



1. Para el circuito de la Figura 1, si utiliza la expresión exacta $I(v_D)$ del diodo, plantee la ecuación que se debe satisfacer. Plantee un modelo de aproximación para el diodo que permita resolver los voltajes y corrientes en el circuito. Sea explícito en los modelos y supuestos utilizados.

$$i_D = I_s \left(e^{v_D/(\eta V_T)} - 1 \right) \quad (1)$$

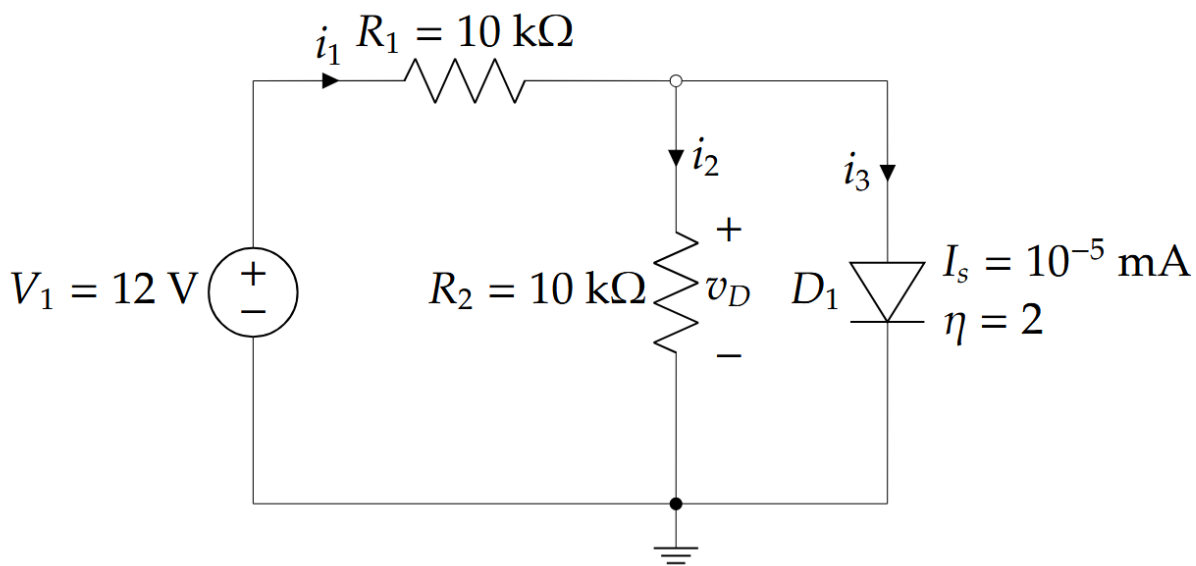


Figura 1: Circuito con diodo.

Solución:

Por enunciado tenemos que utilizar la expresión exacta del diodo para el cual consideramos temperatura ambiente por lo tanto tendremos que $V_T = 25[mV]$. La ecuación exacta que describe el comportamiento del diodo es:

$$i_D = I_s \left(e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$= 10^{-5} mA \left(e^{\frac{v_D}{2 \cdot 25[mV]}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$= 10^{-5} mA (e^{20v_D} - 1) \quad (4)$$

donde I_s es la corriente de saturación y η el factor de idealidad ($1 \leq \eta \leq 2$). En este ejercicio se considera $\eta = 2$ según el enunciado. Por la Ley de Corriente de Kirchhoff (LCK) en el nodo del diodo:

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (5)$$

$$\frac{V_i - v_D}{R_1} = \frac{v_D}{R_2} + I_s \left(e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (6)$$

