

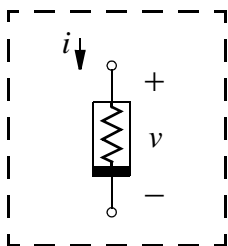
Diodos de Unión: Circuitos y Aplicaciones

El dispositivo resistor más simple consiste en una barra homogénea de material con una determinada conductividad, cuyo comportamiento puede expresarse, recurriendo a la ley de Ohm, como una relación lineal entre la tensión y la intensidad. En realidad tal relación lineal es una aproximación que sólo resulta válida para valores “suficientemente” pequeños de la tensión y la intensidad. Cualquier dispositivo resistivo real, incluso los supuestamente lineales, resulta ser no-lineal en la práctica. Sin embargo, en algunos dispositivos las no-linealidades son parásitos que se manifiestan sólo débilmente en condiciones de uso normal. Por contra, en otros dispositivos las condiciones de uso normal implican, y de hecho tratan de explotar, la operación no-lineal. Los diodos de unión, denominados simplemente diodos en muchos libros de texto, son probablemente los más conocidos de entre los resistores no-lineales de dos terminales. Pero existen muchos más; algunos de los cuales serán mencionados en este Capítulo. En este Capítulo se estudian distintos resistores de dos terminales de interés práctico y se presentan métodos para el análisis de circuitos compuestos por la interconexión de resistores de dos terminales y fuentes independientes de tensión e intensidad.

1. Conceptos Básicos Sobre Resistores No-Lineales de Dos Terminales
2. Diodos Rectificadores. El Diodo de Unión
3. Modelos Circuitales del Diodo de Unión
4. Análisis de Circuitos con Diodos de Unión
5. Aplicaciones del Diodo
6. Control de las Características Mediante Parámetros Físicos. Sensores

1. Conceptos Básicos Sobre Resistores No-Lineales de Dos Terminales

1.1. Características i - v



Los diodos pertenecen a la familia de dispositivos conocidos con el nombre de resistores de dos terminales. El símbolo genérico usado para los resistores no-lineales lo vimos en el Capítulo 2, y lo repetimos en el margen de la izquierda. Conviene recordar que estos dispositivos están concebidos para establecer una relación funcional de tipo algebraico,

$$f(v, i) = 0 \quad (6.1)$$

entre la tensión y intensidad, consideradas éstas como variables reales. Desde un punto de vista geométrico, pues, la relación funcional establecida por un resistor define una curva en el plano real (i, v) . A tal curva suele denominarse *curva característica*, o simplemente *característica*, del resistor en cuestión. En la Fig.1 se muestran características para varios resistores de interés práctico a

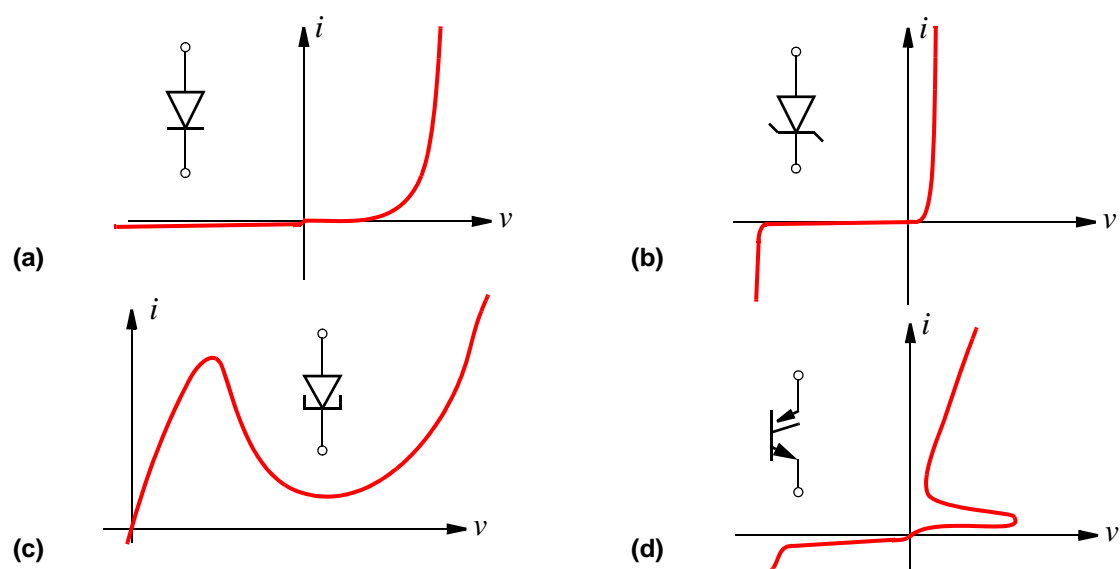


Figura 1 Algunos resistores no-lineales: (a) diodo de unión; (b) diodo Zener; (c) diodo túnel; (d) diodo de cuatro capas.

los que prestaremos atención en este Tema; respectivamente: el diodo de unión, el diodo Zener, el diodo túnel y el diodo de cuatro capas. Dada su importancia práctica, cada uno de estos resistores tiene su símbolo propio, que se muestra anexo a la correspondiente característica.

Hay dispositivos resistores, por ejemplo el diodo de unión, donde la relación entre tensión e intensidad se puede obtener mediante el análisis y la formulación de las ecuaciones que rigen el movimiento de las cargas en el interior del dispositivo. Sin embargo, hay otros donde esta formulación no es posible. En tal caso hay que recurrir a un procedimiento *experimental* para obtener las curvas características. Una vez obtenidas las características en forma gráfica, siempre es posible usar técnicas matemáticas de aproximación para obtener una fórmula cuya representación sea lo más cercana posible a la curva obtenida experimentalmente.

En el mercado existen instrumentos especialmente concebidos para extraer curvas características de resistores con gran precisión. Pero básicamente, el principio de funcionamiento de estos instrumentos consiste en aplicar tensiones (o intensidades), y medir las correspondientes intensidades (o tensiones), tal como se describe a continuación.

Experimento

Conecte un resistor no-lineal del que sepa a priori con certeza que su intensidad es una función unívoca de su tensión, una fuente de tensión de DC cuyo valor pueda ser modificado por el usuario, un voltímetro y un amperímetro, en la configuración mostrada en la Fig.2(a). Haga variar la fuente de tensión para que tome distintos valores, muchos, dentro de un intervalo $[E_L, E_H]$, dejando que la respuesta del circuito se *estabilice* para cada valor aplicado y midiendo entonces la intensidad correspondiente al

mismo. Marque en el plano (i, v) un punto por cada una de las medidas realizadas, e *interpole* el conjunto de puntos resultantes para obtener una curva continua; esta curva es la característica del resistor en el intervalo de tensiones $[E_L, E_H]$. Tal procedimiento se ilustra en la parte superior de la Fig.2 para un diodo túnel.

La curva característica de un resistor también la puede obtener directamente sobre la pantalla un osciloscopio usando el montaje mostrado en la Fig.2(b). Recuerde que un osciloscopio sólo mide directamente tensiones. Por ello, para medir la intensidad, lo hacemos a través de la caída de tensión en la resistencia de valor $R\Omega$. De este modo, los valores de la tensión y en voltios se corresponden con valores de la intensidad en $R^{-1}\text{Amp}$. Note que, debido a la presencia de esta resistencia, necesaria para medir la intensidad, se produce una división de tensión que hace que la excursión de la tensión aplicada al resistor no coincida con la amplitud A de la señal aplicada por la fuente de tensión. Deberá, por tanto asegurarse de que esta amplitud sea la adecuada para que la tensión aplicada al resistor cubra todo el intervalo $[E_L, E_H]$. Por otra parte, también deberá asegurarse de que la frecuencia de la señal de entrada sea lo “suficientemente” baja para que los retrasos en la respuesta del circuito pasen desapercibidos. En estas condiciones, obtendrá una curva muy parecida a la que obtuvo aplicando tensiones constantes. Por contra, si la frecuencia de la señal de entrada no es lo “suficientemente” baja, lo que observe en el osciloscopio diferirá del comportamiento algebraico idealizado que esperaba. Todo esto se ilustra en las figuras mostradas en la parte inferior de la Fig.2. La de la izquierda, obtenida con una frecuencia “baja” muestra la característica esperada; por con-

