

## DIODOS

Los elementos estudiados en general en Laboratorio 3 (resistencias, capacitores e inductancias) tienen una relación lineal entre la tensión aplicada y la corriente que circula por ellos. Los diodos son dispositivos de dos terminales que tienen una relación V-I dada por la figura 1.

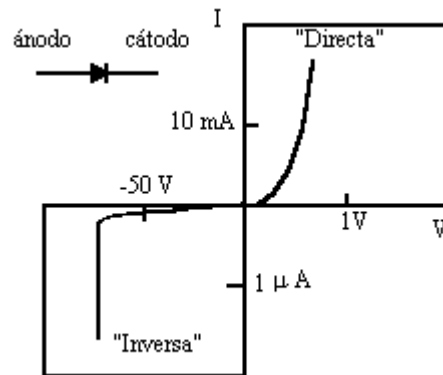


Figura 1

Este comportamiento se logra construyendo una “juntura” con dos materiales semiconductores, uno de tipo N y otro de tipo P, usualmente de silicio (SI). Al poner en una juntura dos materiales con diferente densidad de portadores libres (un material tipo N tiene alta densidad de electrones libres y uno de tipo P una alta densidad de “huecos” libres) se genera una corriente que a su vez genera una diferencia de potencial por ese pasaje de carga neta que se tiende a oponer al pasaje de carga, y que por lo tanto en algún punto se equilibra. Ese punto de equilibrio dependerá del material usado y de la temperatura. Como se ve en la figura 1, si la diferencia de potencial entre los terminales del diodo supera la diferencia de potencial que se generó en la juntura (aproximadamente 0,7V para el silicio), comenzará a circular corriente. Si no se supera ese potencial, no circulará corriente por el dispositivo.

La flecha del símbolo del diodo (ánodo) apunta en la dirección de circulación de la corriente en "Directa". El diodo está en "Directa" ("Inversa") cuando la tensión del ánodo es mayor (menor) que la del cátodo. La corriente que circula cuando el diodo está en "Inversa" (llamada corriente de "fuga", del orden de los nanoamperes) se puede considerar en general despreciable hasta que se llega a la tensión de ruptura en inversa. Normalmente **nunca** se aplica una tensión en inversa tan grande como para llegar a la tensión de ruptura, salvo en el caso de los diodos Zener.

Nótese la diferencia de escalas en la figura 1 entre la zona directa y la inversa. La diferencia de tensión en "Directa" usualmente es menor que 0.8V, por lo que es común pensar al diodo como un elemento *ideal* que en "Directa" deja pasar corriente sin que haya caída de tensión y en "Inversa" tiene una caída de tensión entre sus terminales sin que circule corriente.

Así como el parámetro de “caracteriza” a una resistencia es la máxima potencia que puede disipar, los parámetros que “caracterizan” a los distintos diodos son: tensión de ruptura en inversa, corriente máxima en directa, corriente de fuga.

Es importante resaltar tres hechos: (1) El diodo no tiene una "resistencia", porque *no cumple la ley de Ohm*, (2) Si en un circuito hay diodos ese circuito *no tiene un equivalente Thevenin*, (3) En un circuito con diodos *no vale el principio de superposición*.

Determinación de la corriente y tensión en un circuito con un diodo

Supongamos que tenemos un circuito con fuentes y resistencias y un diodo. El circuito más general que se puede tener es el que se muestra en la figura 2, donde  $V_0$  y  $R$  son la tensión y la resistencia equivalentes de Thevenin (si piensa que ese NO es el circuito más general pare y piense). ¿Cuánto valdrá  $V_d$  e  $I_d$ , la caída de tensión en el diodo y la corriente que circula por él? Este problema se puede pensar de la siguiente forma. Tomemos por un lado la fuente y la resistencia y por otro el diodo (como si estuvieran separados por la línea de puntos a-b). La relación I-V de la fuente y la resistencia estará dada por la recta que se muestra en la figura 2 (*recta de carga del circuito*). La máxima tensión entre a y b será  $V_0$ , a circuito abierto ( $I = 0$ ). La máxima corriente que circulará entre a y b será  $V_0 / R$ , en cortocircuito ( $V_{ab} = 0$ ). Por otra parte, la relación I-V del diodo estará dada por la función no-lineal que se muestra en la figura 1 (en el circuito de la figura 2 el diodo está en "Directa").  $V_d$  e  $I_d$  serán entonces aquellos que satisfagan ambas ecuaciones simultáneamente. Gráficamente quiere decir que serán los valores de la intersección de ambas curvas. Para resolver este problema en forma analítica sería necesario conocer la expresión analítica de la relación entre la corriente y la tensión del diodo.

