

- . ZENER . -

DIODOS DE RUPTURA Ó DIODOS ZENER

En muchas aplicaciones prácticas es necesario mantener una tensión sensiblemente constante sobre una carga, o mantener la tensión de un punto fijo respecto de otro tomado como referencia.

En el primer caso se dice que los dispositivos que se usan para esta función son “reguladores de tensión” y en el otro caso, que son “dispositivos de referencia”.

Los dispositivos que pueden usarse para estos fines son varios pero, los más característicos, son los diodos gaseosos (válvulas V.R.) y los diodos de estado sólido (diodos zener). En este capítulo estudiamos éstos últimos.

1. - TEORÍA DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS DIODOS ZENER.

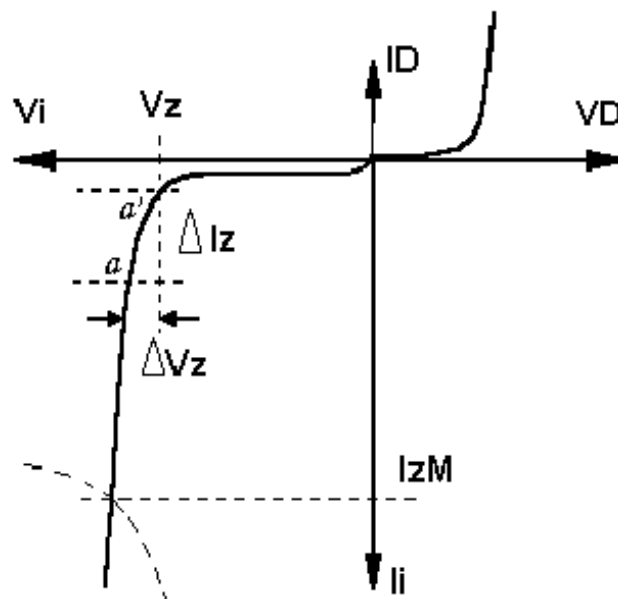


Figura 1.

El diodo zener es un dispositivo semiconductor que, si se lo polariza en forma directa presenta una característica (**V-I**) igual a la de todos los diodos de estado sólido; Figura 1.

El mismo diodo polarizado en forma inversa presenta una muy alta resistencia interna hasta una tensión inversa crítica, V_z , en donde se produce la ruptura de la juntura.

En dicho punto la resistencia interna cae a un valor pequeño; la corriente a través del diodo se incrementa quedando solamente limitada por la resistencia externa del circuito, mientras que la tensión entre sus electrodos permanece sensiblemente constante.

Estos dispositivos se diseñan con capacidad para disipar una potencia suficiente que les permita trabajar, en la zona de ruptura, sin deteriorarse. El proceso de ruptura en los zener no es irreversible pues, cuando la tensión aplicada es menor que V_z , el diodo vuelve a su condición de alta resistencia interna con bajísimas corrientes inversas.

En el caso de aplicación de los diodos zener estos operan en la región de ruptura y no se usan en la región de polarización directa.

Antes de entrar en el análisis de las aplicaciones de los diodos zener vamos a estudiar como se produce la ruptura de la juntura de dichos diodos.

Este fenómeno no ocurre por un sólo mecanismo sino que, en realidad existen dos tipos de ruptura que dependerán de la concentración de impurezas que exista en cada lado de la juntura y por lo tanto, del ancho de la misma (zona de agotamiento o de carga espacial).

Los mecanismos que pueden producir la ruptura de una juntura son:

- a) Ruptura por efecto zener.
- b) Ruptura por avalancha.

Sin embargo, el término zener se usa indistintamente para denominar a los diodos, tanto que rompan por avalancha como por efecto zener.

1. 1. - RUPURA POR EFECTO ZENER.

En este caso el efecto se produce cuando el entorno de la juntura, en ambos lados, se contamina con una muy alta concentración de impurezas.