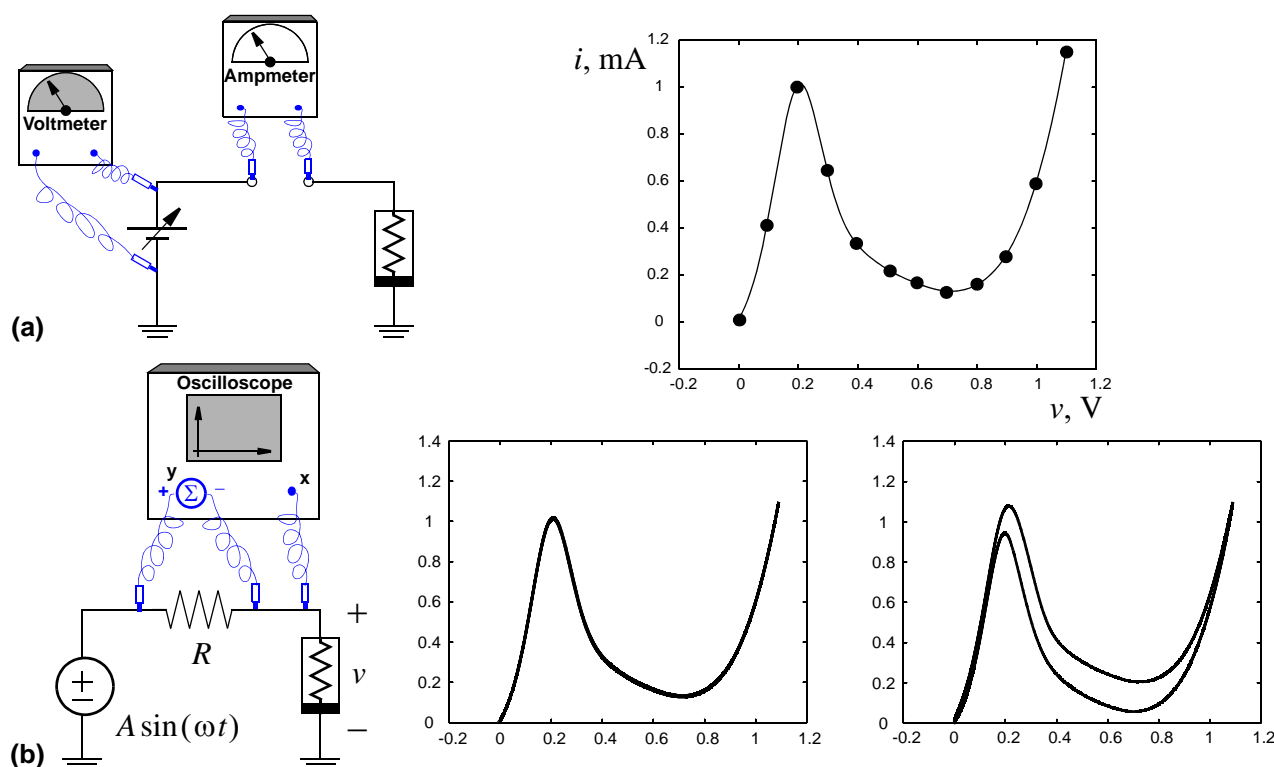


Figura 2 Experimento conceptual para obtener la característica de un resistor.

tra, la de la derecha, obtenida con una frecuencia mayor, muestra la característica desdoblada en dos.

El desdoblamiento observado en la última característica es debido a los inevitables retrasos que se producen en la respuesta del resistor, y se pueden explicar añadiendo elementos dinámicos al modelo del mismo.

El experimento anterior apunta algunas ideas que conviene enfatizar, y que se aplican tanto a los resistores de dos terminales como a otros dispositivos del tipo resistivo, independientemente de su número de terminales:

- Cualquier característica de un resistor, esté dada mediante una gráfica o una expresión analítica, sólo es válida dentro de una región limitada del plano real, definida por $i \in [J_L, J_H]$ y $v \in [E_L, E_H]$, en la que hayamos realizado nuestras mediciones o análisis.
- Cualquier característica de un resistor, analítica o gráfica, sólo es exactamente válida para tensiones e intensidades constantes en el tiempo. Si estas variables no sean constantes, la característica sólo será aproximadamente válida siempre y cuando la máxima frecuencia presente en tales variables sea inferior a un valor límite, ω_H .

Otra forma de expresar la última observación es simplemente diciendo que no existe ningún dispositivo práctico cuya naturaleza sea exactamente resistiva. Sin embargo, hay muchos dispositivos de interés práctico cuyo comportamiento a bajas frecuencias puede aproximarse de forma razonablemente buena mediante relaciones algebraicas.

1.2. Control por Tensión e Intensidad

En la práctica distinguiremos tres tipos de resistores atendiendo al tipo de relación algebraica que establecen entre la tensión y la intensidad:

- *Controlados por tensión.* En éstos cada valor de tensión define unívocamente uno de intensidad, aunque lo contrario no tiene por qué ser cierto. Esto significa que la intensidad se puede expresar como una función de la tensión, aunque esta función puede no ser invertible. Por ejemplo, esto último es lo que sucede en el caso del diodo túnel mostrado en la Fig.1(c).
- *Controlados por intensidad.* En éstos cada valor de intensidad define unívocamente uno de tensión, aunque lo contrario no tiene por qué ser cierto. Esto significa que la tensión se puede expresar como una función de la intensidad, aunque esta función puede no ser invertible. Un ejemplo de esto corresponde a la característica de la Fig.1(d).
- *Resistores invertibles.* Son tanto controlados por tensión como por intensidad, como sucede para los mostrados en las Fig.1(a) y (b).

Desde el punto de vista matemático, la curva característica de un resistor invertible debe ser *monotónica* en su región de definición; esto es, la pendiente no puede tomar valores positivos y negativos dentro de dicha región.

2. Diodos Rectificadores. El Diodo de Unión

2.1. Tipos y Estructuras de Diodos Rectificadores

Realmente existen varios dispositivos rectificadores. Pero aquí nos restringiremos a los diodos semiconductores de *unión*. Aunque la estructura interna de los dispositivos no es un objetivo de este conjunto de temas, no está de más saber que los diodos de unión se obtienen creando dentro de un semiconductor, como el Silicio, una zona donde predominan los huecos anexa a otra donde predominan los electrones.

2.2. Características del Diodo de Unión

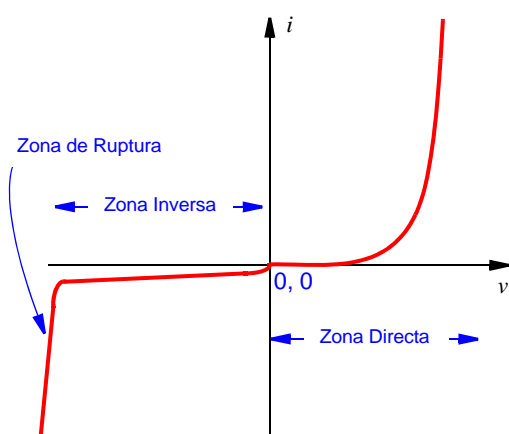


Figura 3 Característica de un diodo rectificador.

En la Fig.3 se muestra una característica típica de un diodo de unión *pn*, donde se distinguen tres regiones:

- Zona Directa,
- Zona Inversa,
- Zona de Ruptura

Conviene que esté advertido sobre el hecho de que en la Fig.3 la escala del eje de tensión es muy diferente a la del eje de intensidad; y que en ambos ejes la escala del semi-eje correspondiente a valores positivos es muy diferente de la del correspondiente a valores negativos. Por ejemplo, las intensidades positivas pueden tener un factor de escala 10^8 veces mayor que las negativas, y las tensiones negativas pueden tener un factor de escala 10^2 veces mayor que las positivas).

