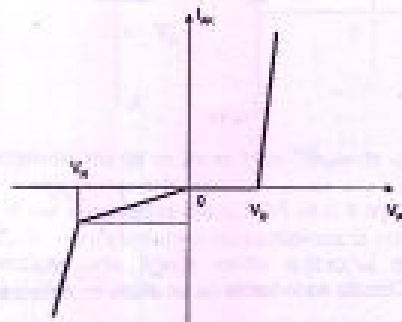


Figura 2.23 Curva de un diodo ideal

- En polarización directa, el diodo no conduce hasta superar el valor de V_F .

- Si el voltaje de polarización inversa supera, en valor absoluto, el voltaje inverso de ruptura, el diodo entra en la región de rompimiento y empezará a conducir.

2.7. RECTA DE CARGA

Obsérvese el siguiente circuito. Consideremos que V_{CC} es un voltaje suficientemente grande para producir la polarización del diodo.

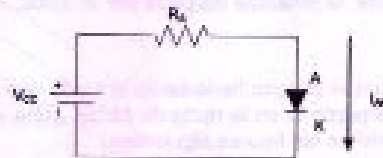


Figura 2.24 Diodo en polarización directa debido a V_{CC}

De acuerdo con la Ley de Kirchhoff de Voltajes tenemos:

$$V_{CC} = R_S \cdot I_{AK} + V_{AK} \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

Despejando la corriente ánodo - cátodo:

$$I_{AK} = \frac{V_{CC} - V_{AK}}{R_S} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Esta ecuación es conocida como la recta de carga del diodo en cuestión.

El significado de esta ecuación debe quedar bien claro; I_{AK} es una función de V_{AK} , con la que se determina el lugar geométrico de todos los valores posibles de voltaje y corriente en el diodo - desde el circuito abierto hasta el cortocircuito -, considerando los parámetros dados de la red: R_S y V_{CC} .

Por otro lado, también se dispone de la característica del diodo real, que al ser graficada en conjunto con la recta de carga, nos permite encontrar el punto exacto de operación del diodo. A este punto se lo denomina con la letra Q, por la palabra en latín que significa Quiescente, y que se traduce al castellano como punto en reposo.

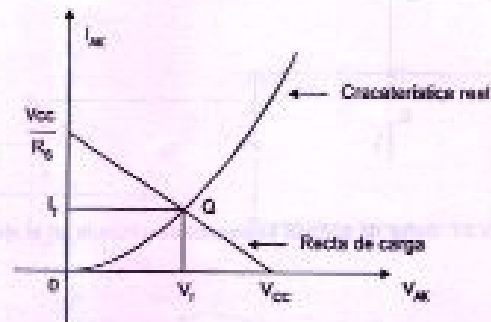


Figura 2.25 Recta de carga de un diodo

De este gráfico también se deduce que $R_{cd} = V_f / I_f$. (Ecuación 2.16)

La potencia entregada por la fuente $P_s = V_{cc} * I_f$, la potencia disipada por la carga

$P_L = I_f^2 * R_c$, y por lo tanto, la potencia disipada por el diodo: $P_D = P_s - P_L$.

Si consideramos ahora que el circuito tiene como entrada una señal sinusoidal con un nivel DC, haremos que el punto Q en la recta de carga, suba y baje de su posición de equilibrio, como se advierte en las figuras siguientes:

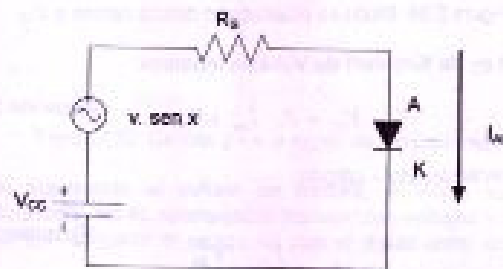


Figura 2.26 Polarización directa de un diodo con una fuente sinusoidal desplazada