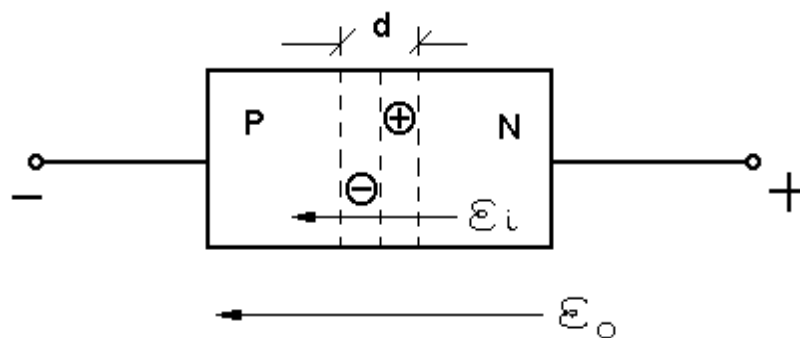


Figura 2.

De ese modo se forma una zona de carga espacial muy angosta d y el campo interno E_i muy elevado (mayor que 10^6 V/m); Fig. 2.

Si ahora se aplica una tensión externa inversa entre sus electrodos se forma un campo externo E_0 que se suma al campo interno E_i .

Si crece V_0 , se puede alcanzar un valor donde la suma de ambos campos produzca un campo resultante que origina la ruptura de ligaduras covalentes en la zona de agotamiento, creando electrones y huecos, que producen una brusca e importante corriente eléctrica a través de la juntura, mientras la tensión en ella permanece casi constante.

Como el campo interno E_i es de valor cercano al necesario para producir la ruptura de los enlaces, se necesita un campo externo, relativamente chico, para llegar al valor de campo crítico que produzca la ruptura de la juntura.

La tensión externa necesaria para producir este fenómeno es generalmente menor de los **6V** y, en este caso, decimos que el diodo rompe por “efecto zener”.

Los portadores libres existentes en la zona de juntura no alcanzan a adquirir suficiente energía para producir nuevos portadores por colisión o choque, o si los producen, no son un número importante para modificar el mecanismo de ruptura.

La falta de energía cinética que necesitarían poseer los portadores libres para producir, por choque, pares electrón-laguna que incrementan la corriente de juntura no se alcanza pues, si bien el campo total es intenso, el camino medio libre que recorren los electrones libres, entre choques, no es suficiente para que adquieran la energía cinética de ionización.

1.2. - RUPTURA POR EFECTO AVALANCHA.

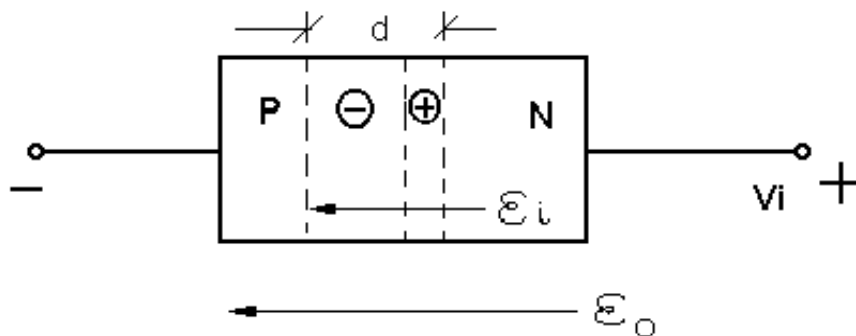


Figura 3.

El efecto avalancha ocurre en diodos donde un lado de la juntura está fuertemente dopado respecto del otro. La tensión de ruptura, en estos casos, es inversamente proporcional a la concentración de impurezas del lado menos dopado.

En este caso la zona de carga espacial es más ancha, y el campo interno \mathbf{E}_i es chico; figura 3.

¿Cómo se produce entonces la avalancha?

Dentro de la zona de carga espacial siempre existen portadores libres debido a la generación térmica.