Si suponemos que $v_D = 0,7 \text{ V}$ el cual es un valor comun para un diodo de silicio en conducción, tenemos:

$$i_1 = \frac{V_i - v_D}{R_1} = \frac{12 - 0,7}{10\,000} \text{ A} = 1,13 \text{ mA}$$

$$i_2 = \frac{v_D}{R_2} = \frac{0,7}{10\,000} \text{ A} = 70 \text{ } \mu\text{A}$$

$$i_3 = i_1 - i_2 = 1,06 \text{ mA}$$

Si en vez de $v_D = 0,7 \text{ V}$ usamos $v_D = 0,6 \text{ V}$:

$$i_1 = \frac{12 - 0,6}{10\,000} = 1,14 \text{ mA}$$

$$i_2 = \frac{0,6}{10\,000} = 60 \text{ } \mu\text{A}$$

$$i_3 = i_1 - i_2 = 1,08 \text{ mA}$$

Vemos que obtenemos valores bastante pequeños para la corriente del diodo, lo que puede parecer contradictorio, pero esto es debido al punto de operacion en el cual operamos el diodo, ahora que analizar dos situaciones límite para el diodo:

- **Caso 1: Diodo en corte** ($i_D = 0$). El diodo no conduce corriente y se comporta como un circuito abierto:

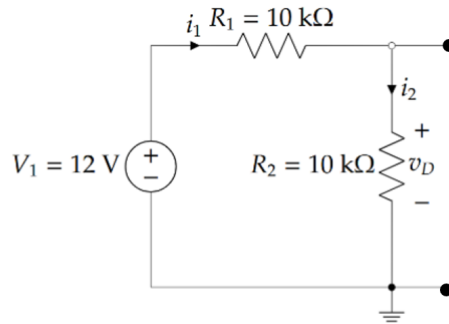


Figura 2: Circuito con diodo abierto.

El voltaje en el diodo será:

$$12 = (R_1 + R_2)i$$

$$i = \frac{12}{20\,000} = 0,6 \text{ mA}$$

$$v_D = R_2 i = 10\,000 \times 0,6 \text{ mA} = 6 \text{ V}$$

- **Caso 2: Diodo en conducción (cortocircuito ideal).** El diodo conduce y se comporta como un corto:

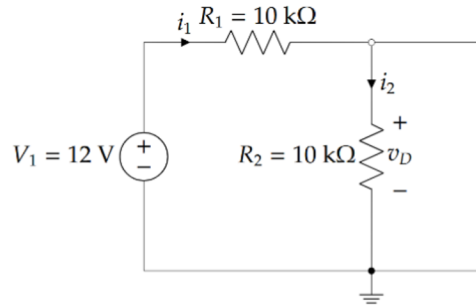


Figura 3: Circuito con diodo en corto circuito.

En este caso, por la resistencia R_2 no circula corriente:

$$12 = R_1 i$$

$$i = \frac{12}{10\,000} = 1,2 \text{ mA}$$

Cuando $v_D = 0$, la corriente es 1,2 mA.

La recta de carga representa la relación entre voltaje y corriente impuesta por el circuito externo al diodo. La intersección con la característica $v-i$ del diodo dada por (2) determina el punto de operación. En este caso, el voltaje de intersección resulta menor que 0,6 V y, por la forma exponencial de (2), la corriente del diodo queda del orden de miliamperes. Para aumentar la corriente de operación, habría que modificar la recta de carga (por ejemplo, disminuyendo las resistencias o aumentando V_i).