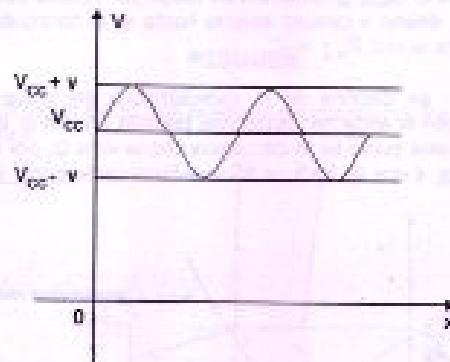


Figura 2.27 Señal de entrada sinusoidal desplazada en el eje positivo

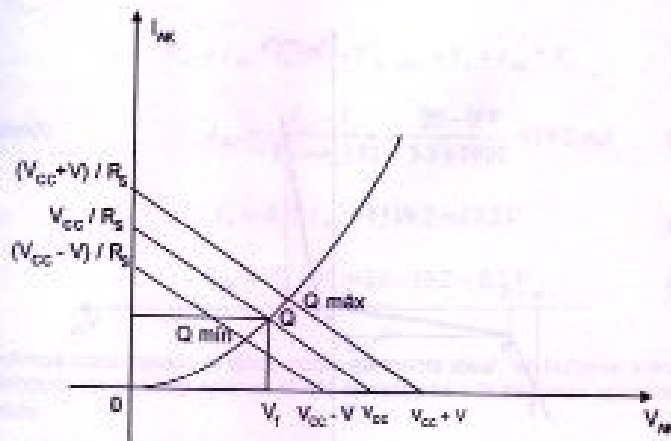


Figura 2.28 Rectas de carga de un diodo con una fuente sinusoidal

Ahora la ecuación de la recta de carga quedará determinada para cada valor de x , con la siguiente expresión:

$$I_{AK} = \frac{V_{CC} + V_f \cdot \text{sen } x}{R_C} - \frac{V_{AK}}{R_S} \quad (\text{Ecuación 2.17})$$

Para un circuito como este, es necesario recordar que:

$$r_{dinamica} = r_d = dV_{AK} / dI_{AK}$$

(Ecuación 2.18)

2.8. PROBLEMAS RESUELTOS

2.8.1. En el circuito de la figura 2.29, y para la forma de onda propuesta, determinar el voltaje de salida V_o , sabiendo que la característica estática del diodo es la figura 2.30.

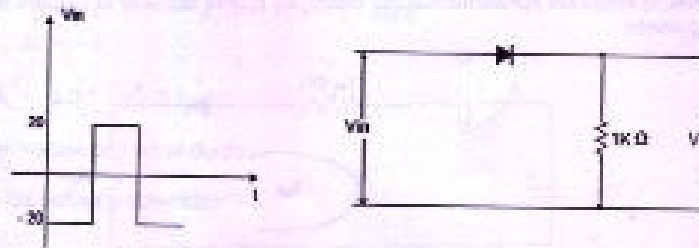


Figura 2.29

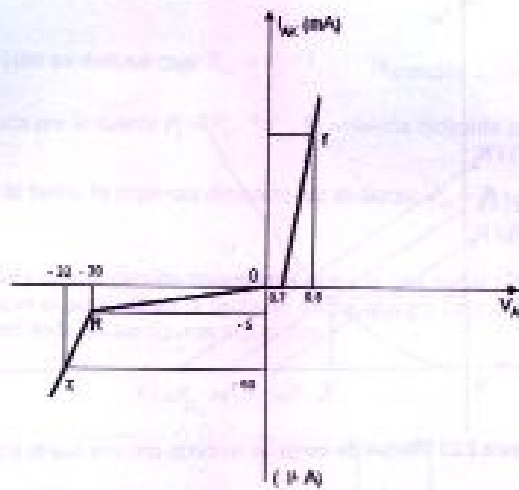


Figura 2.30

Solución:

De la figura se obtiene que $V_C = 0.7 V$, $V_f = 0.8 V$, $I_f = 30 mA$, $V_A = -30 V$, $I_A = -5 \mu A$, $V_Z = -32 V$, e $I_Z = -50 \mu A$.