Si comenzamos a aumentar el valor de la tensión inversa V_i ya sabemos que se origina un campo \mathcal{E}_0 que se suma al campo interno \mathcal{E}_i (que ahora es de valor pequeño).

Mientras el valor de V_i sea bajo, el campo total sobre la juntura no es suficiente para producir, por choque, pares electrón-laguna en cantidad suficiente como para alterar mucho el valor de la corriente a través de la juntura.

A medida que V_i aumente aumentará el campo total sobre la zona de carga espacial; los portadores libres (al tener mayor camino medio libre) aumentarán su energía cinética y los choques tendrán la probabilidad de arrancar electrones ligados a los átomos de la red cristalina; se producirán mayor cantidad de pares electrón-laguna lo que llevará a un aumento de la corriente de juntura (recordar que, en una juntura polarizada en forma inversa, la corriente de juntura está formada por portadores minoritarios).

Un mayor número de portadores libres aumenta la probabilidad de choques y, si el campo externo sigue creciendo, mayor será la energía cinética adquirida por los portadores libres lo que lleva a un nuevo aumento de la corriente en el diodo al producirse mayor cantidad de pares electrón-hueco por esos choques.

El proceso es acumulativo y se denomina “multiplicación por avalancha” Si se sigue aumentando la tensión inversa externa se llega a un valor crítico donde la corriente en el diodo crece en forma brusca; se ha llegado a la ruptura de la juntura.

El valor de la corriente en el diodo solo puede ser limitado por el circuito externo y la tensión entre ánodo y cátodo permanece casi constante (V_z).

Una vez alcanzado el valor de la tensión de ruptura, si la tensión externa V_i sigue creciendo, la tensión V_z se mantiene sensiblemente constante a costa de un crecimiento de la corriente en el diodo.

Ya hemos visto que esto mismo ocurre cuando la ruptura se produce por efecto zener.

Los valores de V_z que producen ruptura por avalancha están por encima de los **8V**.

Debemos tener presente que ambos mecanismos estudiados están presentes en el proceso de la ruptura de la juntura predominando el efecto zener para tensiones menores de **6V**. y el efecto avalancha para tensiones mayores de **8V**.

Entre estas tensiones existe un rango de valores ($6V \leq V_z \leq 8V$) en el cual los dos mecanismos existen simultáneamente predominando uno u otro, según sea la distribución exacta de impurezas en las junturas.

Aún sabiendo que existen ambos mecanismos, el término “diodo zener” se utiliza para denominar tanto a los diodos de avalancha, como a los de efecto zener.

En la actualidad, se pueden encontrar en el mercado, diodos zener de silicio con tensiones de zener desde **2,4V**. hasta tensiones del orden de **200V**. (generalmente los valores de tensión de zener no son números enteros) y con probabilidades de disipar hasta **50W** de potencia en la juntura.

2. - RESISTENCIA DINÁMICA.

Si en la figura 1 consideramos el punto **a** y damos una variación ΔV_z a partir de dicho punto, el punto nuevo de funcionamiento se habrá desplazado al punto **a'** habiendo ocurrido una variación ΔI_z en la corriente de funcionamiento del diodo.

A la relación:

$$rd = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z} \quad (3)$$

Se la llama “**resistencia dinámica**” del diodo y, geoméricamente, está representada por la inversa de la pendiente de la recta en el punto de funcionamiento **a**.

Se nota en la gráfica que la resistencia dinámica es baja en todo el rango de uso del zener, excepto cuando se opera cerca del codo.

En efecto, a la derecha del codo para un dado ΔV_z la variación de la corriente del diodo es pequeñísima debido a lo cual la resistencia dinámica que presenta el diodo es muy alta.

Los fabricantes suelen fijar el valor mínimo de corriente de zener I_{zK} por debajo de la cual no se debe trabajar el zener como regulador.

La corriente I_{zK} corresponde al codo de la curva característica.