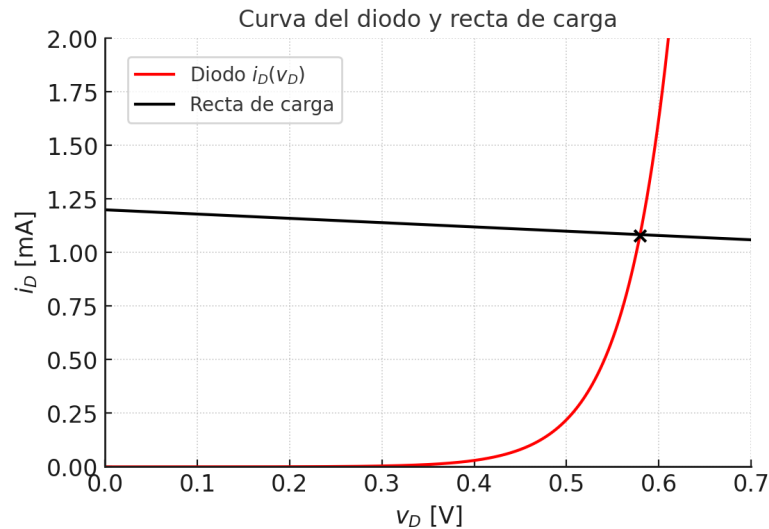
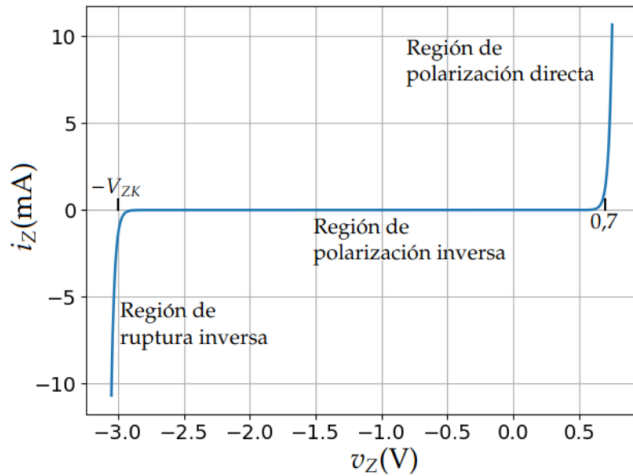


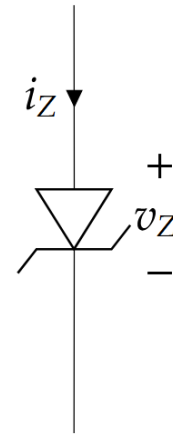
Figura 4: Intersección entre la característica $v-i$ del diodo y la recta de carga del equivalente de Thévenin.

2. Un diodo Zener con característica $v-i$, como la mostrada en la Figura 5a), tiene un voltaje de Zener

$V_{ZK} = 3 \text{ V}$. Determine la corriente i_X en los dos circuitos mostrados en la figura 6. Sea explícito en los modelos y supuestos utilizados.



(a) Curva de v - i del diodo Zener.



(b) Esquema de un diodo Zener.

Figura 5: (a) Característica v - i del diodo Zener, mostrando las regiones de polarización directa, inversa y de ruptura inversa, así como los valores típicos de voltaje y corriente. (b) Símbolo del diodo Zener, mostrando la dirección de la corriente i_Z y el voltaje v_Z en sus terminales.

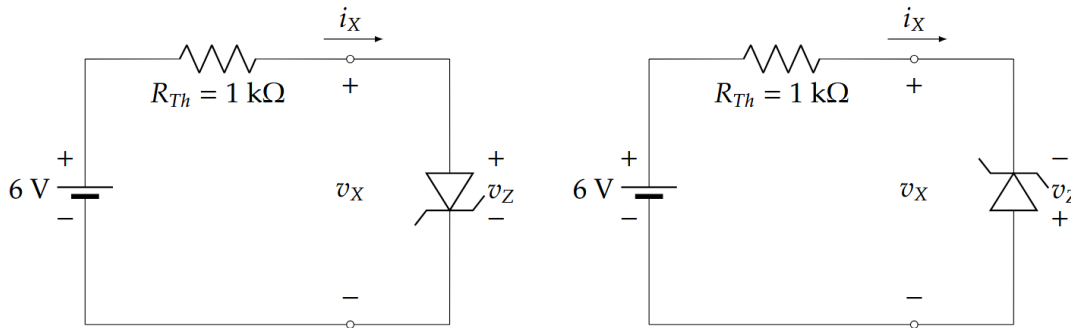


Figura 6: Detalle: (izquierda) símbolo del diodo Zener con convención de corriente i_Z y polaridad de v_Z ; (derecha) característica v - i esquemática del diodo (ruptura inversa alrededor de $-V_{ZK}$).