Entonces:
$$r_{on}(B) = \frac{V_f - V_C}{I_f - 0} = \frac{0.8 - 0.7}{30} = 3.3 \Omega \quad \text{(Ecuación 2.19)}$$

$$r_{on}(C) = \frac{V_A - 0}{I_A - 0} = \frac{30}{5} = 6 M\Omega \quad \text{(Ecuación 2.20)}$$

$$r_Z = \frac{V_Z - V_A}{I_Z - I_A} = \frac{32 - 30}{45} = 44 K\Omega \quad \text{(Ecuación 2.21)}$$

$V_n = V_{oc} = 20 V$ (constante)

Empleando la segunda aproximación del diodo, se puede sustituir el circuito original por el siguiente:

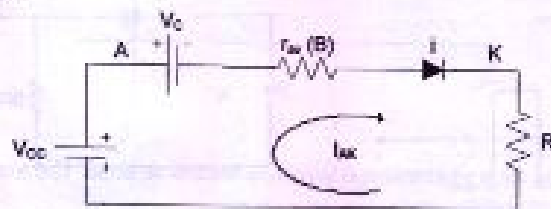


Figura 2.31

Planteando la ley de Kirchhoff para voltajes de malla obtenemos:

$$V_{cc} = I_{AK} * r_{on}(B) + V_{AK_{on}} + V_c + I_{AK} * R_L \quad (\text{Ecuación 2.22})$$

Despejando
$$I_{AK} = \frac{V_{cc} - V_c}{R_L + r_{on}(B)} = \frac{20 - 0,7}{3,3 + 1000} = 19,2 \mu A \quad (\text{Ecuación 2.23})$$

$$V_o = R_L * I_{AK} = 1 * 19,2 = 19,2 V \quad (\text{Ecuación 2.24})$$

$$V_{AK} = V_{cc} - V_c = 20 - 19,2 = 0,8 V \quad (\text{Ecuación 2.25})$$

Si se hubiese considerado al diodo como elemento ideal, V_o hubiese sido igual a 20 V. Esto introduce un error de apenas el 4% en relación a la segunda aproximación que se ha tomado.

Cuando $V_o = V_{cc} = -20 V$, se tiene el siguiente análisis:

$V_o < V_g$, de modo que el diodo nunca entra en la región de rompimiento. Entonces se puede reemplazar al diodo por su equivalente para la región C:



Figura 2.32 Circuito del ejercicio 2.1 suponiendo un diodo ideal

$$V_{cc} + I_{AK} * R_L + I_{AK} * r_{on}(C) + V_{AK_{on}} = 0 \quad (\text{Ecuación 2.26})$$

$$I_{AK} = \frac{V_{cc}}{R_L + r_{on}(C)} = \frac{-20}{1 + 6000} = -3,3 \mu A \quad (\text{Ecuación 2.27})$$

$$V_o = I_{AK} R_L = -3,3 * 1 = -3,3 mV$$

El resto del voltaje cae en el diodo.

Estas son las señales obtenidas:

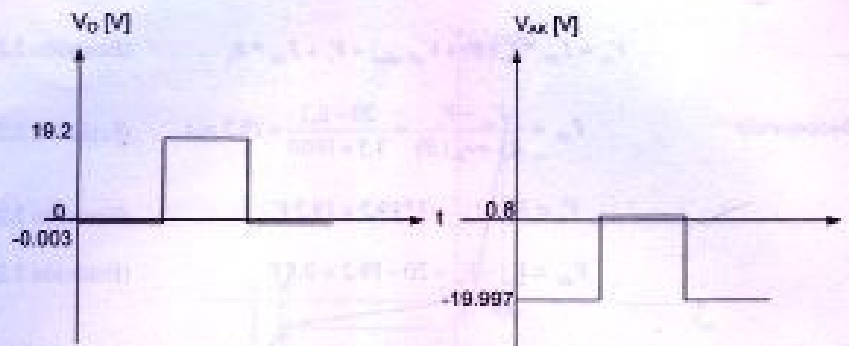


Figura 2.33

2.8.2. Para el circuito de la figura 2.2 determinar el voltaje de salida, dada la señal de entrada y la curva característica de la figura 2.35.