A la izquierda del codo la resistencia dinámica es baja, e idealmente quisiéramos que $M_z = 0$ lo que correspondería a una característica $V - I$ representada como una línea recta perpendicular al eje V_z , en la tensión de ruptura.

3. - CARACTERÍSTICA DE UN DIODO ZENER.

Las características de los diodos zener estarán dadas por los fabricantes en las llamadas "hojas características".

Según el fabricante las hojas características pueden traer un mayor o menor número de valores de parámetros.

Como las corrientes y las potencias que deben manejar los diodos zener son más o menos elevadas, se emplea el silicio en su fabricación.

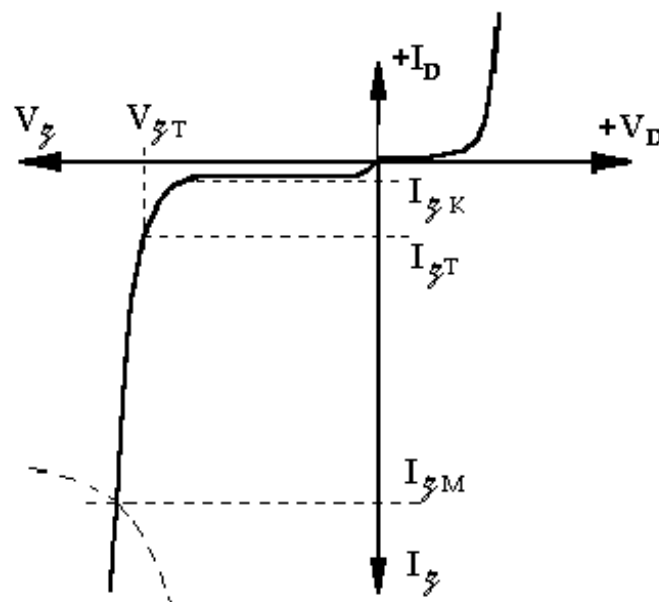


Figura 4.

La figura 4 nos servirá para ir definiendo los principales datos que se suelen conocer de los diodos zener:

a.- Tensión nominal de referencia **vzt:**

Es el valor típico, promedio, asociado a la tensión V_z .

b.- Corriente de prueba **izt:**

Es un valor típico de funcionamiento del diodo. Para el valor de I_{zT} se mide el valor de la tensión nominal de referencia **vzt**.

c.- Disipación máxima, **P_D**:

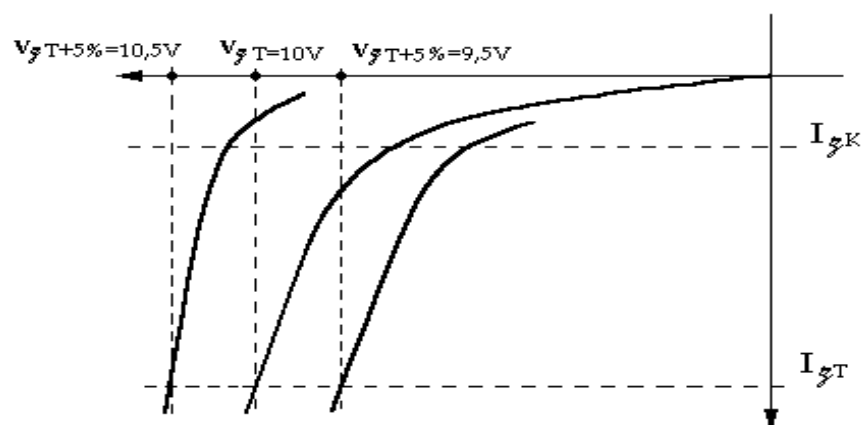
Es la potencia máxima que es capaz de disipar el diodo sin que se deteriore. Esto significa que, a la potencia máxima, la juntura no podrá sobrepasar la temperatura que destruya al diodo.