Solución:

Similar a lo anterior, tenemos que el primer paso en este problema es encontrar la recta de carga que describe a la fuente de voltaje y a la resistencia de Thévenin. Para esto notemos que cuando la corriente i_X es igual a cero, entonces no hay una caída de voltaje en la resistencia, por lo que el voltaje v_X es igual al voltaje de la fuente, es decir, 6 V . Si el voltaje v_X es cero, entonces el diodo actúa como un cortocircuito y tenemos que la corriente i_X está dada por $6 \text{ V}/1 \text{ k}\Omega = 6 \text{ mA}$. Con estos dos puntos podemos graficar la recta de carga para ambos circuitos.

En el circuito de la Figura 7, se cumple aproximadamente que:

$$\text{Cuando } v_X > 0,7 \text{ V} \Rightarrow v_Z = 0,7 \text{ V},$$

$$\text{Cuando } v_X < -3 \text{ V} \Rightarrow v_Z = -3 \text{ V}.$$

Si usamos el modelo de fuente de voltaje con $v_Z = 0,7 \text{ V}$, tenemos que la corriente es:

$$i_X = \frac{6 - 0,7}{1000} = 5,3 \text{ mA}.$$

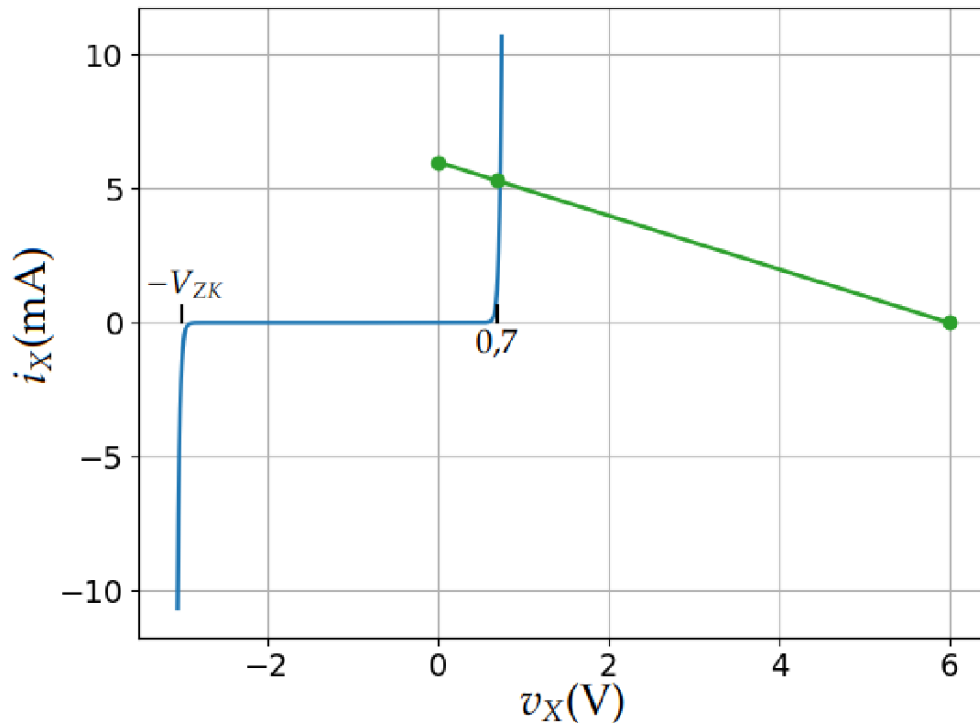


Figura 7: Curva característica v - i del voltaje v_X (curva azul). Se interseca la recta de carga (curva verde) con esta curva exponencial, para encontrar el punto de operación. Los puntos verdes de los extremos de la recta corresponden a los puntos usados para generarla. El punto verde del medio es el punto de operación del diodo si asumimos que el voltaje máximo es de $0,7 \text{ V}$. Notemos que este punto está suficientemente cerca de la intersección real entre ambas curvas, por lo que el modelo de fuente de voltaje es una aproximación razonable.