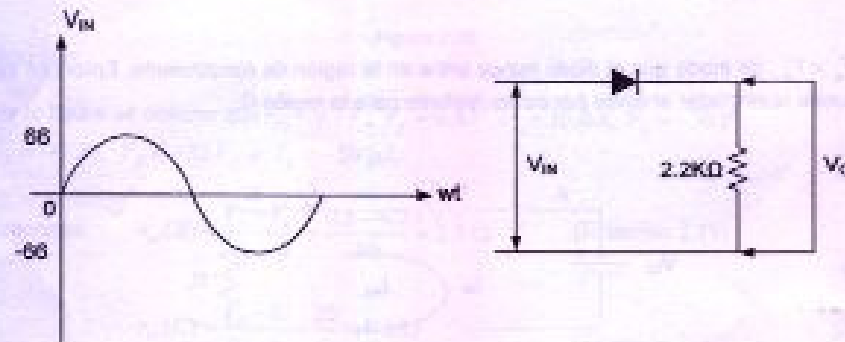


Figura 2.34

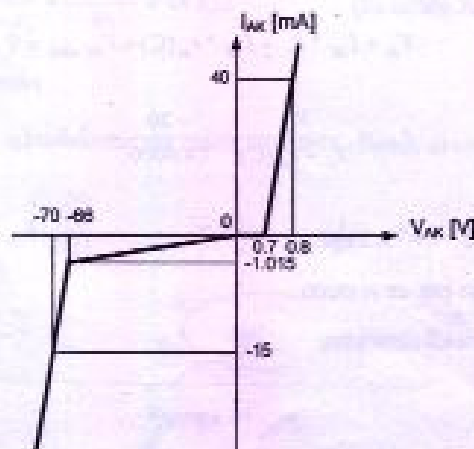


Figura 2.35

Según la característica estática del diodo, y siguiendo los mismos pasos que en el problema anterior, podemos obtener:

$$r_{av} (B) = 2.5 \Omega \text{ y } r_{av} (C) = 65 \text{ K}\Omega \quad (\text{Ecuación 2.28})$$

El diodo no entra a estado de conducción sino hasta que V_{in} supere los 0.7 V:

Para el intervalo de $0 < V_{in} < 0.7$, la corriente $i_{AK} = 0$, entonces $V_O = i_{AK} R_L = 0$.

Para $0.7 < V_{in}$, se puede plantear la ecuación de voltajes en la malla:

$$V_{in} = i_{AK} r_{av} (B) + V_C + i_{AK} R_L \quad (\text{Ecuación 2.29})$$

Despejando i_{AK} :

$$i_{AK} = \frac{V_{in} - V_C}{r_{av} (B) + R_L} = \frac{66 \text{sen}(x) - 0.7}{2.2 + 0.0025} = (29.97 \text{sen}(x) - 0.35) \text{mA} \quad (\text{Ecuación 2.30})$$

$$V_O = i_{AK} R_L = 66 \text{sen}(x) - 0.7 \quad (\text{Ecuación 2.31})$$

Sea δ el valor de X a partir del cual el diodo empieza a conducir.

$\text{sen } \delta = 0.7 / 66$, entonces $\delta = \text{arcsen } 0.7 / 66 = 0.6076^\circ$.

Al valor de $\alpha = 180^\circ - 2\delta$ se lo conoce como ángulo de conducción del diodo, y para este caso es igual a 179.68° .

Se tiene entonces la forma de onda siguiente para el semiciclo positivo:

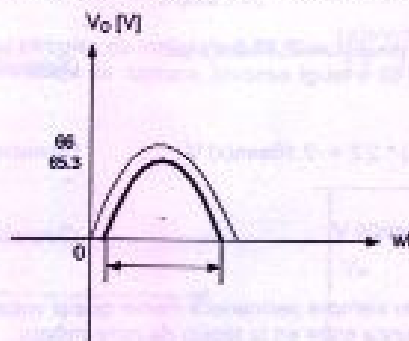


Figura 2.36

En el semiciclo negativo, el análisis es el siguiente:

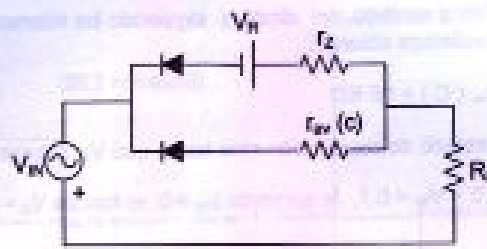


Figura 2.37

En primer lugar, hay que determinar el valor del voltaje de entrada para el cual el diodo pasa de la región de no conducción a la región de rompimiento.