Zonas Directa e Inversa

Las zonas directa e inversa quedan descritas de manera unificada por la siguiente expresión matemática,

$$i = I_S \cdot \left(e^{\frac{v}{n \cdot U_t}} - 1 \right) \quad (6.2)$$

Nótese esta expresión depende de tres parámetros, dos de los cuales son específicos del diodo mientras que el tercero es realmente una variable que cambia con la temperatura de operación, en concreto:

- I_S intensidad de saturación, cuyo valor depende de la estructura, la composición y la geometría del dispositivo y puede variar dentro de un rango comprendido entre 10^{-8} A y 10^{-16} A. El valor de esta intensidad de saturación es también fuertemente dependiente de la temperatura; a mayor temperatura mayor intensidad de saturación.
- n coeficiente de emisión, también dependiente de la estructura y la composición, y varía entre 1 y 2.

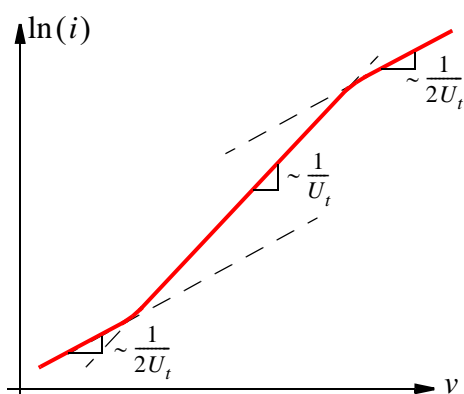


Figura 4 Característica $i-v$ típica en zona directa.

El coeficiente de emisión cambia así mismo con la intensidad. Para distintos rangos de intensidad deberían usarse distintos valores de este coeficiente, tal como se ilustra en la Fig.4. Ésta muestra una característica $i-v$ típica para un diodo de unión en zona directa, sobre una escala semi-logarítmica. Para intensidades medias se obtiene $n = 1$, mientras que tanto para intensidades grandes como para intensidades pequeñas se obtiene $n = 2$.

Así pues, cuando se proporciona un valor de n único para todo el rango de intensidades, hay que entender que dicho valor se obtiene mediante ajuste experimental, y que es función del rango de intensidades que se esté considerando.

Los diodos discretos de Silicio tienen normalmente $n = 2$, mientras que en los integrados de Silicio suele ser $n = 1$. En los diodos de Germanio suele ser $n = 1$.

- U_t tensión térmica, dada por,

$$U_t = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

donde $k = 1.38 \times 10^{-23}$ julios/kelvin es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta en grados Kelvin, y $q = 1.60 \times 10^{-19}$ culombios es la carga del electrón. A temperatura ambiente de 20°C la tensión térmica tiene un valor cercano a 25mV. Este es un dato numérico que conviene retener en la memoria porque será usado con mucha frecuencia. Mientras no se indique lo contrario, en todos los cálculos que se hagan con el diodo de unión se supondrá operación a temperatura ambiente.

En zona directa, para $v > 0$ y si $v > \sim 4nU_t$, la característica del diodo puede aproximarse por,

$$i \approx I_S e^{\frac{v}{nU_t}} \quad (6.4)$$

que será la que usemos normalmente. En zona directa, el diodo de unión puede operar con corrientes que cubran varios órdenes de magnitud de variación. Sin embargo, la naturaleza exponencial de la relación entre intensidad y tensión determina el que esta última cubra rangos mucho más reducidos. Esto queda claramente de manifiesto al despejar v de la

expresión anterior,

$$v \approx nU_t \ln\left(\frac{i}{I_S}\right) = 2.3nU_t \log\left(\frac{i}{I_S}\right) \quad (6.5)$$

Vemos pues que por cada década de variación de la intensidad, la tensión varía sólo en una cantidad igual a $2.3nU_t$. A temperatura ambiente y suponiendo $n = 1$, esto significa 58mV de variación de la tensión por cada década de variación de la intensidad. Así, por ejemplo, si $I_S = 10^{-15}$ A es posible hacer variar la intensidad desde 1nA hasta 1mA con una variación de la tensión de sólo 345mV.

En zona inversa, para $v < 0$ y si $|v| \gg U_t$ la característica del diodo puede aproximarse por,

$$i \approx -I_S \quad (6.6)$$

una corriente mucho más pequeña que la que se obtiene en zona directa. En la práctica la corriente en zona inversa puede ser mayor que I_S debido a fenómenos no contemplados por la ecuación (6.2). En cualquier caso, la corriente en zona inversa suele estar en el rango de los nAs.

Zona de Ruptura

Dentro de la zona inversa, al aumentar mucho la caída de tensión desde el terminal negativo hasta el terminal positivo del diodo, se observa que a partir de cierto valor, llamado *tensión de ruptura* E_z , la intensidad inversa aumenta muy rápidamente con la tensión. En estas condiciones, el diodo puede llegar a destruirse a no ser que se limite de alguna manera la intensidad que circula por él y por tanto su consumo de potencia. Dentro de la región de ruptura el dispositivo equivale a una fuente de tensión,

$$v \approx -E_z \quad (6.7)$$

cuyo valor es también fuertemente dependiente de la tecnología; típicamente varias decenas de voltio. La ruptura es un comportamiento parásito que debe evitarse en las aplicaciones del diodo de unión. Sin embargo, hay dispositivos, los diodos Zener, donde la ruptura es un proceso controlado y E_z toma valores en el rango de voltios.

Diodos Zener

El diodo Zener es similar al diodo de unión; su característica $i - v$ presenta también una zona directa, otra inversa, y otra de ruptura. La diferencia principal radica en que en el Zener la ruptura se produce para valores pequeños de la tensión inversa, en el rango de voltios. De hecho, los diodos Zener se fabrican para que la ruptura se produzca a tensiones pre-especificadas, desde 1.8V hasta 200V.

3. Modelos Circuitales del Diodo de Unión

3.1. Modelo de Diodo Ideal

Descartemos de momento la zona de ruptura y quedémonos sólo con las zonas directas e inversa. Los comportamientos del diodo en estas zonas los podemos describir cualitativamente en los siguientes términos:

- Para tensiones negativas, la corriente es negativa, muy pequeña y cambia poco con la tensión aplicada. Si la intensidad de corriente es lo suficientemente pequeña como para que pueda despreciarse, podemos simplificar la descripción del comportamiento afirmando, simplemente, que la intensidad en zona inversa es nula.
- Para tensiones positivas, la intensidad de corriente, positiva, aumenta muy rápidamente al aumentar sólo ligeramente la tensión. De otro modo, podríamos decir que el diodo de unión permite que pasen las corrientes positivas sin cambios apreciables de la tensión, de hecho con valores pequeños de la tensión.

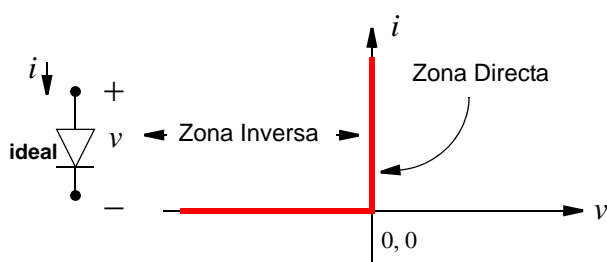


Figura 5 Característica i - v de un diodo ideal.

En primera aproximación podremos, por tanto, representar el comportamiento de un diodo real mediante un elemento de circuito – el diodo rectificador ideal – con la característica de la Fig.5. En Temas posteriores veremos que es posible construir resistores con características muy cercanas a las de un diodo ideal. De momento estas características constituyen sólo una *aproximación de orden cero* al comportamiento real de un diodo.

Nótese que el elemento de circuito diodo ideal equivale a un *circuito abierto* en la *zona inversa*, donde la caída de tensión es negativa. Por contra, si la caída de tensión aumenta hasta el punto de que la corriente se vuelva positiva, el elemento entra en *zona directa*, donde su comportamiento equivale a un *cortocircuito*. En Electrónica es común decir que el diodo está *polarizado en directa*, o en *inversa*, para referirse a que opera en la zona directa, o en la inversa, respectivamente.