Luego tenemos que para el circuito de la derecha se cumpla que:

$$\text{Cuando } v_X > 3 \text{ V} \Rightarrow v_Z = -3 \text{ V},$$

$$\text{Cuando } v_X < 0,7 \text{ V} \Rightarrow v_Z = 0,7 \text{ V}.$$

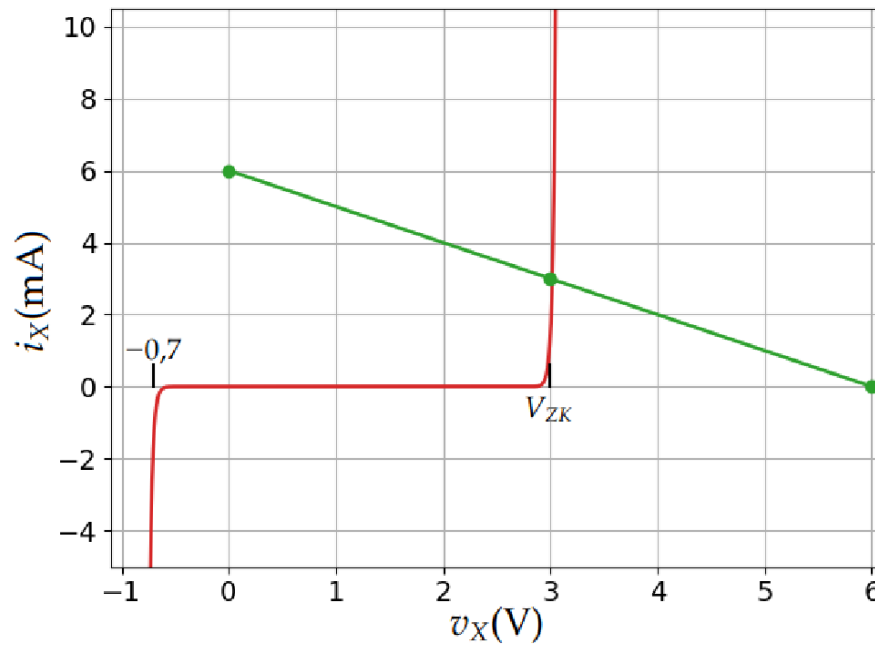


Figura 8: Característica $v-i$ del voltaje v_X (recordar que el diodo Zener está invertido, por lo que la región de polarización inversa, que corresponde a voltajes negativos para el diodo Zener, en este gráfico está como voltajes positivos. Notar que la corriente también cambia de signo por la misma razón). Se intersecta la recta de carga con esta curva exponencial, para encontrar el punto de operación.

Si usamos el modelo de fuente de voltaje con $v_Z = -3$ V, tenemos que la corriente es:

$$i_X = \frac{6 - 3}{1000} = 3 \text{ mA.} \quad (7)$$

3. Para el circuito de la figura 9, bosqueje el voltaje en el diodo y la corriente en el diodo como función del tiempo. Sea explícito en los valores de las gráficas, así como en los modelos y supuestos utilizados.

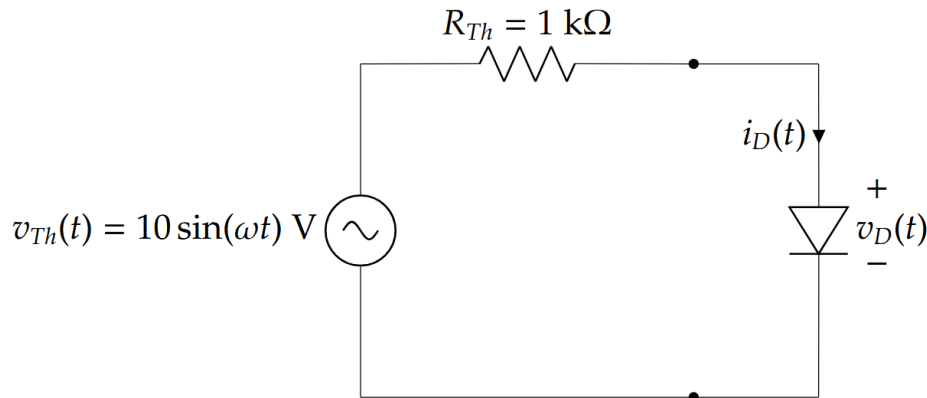


Figura 9: Circuito con diodo y fuente de voltaje senoidal.