Asumimos inicialmente que el diodo está en la región C

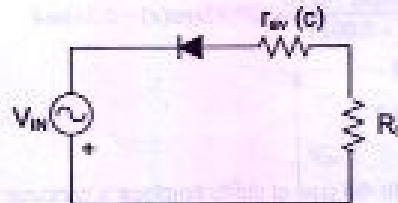


Figura 2.38

$$V_{IN} + i_{AK} (r_{rev}(C) + R_L) = 0, \text{ entonces} \quad (\text{Ecuación 2.32})$$

$$i_{AK} = \frac{V_{IN}}{R_L + r_{rev}(C)} = \frac{66 \text{sen}(x)}{65 + 2.2} = -0.98 \text{sen}(x) \text{ mA} \quad (\text{Ecuación 2.33})$$

$$V_D = i_{AK} R_L = -0.98 \text{sen}(x) * 2.2 = -2.16 \text{sen}(x) \text{ V} \quad (\text{Ecuación 2.34})$$

$$V_{AK} = V_{IN} - V_D = -63.84 \text{sen}(x) \text{ V} \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

El voltaje ánodo - cátodo siempre permanece menor que el voltaje de ruptura inverso, de modo que el diodo nunca entra en la región de rompimiento.

Se obtiene entonces, para el semiciclo negativo, señal de salida:

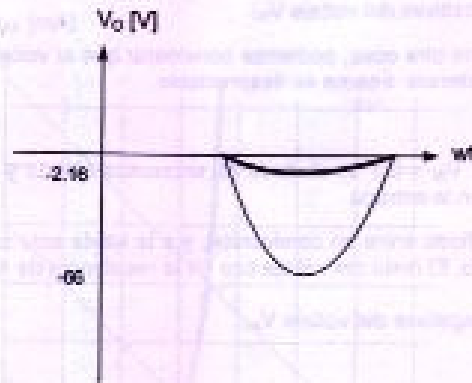


Figura 2.39

Agrupando ambas señales:

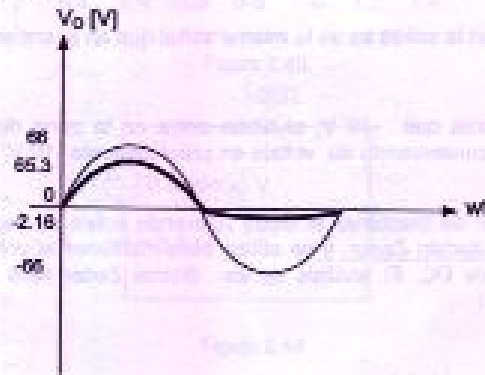


Figura 2.40

2.8.3. Hallar V_o para el circuito de la figura 2.41. Considerar que el diodo es de silicio y que tiene un voltaje de ruptura inverso igual a 10 V.

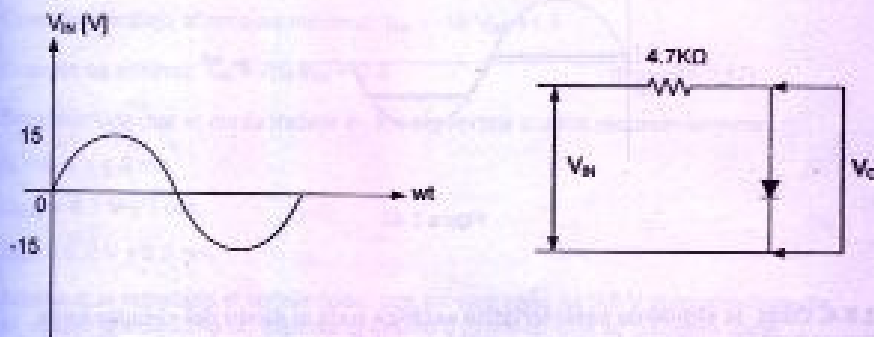


Figura 2.41

Para las regiones positivas del voltaje V_{in} :

Como no se ha dicho otra cosa, podemos considerar que el voltaje codo del diodo es 0.7 V , y que su resistencia interna es despreciable.