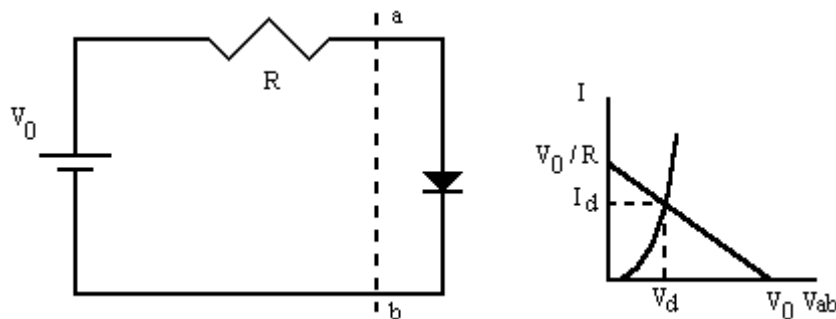


Figura 2

¿Cuál sería la solución del problema si la fuente  $V_0$  estuviera colocada al revés? En ese caso el diodo estaría en "Inversa" y habría que usar la parte inferior de la figura 1. Es fácil ver que en la mayoría de los casos la intersección entre la recta de carga y la curva del diodo determinará que  $I_d$  sea aproximadamente cero (del orden de los nanoamperes) y por lo tanto  $V_d \approx V_0$ .

Resistencia dinámica

Al introducir el diodo se hizo hincapié en que el diodo es un elemento con una relación V-I no lineal y que por lo tanto no tiene una "resistencia". En la práctica el diodo se puede aproximar de distintas formas, en función de cuanta precisión se requiera. Si pensamos en una aproximación de orden cero, podría decir que el diodo no deja pasar tensiones menores que 0,6-0,7V (resistencia infinita) y deja pasar la corriente sin oponer resistencia para tensiones mayores (resistencia cero).

Si queremos hacer una aproximación mejor, de orden uno, es necesario estudiar el circuito de la figura 3, similar al de la figura 2 pero que además de tener una fuente de tensión continua  $V_0$  tiene una fuente de tensión alterna  $v_{ac}$ .

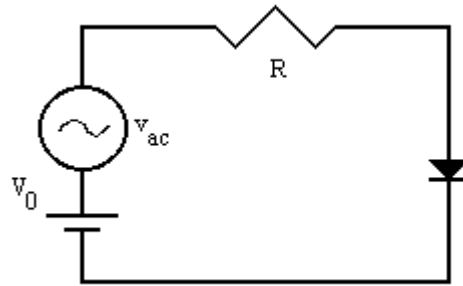


Figura 3

El circuito deberá cumplir con la ecuación

$$V_0 + v_{ac} - I_d R = V_d$$

donde  $V_d$  e  $I_d$  son la tensión sobre el diodo y la corriente que circula por él. Si hacemos un desarrollo en serie de Taylor de  $V_d$  en términos de  $I_d$  alrededor de  $I_{d0}$ , la corriente del diodo que se calculó para el circuito de la figura 2 con  $v_{ac} = 0$  ( $V_{d0}$  es la tensión que cuando la corriente es  $I_{d0}$ ), obtenemos

$$V_d = V_{d0} + \left. \frac{d V_d}{d I_d} \right|_{I_{d0}} (I_d - I_{d0}) + \dots$$

Si suponemos que la variación de corriente  $i_d \equiv I_d - I_{d0} \approx 0$ , se pueden despreciar los términos de orden superior del desarrollo, y resulta

$$V_0 + v_{ac} - (I_{d0} + i_d) R = V_{d0} + R_d i_d \quad (1)$$

donde

$$R_d \equiv \left. \frac{d V_d}{d I_d} \right|_{I_{d0}}$$

se define como la *resistencia dinámica* del diodo. Usando que por definición de  $V_{d0}$  e  $I_{d0}$  cumplen

$$V_0 - I_{d0} R = V_{d0} \quad (2)$$

se obtiene reemplazando 2 en 1 que

$$v_{ac} - R i_d = R_d i_d \quad (3)$$

La ecuación 3 nos dice que si se aplica una tensión  $v_{ac}$  pequeña con respecto a  $V_0$  se producirá una variación de corriente en el circuito,  $i_d$ , que cumplirá

$$i_d = v_{ac} / (R + R_d)$$

Es decir que a los efectos de las *variaciones* de tensión y corriente, el circuito se puede pensar con una fuente  $v_{ac}$  en serie con las "resistencias"  $R$  y  $R_d$ . Como se ve, si las

variaciones de tensión son pequeñas, la influencia del diodo se puede “linealizar” y representar a través de su resistencia dinámica.

Una expresión analítica de la relación V-I del diodo esta dada por la ecuación de Shockley

$$I = I_0 [\exp( V / V_T ) - 1]$$

con  $V_T = kT/q = 25.3$  mV a temperatura ambiente, q la carga del electrón y k la constante de Boltzmann. La resistencia dinámica resulta entonces

$$R_d \equiv \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I_{d0}} = \left. \frac{V_T}{I + I_0} \right|_{I_{d0}} \approx \frac{V_T}{I_{d0}}$$

Es decir que el valor de  $R_d$  se puede **estimar** como 25 mV dividido por la corriente de continua que circula por el diodo.

Nótese que  $R_d$  **no es una resistencia**. Si fuera una resistencia, en el diagrama V-I de la figura 1 debería estar representado por una recta que pasa por el origen y por el punto  $V_{d0}$ - $I_{d0}$ . Por el contrario,  $R_d$  es la **tangente** a la curva que se muestra en la figura 1 en el punto  $(V_{d0}, I_{d0})$ , dado que representa el término de primer orden del desarrollo en serie de Taylor. No es un valor que relaciona valores de tensión con valores de corriente, sino variaciones de tensión con variaciones de corriente.