Solución:

Para poder entender cómo funciona el diodo en presencia de una fuente de voltaje senoidal, primero deberemos analizar diferentes puntos, los cuales se visualizan en la tabla 1:

Punto de operación	ωt	$\sin(\omega t)$	$v_{Th}(t)$ (V)	v_D (V)	i_D (mA)
3	0	0	0	0	0
2	$\pi/6$	1/2	5	0.7	4.3
1	$\pi/2$	1	10	0.7	9.3
2	$5\pi/6$	1/2	5	0.7	4.3
3	π	0	0	0	0
4	$7\pi/6$	-1/2	-5	-5	$-I_s$
5	$3\pi/6$	1	10	-10	$-I_s$
4	$11\pi/6$	-1/2	-5	-5	$-I_s$
3	2π	0	0	0	0

Cuadro 1: Valores de voltaje y corriente en el diodo para distintos puntos de operación durante un ciclo senoidal.

Luego tenemos que el punto de operación del diodo se ve modificado continuamente debido a la naturaleza senoidal de la fuente de voltaje, esto se visualiza en:

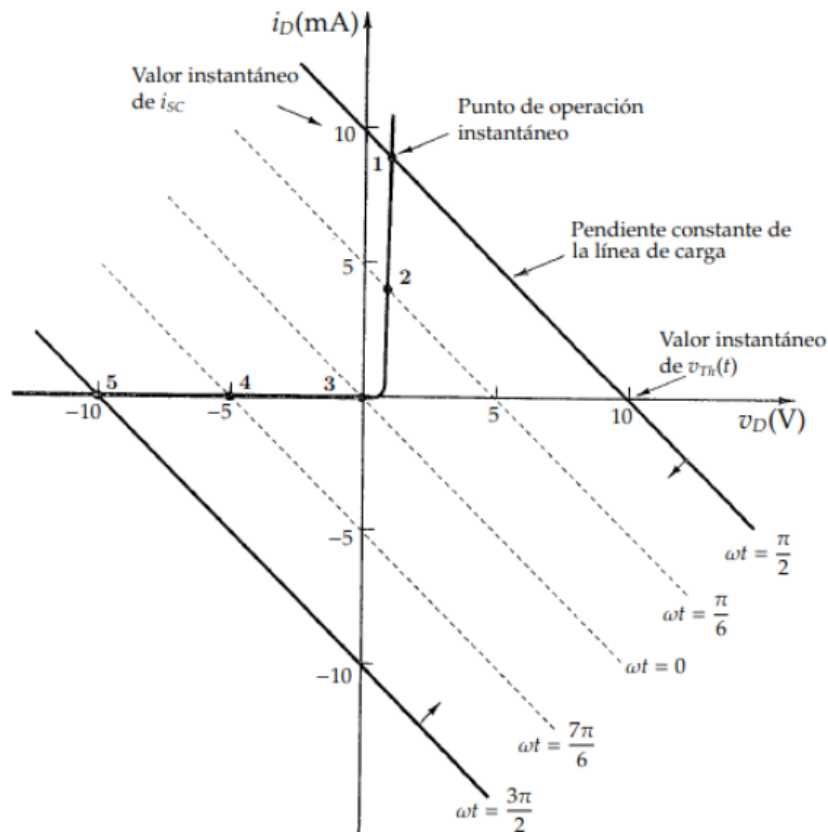
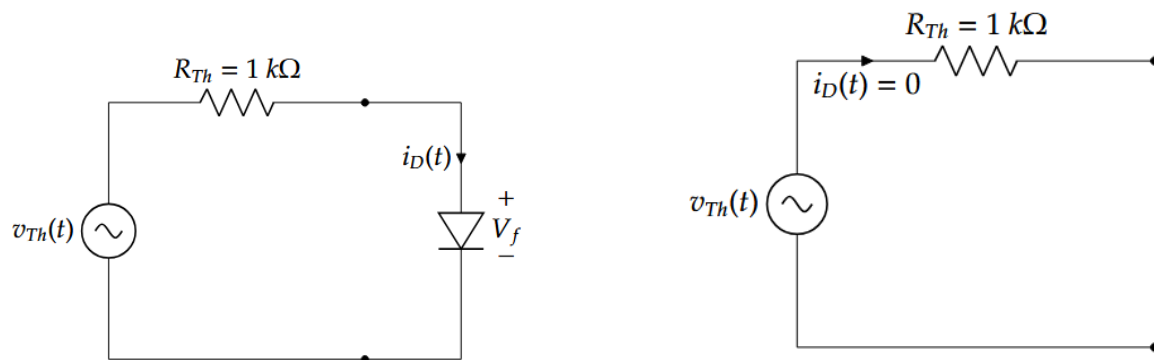