En el intervalo $0 < V_{in} < 0.7\text{ V}$, el diodo se encuentra abierto y en V_o se aprecia el mismo voltaje que en la entrada.

Para $0.7 < V_{in}$, el diodo entra en conducción, y a la salida solo se registran los 0.7 V que caen en el diodo. El resto del voltaje cae en la resistencia de $4.7\text{ K}\Omega$.

Para las regiones negativas del voltaje V_{in} :

Durante el intervalo $-10 < V_{in} < 0$, el diodo se encuentra en la región de no conducción, por tanto, su corriente es cero, al menos de acuerdo al modelo que hemos elegido.

Esto significa que en la salida se ve la misma señal que en la entrada.

Para voltajes menores que -10 V , el diodo entra en la zona de ruptura, es decir, vuelve a conducir, conservando su voltaje en prácticamente -10 V .

El hecho intencional de mantener al diodo operando sobre su región de ruptura, es conocido como regulación Zener, y se utiliza para mantener el voltaje de salida a un determinado valor de DC. El análisis de los diodos Zener será llevado a cabo en capítulos siguientes.

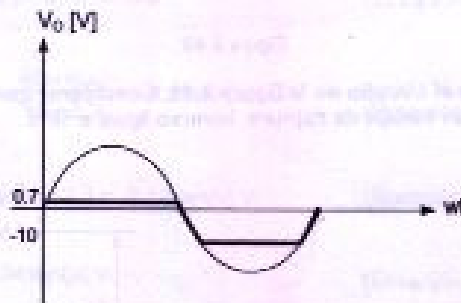


Figura 2.42

2.8.4. Dada la siguiente característica estática para el diodo del circuito en la figura 2.43, determinar los puntos máximo, medio y mínimo de operación del mismo.

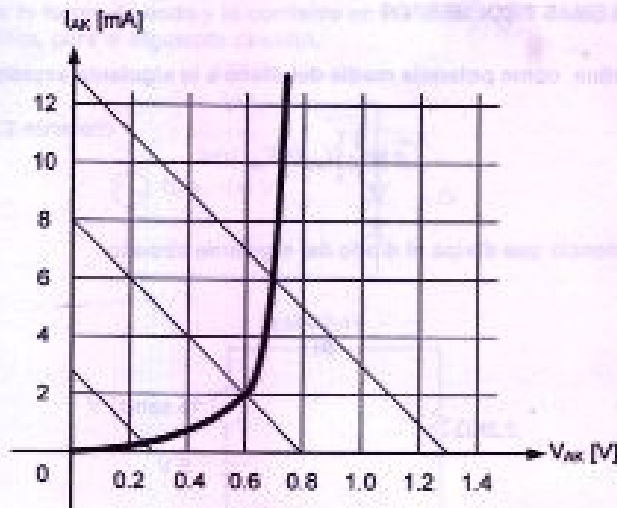


Figura 2.43

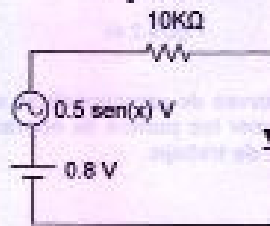


Figura 2.44

De la ecuación de la recta de carga, cuando el voltaje alterno es 0 V, tenemos la siguiente expresión:

$$i_{AK} = -10 V_{AK} + 8 \text{ mA} \quad (\text{Ecuación 2.35})$$

$$i_{AK} = -10 V_{AK} + 8 \text{ mA}$$

Cuando el voltaje alterno es máximo: $i_{AK} = -10 V_{AK} + 1.3$

Cuando es mínimo: $i_{AK} = -10 V_{AK} + 0.3$ (Ecuación 2.37)

Esto produce que el diodo trabaje en los siguientes puntos respectivamente:

$$Q = 0.6 \text{ V y } 2 \text{ mA,}$$

$$Q_{\text{max}} = 0.7 \text{ V y } 7 \text{ mA,}$$

$$Q_{\text{min}} = 0.2 \text{ V y } 0.5 \text{ mA.}$$

Nótese que superado el voltaje codo, que en este caso es 0.6 V aproximadamente, el voltaje del diodo es en esencia el mismo a pesar de que su corriente varíe notablemente.