Supongamos que disponemos un diodo ideal conectando dos subcircuitos, tal como se muestra en la Fig.6. Así conseguiremos que estos dos subcircuitos sólo intercambien corriente cuando ésta circule desde el **A** hacia el **B**, quedando “aislados” en caso contrarioⁱ. Esta posibilidad de impedir selectivamente el paso de corriente tiene importantes aplicaciones prácticas, entre las que destacan la rectificación y la limitación de tensiones.

i. Tal aislamiento no es total en la práctica. A medida que aumenta la frecuencia de las señales implicadas aumenta el acoplamiento entre los dos subcircuitos.

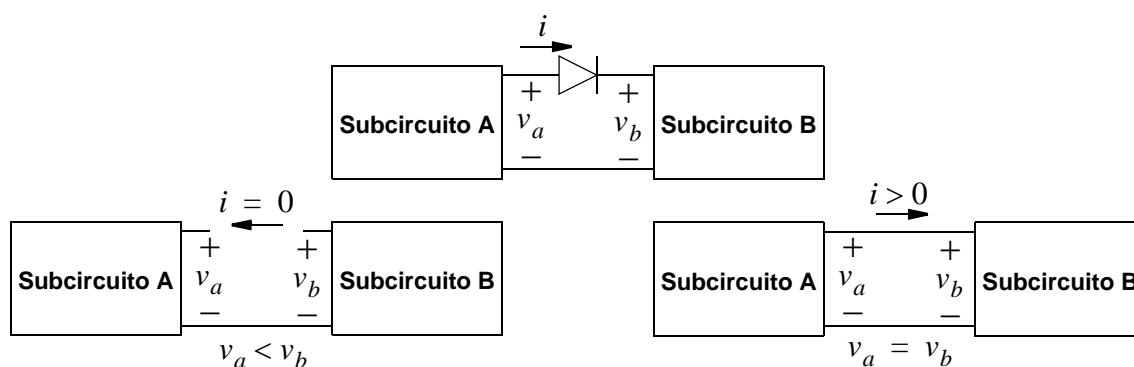


Figura 6 Conexión de dos subcircuitos mediante un diodo y equivalentes en zona directa e inversa.

Al igual que en el caso del diodo de unión, para el diodo Zener puede definirse también el elemento diodo Zener ideal con la característica mostrada en la Fig.7(a). Esta característica equivale a la del circuito mostrado en la Fig.7(b), constituido por la conexión en paralelo de un diodo ideal con un resistor consistente a su vez en la conexión en serie de un diodo ideal y una fuente de tensión. Repasen la aplicación de limitación en tensión usando diodos ideales; para esta aplicación se necesitan diodos y fuentes de tensión. En lugar de ello, es posible usar sólo diodos Zener, conectándolos tal como se muestra en la Fig.7(c). De esta manera el diodo de arriba limitaría las tensiones negativas al intervalo $[-E_{z-}, 0]$, y el de abajo las limitaría al intervalo $[0, E_{z+}]$.

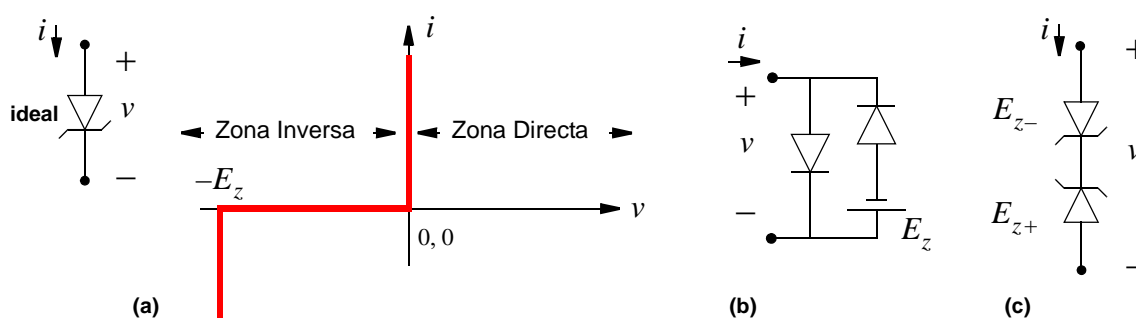


Figura 7 Diodos Zener: (a) característica i - v ideal; (b) modelo; (c) conexión para limitar la tensión.

3.2. Modelo de Diodo Ideal con Tensión de Corte (Cut-In)

Descartando también la zona de ruptura de la característica y considerando sólo la operación en directa e inversa, podemos aproximar el comportamiento real del diodo de manera más fidedigna utilizando un *modelo de primer orden*. Si retomamos la característica real del diodo de la Fig.3, podemos observar cómo la intensidad es pequeña para valores de tensiones pequeños, aunque positivos, y sólo crece de forma muy rápida cuando se alcanza un rango determinado de tensiones positivas.

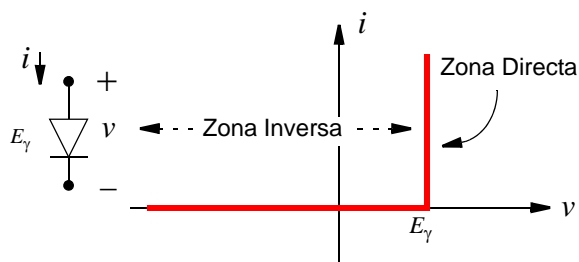


Figura 8 Característica $i-v$ de un diodo ideal con tensión de corte.

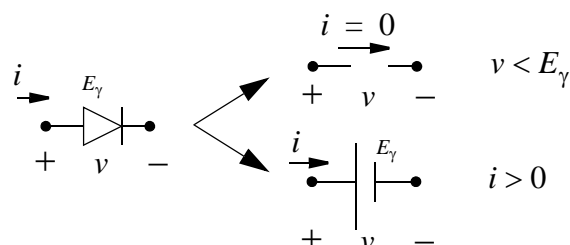


Figura 9 Equivalentes en inversa y directa de un diodo ideal con tensión de corte.

El modelo de diodo ideal con tensión de corte aproxima este comportamiento considerando que para tensiones menores que un valor dado, la corriente (positiva o negativa) es muy pequeña y puede despreciarse. En esta aproximación podemos por lo tanto representar el comportamiento del diodo real mediante un elemento de circuito cuya característica $i-v$ es la mostrada en la Fig.8.

Nótese que con este modelo, tal y como indica la Fig.9, el diodo equivale a un *circuito abierto* en la zona inversa, donde la caída de tensión es $v < E_\gamma$. Por contra, si la caída de tensión aumenta hasta el punto de que la corriente se vuelva positiva, el elemento entra en zona directa, donde equivale a una *fuerza ideal de tensión* de valor $v = E_\gamma$.

El valor de la tensión de corte E_γ , que delimita las zonas directa e inversa, es fuertemente dependiente de la tecnología. En diodos discretos de Silicio suele tomar valores entre 0.2V y 0.5V.

3.3. Modelo de Diodo con Tensión de Corte y Pendiente Finita

El modelo anterior se puede utilizar como punto de partida para realizar una *aproximación de segundo orden* del comportamiento real del diodo. Teniendo en cuenta el modelo de diodo ideal con tensión de corte, en zona directa cualquier intensidad positiva puede fluir a través del diodo sin que la caída de tensión entre sus terminales varíe, ya que el diodo sería equivalente a una fuente de tensión ideal de valor E_γ .

Volvamos a considerar la característica $i-v$ real mostrada ilustrada en la Fig.3. En ella podemos observar cómo la intensidad crece de forma rápida cuando se alcanza un rango determinado de tensiones positivas. Sin embargo, una vez en esta zona, la intensidad a través del diodo no es independiente de la caída de tensión entre sus terminales, de forma que incrementar la corriente conlleva necesariamente un aumento de la tensión.

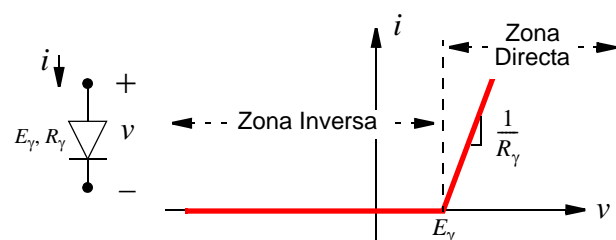


Figura 10 Característica $i-v$ de un diodo con tensión de corte y pendiente finita.