Figura 10: Voltaje de Thévenin $v_{Th}(t)$ como función del tiempo.



(a) Circuito equivalente cuando el diodo no conduce ($i_D(t) = 0$). (b) Circuito equivalente cuando el diodo conduce ($i_D(t) > 0$).

Figura 11: Modelos de operación del circuito con diodo: (a) abierto, (b) conduciendo.

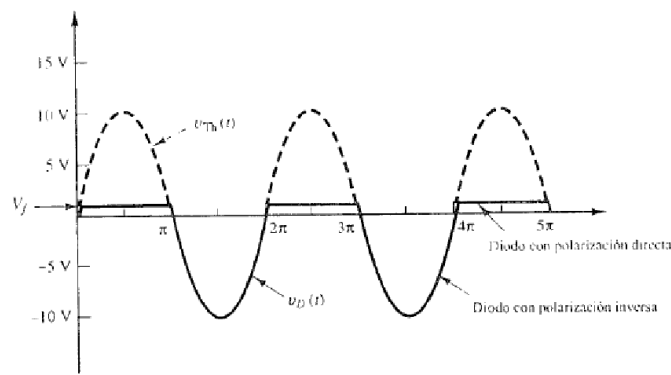


Figura 12: Gráfico de voltaje vs ωt . Cuando el voltaje en la entrada es positivo, el voltaje medido en el diodo llega hasta un máximo de V_f . Cuando el voltaje en la entrada es negativo, el voltaje en la salida es igual al voltaje en la entrada por las razones descritas anteriormente.

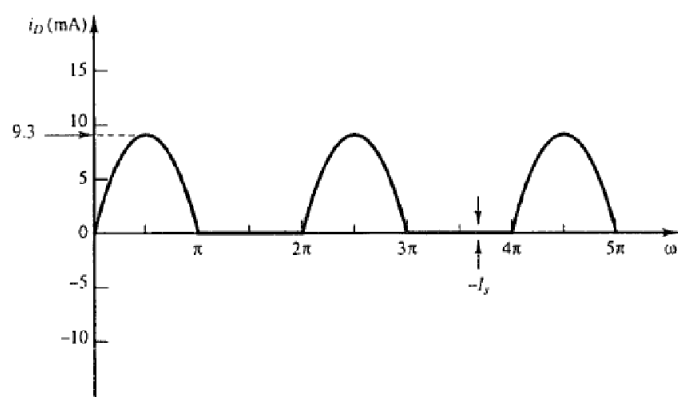


Figura 13: Sólo pasa corriente por el diodo cuando el voltaje es positivo (polarización directa en el diodo), porque cuando es negativo (polarización inversa en este diodo), el diodo actúa como un circuito abierto.