Cabe señalar que este es solo un método gráfico más que analítico con el que se puede determinar el voltaje y la corriente en el diodo.

2.9. PROBLEMAS PROPUESTOS

2.9.1. Se define como potencia media del diodo a la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{dc}(t) V_{dc}(t) dt \quad (\text{Ecuación 2.38})$$

Hallar la potencia que disipa el diodo del siguiente circuito.

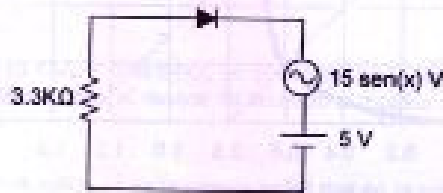


Figura 2.45

2.9.2. Dadas las siguientes curvas de características estáticas para el diodo del circuito de la figura 2.46, obtener los puntos de operación. Juzgue a su criterio, cual es la temperatura óptima de trabajo.

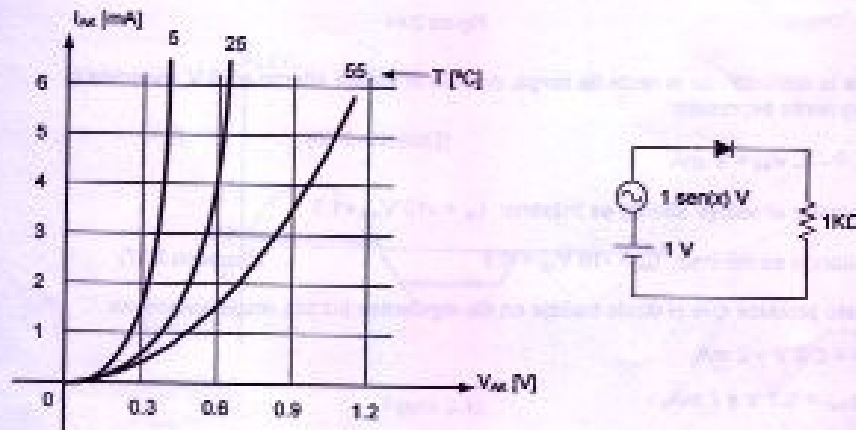


Figura 2.48

2.9.3. Hallar la forma de onda y la corriente en los diodos, así como los ángulos de conducción, para el siguiente circuito.

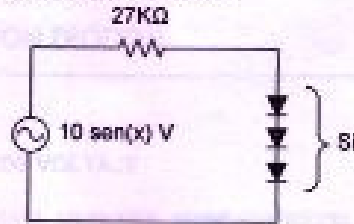


Figura 2.47



Figura 2.48 Gráfico del circuito y de las ondas

Una vez se tiene la representación que el diodo en base. Cuando el voltaje de entrada es positivo, el diodo está en estado de conducción y el diodo funciona como una resistencia de 27 KΩ. Cuando el voltaje de entrada es negativo, el diodo está en estado de bloqueo y no conduce, por lo que el voltaje en la carga es cero. En la representación de la onda de salida, se puede observar que la corriente es cero durante la mitad negativa de la onda de entrada. Este comportamiento se puede observar en la representación de la onda de salida.

El ángulo de conducción de la corriente es π rad, es decir, el diodo conduce durante la mitad positiva de la onda de entrada. El ángulo de conducción de la corriente es π rad, es decir, el diodo conduce durante la mitad positiva de la onda de entrada. El ángulo de conducción de la corriente es π rad, es decir, el diodo conduce durante la mitad positiva de la onda de entrada.



Figura 2.49 Gráfico del circuito y de las ondas