El modelo de diodo con tensión de corte y pendiente finita aproxima este comportamiento considerando que las intensidades positivas aumentan linealmente con la tensión, de forma que el diodo real se representa mediante un elemento de circuito cuya característica $i-v$ es la mostrada en la Fig.10.

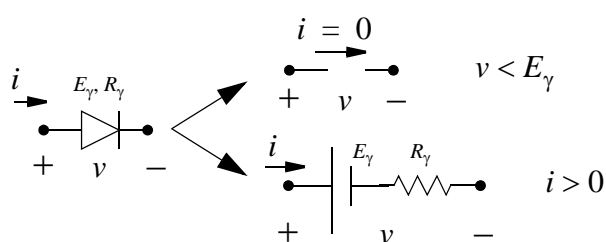


Figura 11 Equivalentes en inversa y directa de un diodo con tensión de corte y pendiente finita.

Con este modelo, tal y como indica la Fig.11, el diodo equivale a un *circuito abierto* en la zona inversa, donde la caída de tensión es $v < E_\gamma$. Por contra, si la caída de tensión aumenta y la corriente es positiva, el elemento entra en zona directa, donde equivale a una *fuentes real de tensión* de valor E_γ y resistencia interna R_γ .

El valor de la *tensión de corte* E_γ , que delimita las zonas directa e inversa en este modelo, es dependiente de la tecnología. Lo mismo ocurre con R_γ , que recibe el nombre de *resistencia del diodo en conducción*. En diodos discretos de Silicio suele estar entre $10\Omega \sim 10k\Omega$.

3.4. Modelos Lineales a Tramos

Los modelos anteriores constituyen una aproximación de bajo orden al comportamiento de un diodo rectificador real. Tales aproximaciones se consiguen mediante características $i - v$ que contienen sólo dos tramos. Añadiendo más tramos se obtienen modelos más precisos; tanto más precisos cuanto más tramos añadamos.

4. Análisis de Circuitos con Diodos de Unión

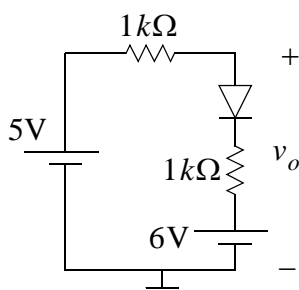
El análisis de circuitos que contienen diodos se suele afrontar empleando modelos del dispositivo para simplificar la tarea. Los pasos generales a seguir en el análisis de circuitos con diodos son los siguientes:

- Seleccionar el modelo de diodo más adecuado para el circuito que se desea analizar. Como norma general se emplea el modelo más simple que conduzca a resultados suficientemente exactos.
- Suponer un estado determinado (operación en directa o inversaⁱⁱ) para los diferentes diodos del circuito y substituir los diodos por el equivalente del modelo seleccionado en ese estado.
- Resolver el circuito resultante, calculando las tensiones e intensidades en cada parte del circuito.
- Verificar, a partir de la resolución del circuito, si el estado supuesto para cada diodo es el correcto. Si es correcto podemos dar por concluido el proceso de análisis.
- En caso de que el estado supuesto para alguno de los diodos del circuito no sea correcto, volver al segundo paso y suponer una nueva combinación de estados para los diodos.

ii. En el caso de que el circuito contenga diodos Zener, lógicamente deberemos considerar también su posible estado en zona de ruptura.

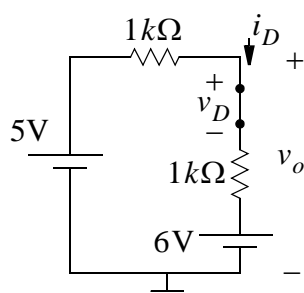
Nótese que para un circuito con N diodos existen al menos 2^N combinaciones de estados posiblesⁱⁱⁱ.

Ejercicio 1



Determine la tensión v_o en el siguiente circuito, utilizando un modelo ideal para el diodo.

Comenzaremos suponiendo que el diodo opera en zona directa. Teniendo en cuenta que el diodo ideal será entonces equivalente a un cortocircuito, pasamos a sustituir el equivalente y resolver el circuito resultante.

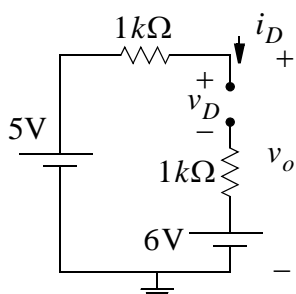


$$i_D = \frac{5-6}{1k+1k} = -0.5\text{mA} \Rightarrow v_o = -0.5\text{mA} \cdot 1k\Omega + 6\text{V} = 5.5\text{V}$$

$$v_D = 0, \text{ pero no se cumple } i_D > 0 \Rightarrow \text{El diodo no está ON}$$

La solución no es correcta

Dado que no se verifica que el estado supuesto sea correcto, debemos considerar que el diodo opera en zona inversa. De esta forma:



$$i_D = 0 \Rightarrow v_o = 5\text{V}$$

$$v_D = 5\text{V} - 6\text{V} = -1\text{V}$$

$$i_D = 0, \text{ y se cumple } v_D \leq 0 \Rightarrow \text{El diodo está OFF}$$

La solución es correcta

5. Aplicaciones del Diodo

5.1. Rectificadores

Rectificador de Media Onda

Los rectificadores de media onda y de onda completa se usan para transformar una tensión de *alterna* – AC – en otra de *continua* – DC. Se usan por lo tanto en todos los circuitos electrónicos, salvo los que van alimentados por baterías. El circuito rectificador de media onda – ver Fig.12(a) – se ajusta al modelo mostrado en la Fig.6; en este caso el sub-

iii. Si el circuito contiene diodos Zener, el número de combinaciones posibles es mayor ya que tendríamos tres posibles estados para cada uno de ellos, en lugar de dos.

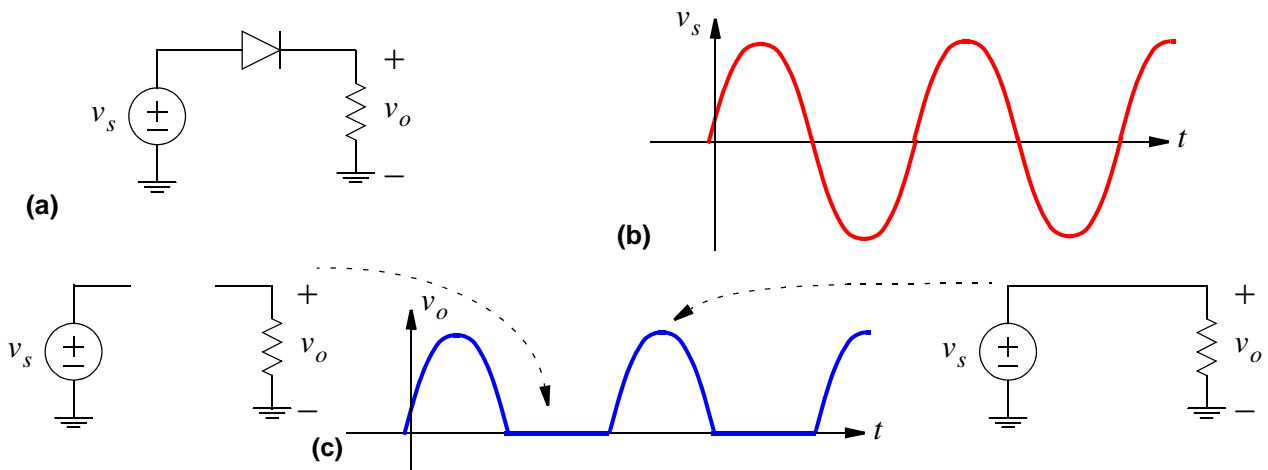


Figura 12 Rectificador de media onda con diodo y fuente ideales.

circuito **A** es simplemente una fuente de tensión alterna, mientras que el subcircuito **B** es una resistencia. La tensión v_a está por tanto fijada por la fuente; y la tensión v_b es nula, cuando no circule intensidad, o coincide con v_a , cuando el diodo conduce. Esto lo podemos interpretar diciendo que el circuito transforma la tensión de entrada, definida por la fuente, en una tensión de salida, la que cae en el resistor, de acuerdo con,

$$v_o = \begin{cases} v_s & , v_s > 0 \\ 0 & , v_s \leq 0 \end{cases} \equiv u_{2+}(v_s) \quad (6.8)$$

De este modo, si la tensión de entrada es la señal sinusoidal de alterna disponible en los enchufes de su casa,

$$v_s = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.9)$$

la señal de salida vendrá dada por,

$$v_o = u_{2+}[A \cdot \sin(\omega \cdot t)] = \begin{cases} A \cdot \sin(\omega \cdot t) & , 2k \cdot \pi < \omega \cdot t < (2k+1) \cdot \pi \\ 0 & , (2k+1) \cdot \pi < \omega \cdot t < (2k+2) \cdot \pi \end{cases} \quad (6.10)$$

La operación del rectificador de media onda se ilustra gráficamente en la Fig.12. Allí se muestra que la señal de salida sólo contiene valores positivos. Por tanto, al integrarla se obtendrá un valor positivo. En esto radica la base para la obtención de una tensión de *DC* a partir de la forma de onda de la Fig.12(c).

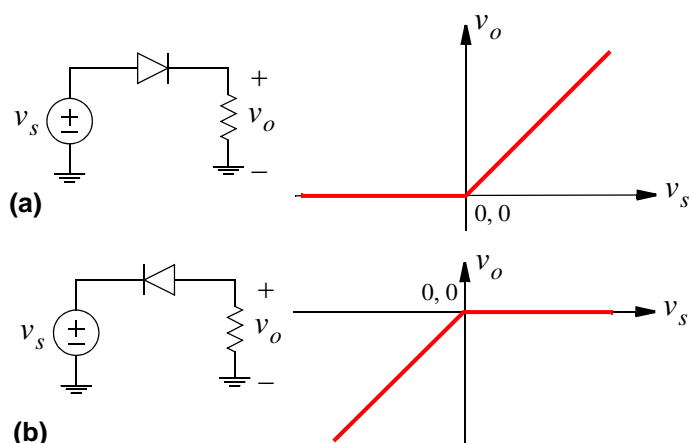
Rectificador de Onda Completa

Figura 13 Rectificadores de media onda positivos y negativos.

La Fig.13(a) muestra la característica tensión-de-salida frente a tensión-de-entrada para el circuito de la Fig.12(a). Es inmediato comprobar que la característica complementaria, mostrada en la Fig.13(b), se obtiene simplemente intercambiando los terminales del diodo; esta característica permitiría eliminar los semiciclos positivos de la señal de AC de entrada, dejando únicamente los negativos. Al integrar la señal así rectificada se obtendría, pues, un número negativo.

Cualquiera de los rectificadores de media onda desaprovechan la mitad de la señal original de AC. Esto puede evitarse usando un rectificador de onda completa, que realiza la transformación tensión-tensión mostrada en la Fig.14(c). Al pasar una señal de AC por un rectificador de onda completa se obtiene la forma de onda mostrada en la Fig.14(d), cuya integración da también un valor positivo pero doble del que se obtiene al integrar la forma de onda de la Fig.12(c).

Hay distintas maneras de realizar un rectificador de onda completa usando diodos ideales. Una posibilidad es usar el circuito que se muestra en la Fig.15(a), que contiene 4 diodos. Para mejor comprender la operación de este circuito es de interés contemplarlo como la superposición de dos rectificadores de media onda, tal como se muestra en la Fig.15(b). Cada rama rectificadora de media onda implementa la característica tensión-tensión que se muestra en la figura. La rama de arriba deja pasar intensidades positivas – representadas por i_+ – y, por tanto, valores positivos de la tensión de entrada; por contra, la rama de abajo deja pasar intensidades negativas – representadas por i_- – y, por tanto, valores negativos de la tensión de entrada. Nótese que en estos últimos la tensión de salida se obtiene con signo cambiado respecto a la de entrada. En cada rama la resistencia correspondiente “trabaja” únicamente durante la mitad del ciclo, y los ciclos de trabajo son complementarios. Podría pensarse, pues, en que las dos ramas compartieran una única resistencia. El obstáculo para ello es que en cada rama la tensión está referida a un terminal distinto de

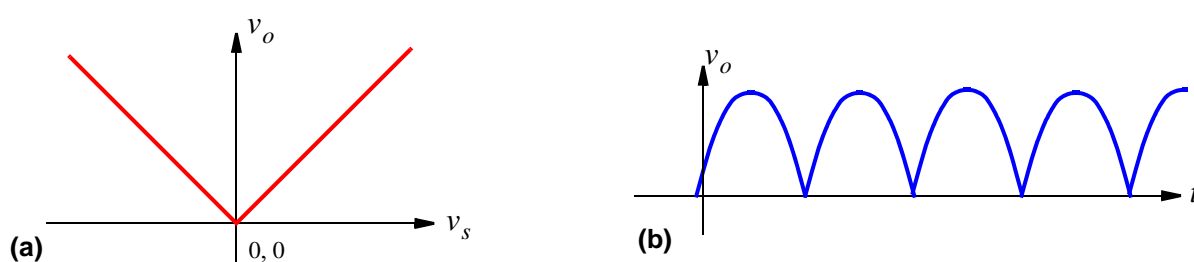


Figura 14 Característica tensión-tensión y señal de AC en un rectificador de onda completa.

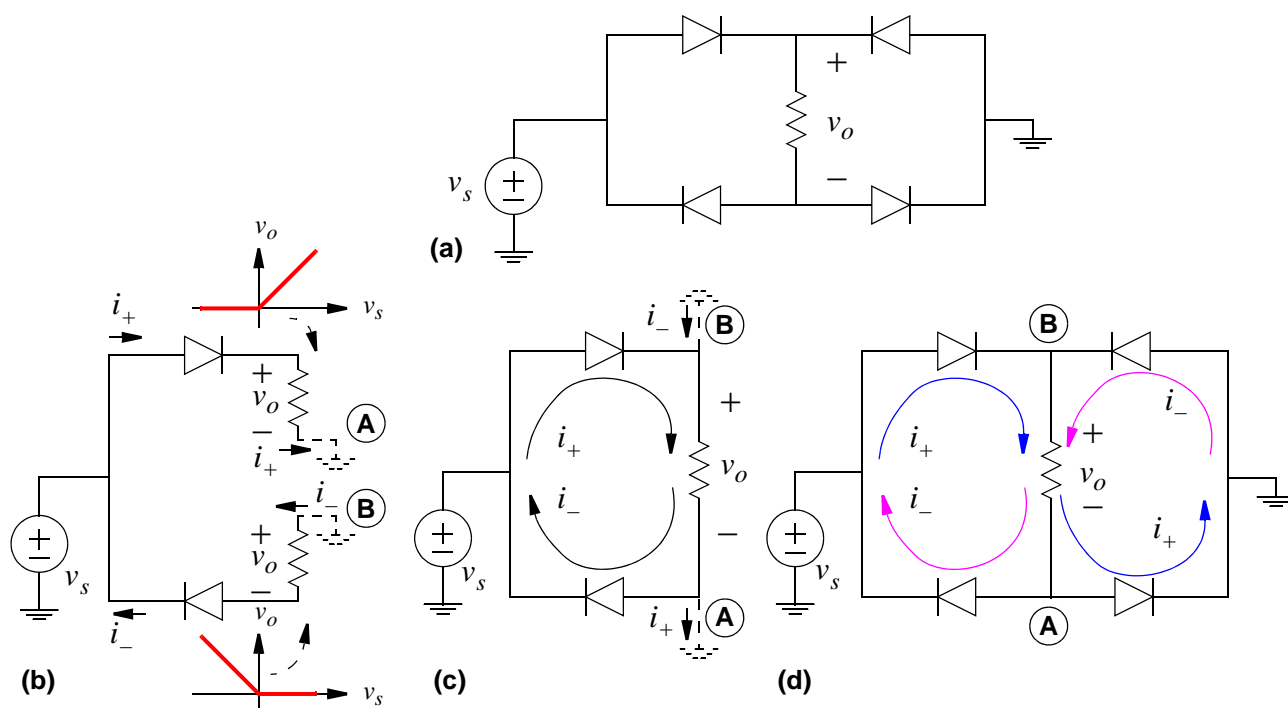


Figura 15 Rectificador de onda completa.

esta resistencia – ver Fig.15(c). Afortunadamente, en la rama de arriba la corriente que circula hacia el terminal de referencia es sólo positiva, mientras que en la rama de abajo es sólo negativa. A partir de un terminal común de referencia es posible, por tanto, conmutarlo bien a la rama de arriba o a la de abajo usando diodos, tal como se muestra en la Fig.15(d).

5.2. Limitadores

Limitador de Tensión

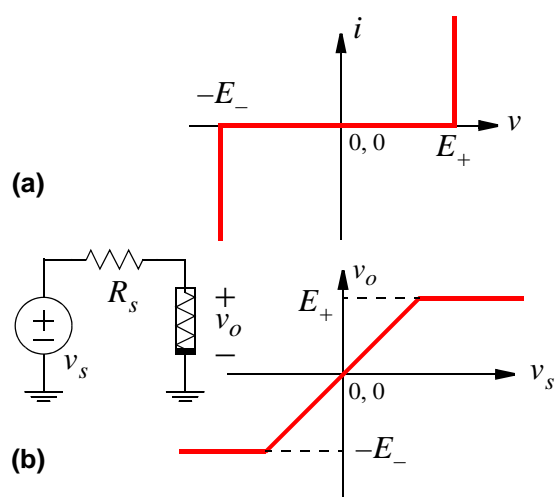


Figura 16 (a) Característica $i-v$ para limitar en tensión; (b) Característica entrada-salida de un limitador.

Un limitador de tensión es un circuito que impide que la tensión entre dos terminales supere unas cotas prefijadas; además, para tensiones comprendidas entre dichas cotas, los valores correspondientes no deben estar influidos por el limitador. Esto puede conseguirse mediante un resistor no-lineal que actúe como un circuito abierto dentro del rango de tensiones permitidas, y como una fuente de tensión para cada uno de los valores límite. Tal característica se muestra en Fig.16(a); y la operación de limitación de tensión se ilustra en la Fig.16(b); cuando la tensión de entrada v_s supera los valores límite, la tensión en exceso entre la entrada y las cotas fijadas por el resistor no-lineal cae en la resistencia de fuente.

Veamos ahora cómo realizar la característica de la Fig.17(a) con diodos ideales. Esto puede lograrse descomponiéndola en la suma, tensión a ten-

sión, de las dos características mostradas en la Fig.17(b). Es inmediato comprobar que la denominada i_+-v corresponde a un diodo conectado en serie con una fuente de tensión que produce un desplazamiento de la tensión cero. Por otra parte, nótese que al girar 180° en sentido horario la característica i_--v se obtiene otra similar a la i_+-v y que puede, por tanto, implementarse con la misma estructura de circuito. Puesto que un giro de 180° equivale a cruzar los terminales de entrada, esto nos permite obtener la característica i_--v . Una vez obtenidas las dos características componentes basta conectar los circuitos correspondientes en paralelo para que se sumen sus intensidades tensión a tensión, obteniéndose finalmente el circuito mostrado en la Fig.17(c).

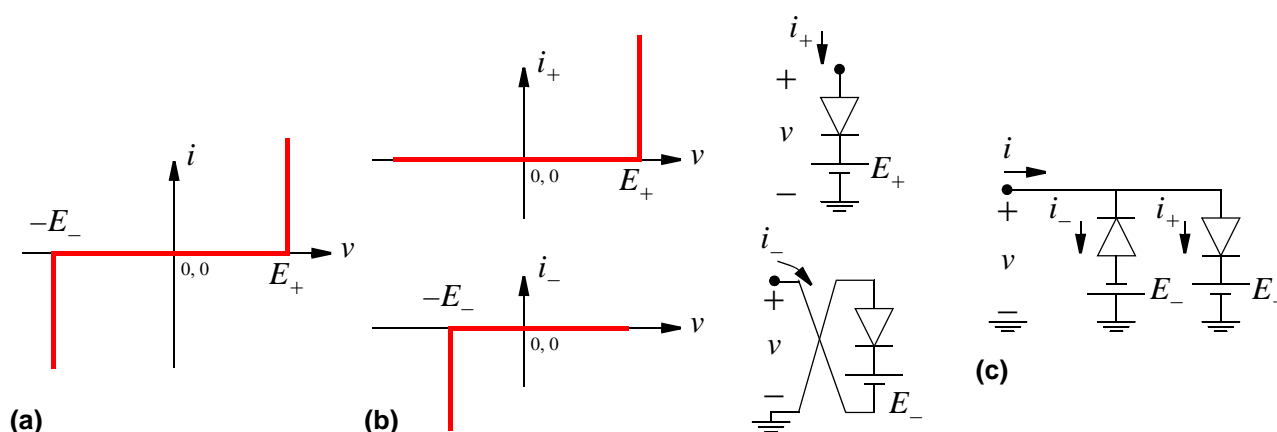


Figura 17 Proceso de síntesis para la característica resistiva de un limitador de tensión.

Limitador de Intensidad

La intensidad suministrada a un circuito también puede ser limitada usando diodos ideales. Esto es fácil de comprender dado que el diodo actúa como un interruptor de corriente cuando se le conecta en serie con un circuito; dependiendo de cómo se escoja la polaridad de sus terminales impide que pasen intensidades positivas o intensidades negativas. Al colocar fuentes de intensidad en paralelo con el diodo se desplaza el cero de intensidades, tal como se ilustra en la Fig.18(a). Nótese que los dos resistores mostrados en esta figura tienen características complementarias; el de arriba “permite” el paso de corrientes comprendidas en el intervalo $[-I_-, \infty)$, mientras que el de abajo permite el paso de corrientes en el intervalo $(-\infty, I_+]$. Al conectar estos dos resistores en serie la característica resultante se obtiene sumando sus tensiones para cada valor de la intensidad; esto significa “permitir” el paso sólo de las corrientes comprendidas en el intervalo $[-I_-, I_+]$. La operación de limitación de intensidad se ilustra en la Fig.18(b). Allí se observa que la corriente de salida depende de la de entrada sólo en el intervalo $[-I_-, I_+]$. Al alcanzar los límites de dicho intervalo la corriente de salida se fija a un valor constante y la corriente en exceso respecto a los valores límites circula por la resistencia de fuente R_s .

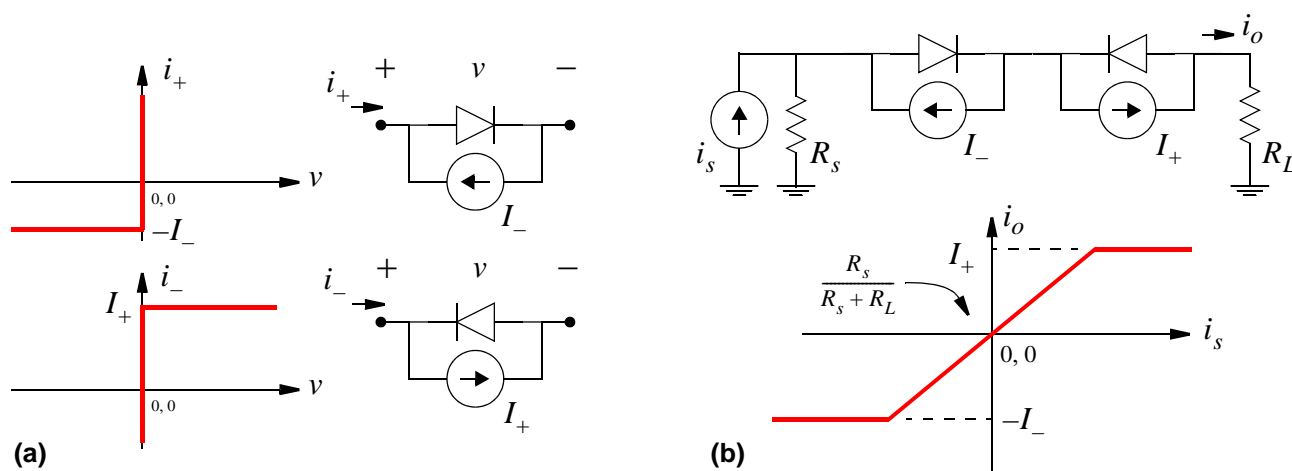


Figura 18 Limitador de intensidad: (a) síntesis de la característica resistiva; (b) característica entrada-salida de un limitador de intensidad.

5.3. Otras Aplicaciones

Detección de Tensiones Máximas y Mínimas

Supongamos que tenemos N tensiones $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ todas ellas positivas, con valores comprendidos dentro del intervalo $[0, E)$, y que deseamos identificar la que tiene el valor máximo o la que tiene el valor mínimo. Esto puede conseguirse usando los circuitos mostrados en la Fig.19(a) y (b), respectivamente.

La operación del circuito de la Fig.19(a) es fácil de comprender a partir de las descripciones realizadas en las aplicaciones previas y observando que todos los diodos comparten el terminal negativo. Dado que hemos supuesto que las tensiones de entrada son positivas, no es posible que todos los diodos estén en OFF^{iv} pues ello produciría tensión nula a la salida y, por tanto, caídas de tensión positivas en los diodos. A partir de aquí es intuitivo suponer que aquel diodo cuyo terminal positivo tenga la tensión más alta conducirá. De esta manera, la salida se fijará a dicha tensión máxima, provocando que las tensiones en los restantes diodos sean negativas y polarizándolos, por tanto en inversa. Esta posibilidad de transmitir la máxima entre un conjunto de tensiones se puede explotar para hacer puertas lógicas tipo OR.

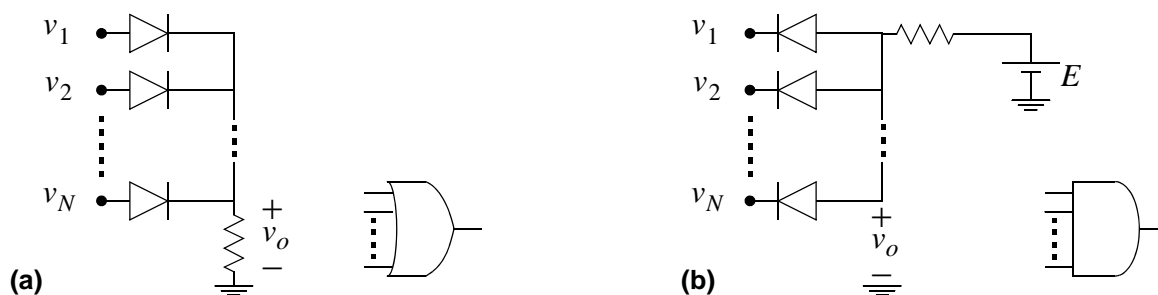


Figura 19 Identificación de máximos y mínimos usando diodos.

iv. Usaremos el término OFF para referirnos de modo sincrético a un circuito abierto; y el término ON para referirnos a un cortocircuito

Considere ahora el circuito de la Fig.19(b). Observe que ahora los diodos comparten el terminal positivo y que el resistor está conectado a una fuente de tensión con valor E . Recuerde que las tensiones de entrada son todas menores que este valor, $v_j < E, \forall j$. Si todos los diodos estuviesen en OFF, la tensión en el terminal positivo común sería E induciendo caídas de tensión positivas en los diodos. A partir de aquí es intuitivo suponer que aquel diodo cuyo terminal negativo tenga la tensión más baja conducirá, fijando la salida a dicha tensión mínima y provocando caídas de tensión negativas en los restantes diodos. Esta posibilidad de transmitir la mínima entre un conjunto de tensiones se puede explotar para hacer puertas lógicas tipo AND.

6. Control de las Características Mediante Parámetros Físicos. Sensores

En general las características de los resistores no-lineales cambian dependiendo de las condiciones físicas en las que operan; esto es: de la temperatura a la que trabajan, de si incide o no radiación sobre ellos, o de los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos, entre otros factores. Por ejemplo, en la Fig.20(a) se ilustran los cambios de la corriente al hacer incidir luz blanca sobre un diodo semiconductor sometido a una tensión negativa; mientras mayor sea la potencia de la luz que incide, mayor resulta ser la corriente que circula por el diodo. La Fig.20(b) es otro ejemplo de control del comportamiento de un resistor no-lineal mediante parámetros físicos, en este caso se ilustran los cambios en la característica de un diodo semiconductor con la temperatura; se observa que la intensidad para tensiones positivas varía al cambiar la temperatura.

Estos cambios pueden ser inconvenientes en aplicaciones donde se desea que las perturbaciones se reduzcan al mínimo; sin embargo, en otras pueden resultar de utilidad. Por ejemplo, podemos estimar la temperatura

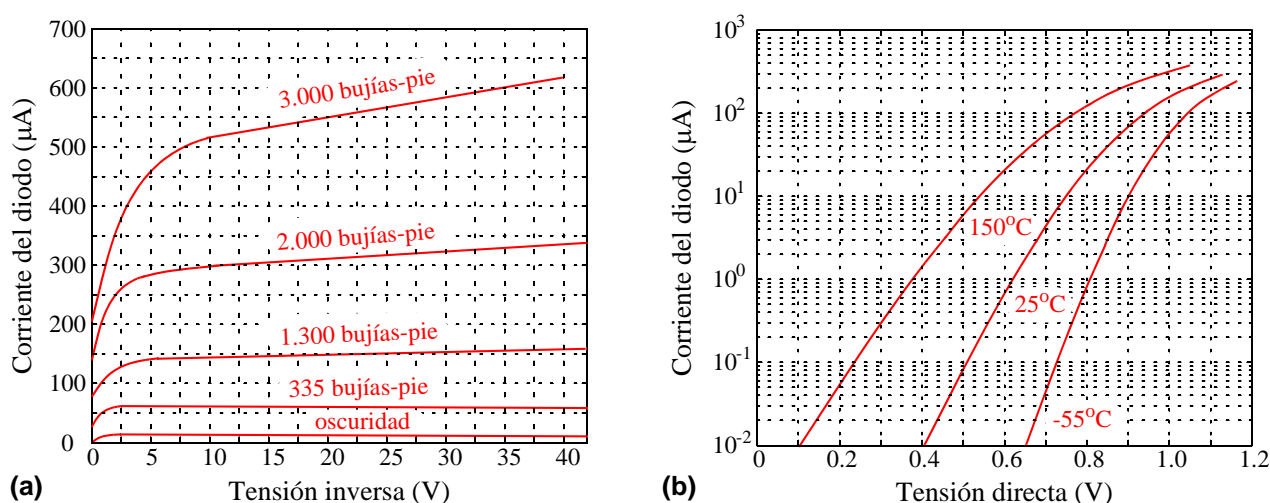


Figura 20 Variación de las características en función de parámetros físicos: (a) con la potencia de luz incidente (diodo Ge 1N77); (b) con la temperatura (diodo Si 1N3605).

midiendo las variaciones de tensión de un diodo semiconductor; o la intensidad de luz midiendo las variaciones de la corriente que circula por un diodo sobre el que incida luz pueden usarse como una medición de los procesos físicos que causan el cambio; esto es, para medir temperaturas, dosis de radiación, fuerzas, etc. De la misma manera que en esta asignatura renunciamos a comprender los fenómenos físicos subyacentes a la operación de los dispositivos electrónicos, tampoco intentaremos comprender exactamente por qué se producen dichos cambios. Los ejemplos citados sólo pretenden reforzar la idea de que las características de los resistores no-lineales, y en general las de cualquier dispositivo electrónico, pueden cambiar dependiendo de los parámetros físicos de su entorno de operación.