Generalmente la disipación o potencia máxima se conoce a la temperatura de referencia $T_0 = 25\text{ °C}$.

d.- Tolerancia:

Es un valor que depende del cuidado que se tenga en el proceso de fabricación. Al referirnos a la tolerancia estamos indicando la posibilidad de error que pueda existir en el valor de la tensión nominal de un diodo zener.

Así, un diodo de $V_{zT} = 10V \pm 5\%$ indica que el valor nominal puede estar comprendido entre **10,5 V** y **9,5V** debido a la tolerancia que presenta el valor



vzt.fig 5.

e.- Corriente máxima de uso; $I_{z M}$

Este valor no siempre está dado por los fabricantes ya que queda determinado por el valor de la potencia máxima disipada y por el valor de V_{zT} . Se calcula como:

$$P_{DM} = vzt. I_{z M} \quad (5)$$

$$I_{z M} = \frac{P_{DM}}{V_{zT}} \quad (6)$$

f.- Corriente de codo, I_{zk} :

Es el valor de la corriente mínima para la cual el Zener comienza a regular y se toma en el codo la característica donde la resistencia cambia de valores muy altos a valores muy bajos.

g.- Resistencia dinámica, R_{zT} :

Es la pendiente de la característica del diodo polarizado en sentido inverso medida en el punto de la corriente I_{zT} .

h.- Coeficiente de temperatura T_c :

Está definido en el párrafo N° 2, ecuación (1).

En las hojas de características adjuntas al final se pueden encontrar la mayoría de estos valores para algunos tipos de diodos que están clasificados por la potencia que pueden disipar. Dentro de cada potencia se los encuentra clasificados de acuerdo a la tensión de referencia nominal.

5. - Aplicaciones de los diodos zener como reguladores de tensión.

Supongamos que tenemos que alimentar un equipo, que lo representamos por una R_L , con una tensión constante V_L y que además sabemos que la tensión de

entrada V_i y/o la corriente en la carga I_L pueden variar dentro de una gama de valores más o menos amplia.

Para trabajar con las condiciones impuestas usamos el sencillo regulador de tensión de la figura 6.

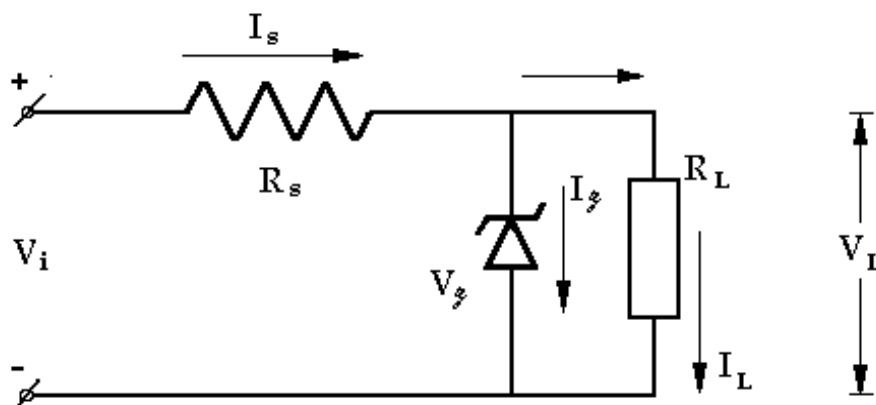


Figura 6.-

En el mismo observamos que la tensión V_L que se quiere regular es del mismo valor que V_z . Por lo tanto tenemos que demostrar que si varía la tensión de entrada V_i , o si varía la corriente en la carga I_L , por variación de R_L , la tensión $V_z = V_L$ permanece constante.

Estudiaremos los dos casos por separado aunque en la práctica, se pueden suceder los mismos en forma simultánea.

5.1- CASO 1º: La tensión continua de entrada puede variar.

En este caso la tensión V_i puede variar pero la corriente en la carga I_L se mantiene en un valor constante.

Vamos a explicar el funcionamiento del circuito regulador en forma cualitativa para lo cual usaremos la figura 7.

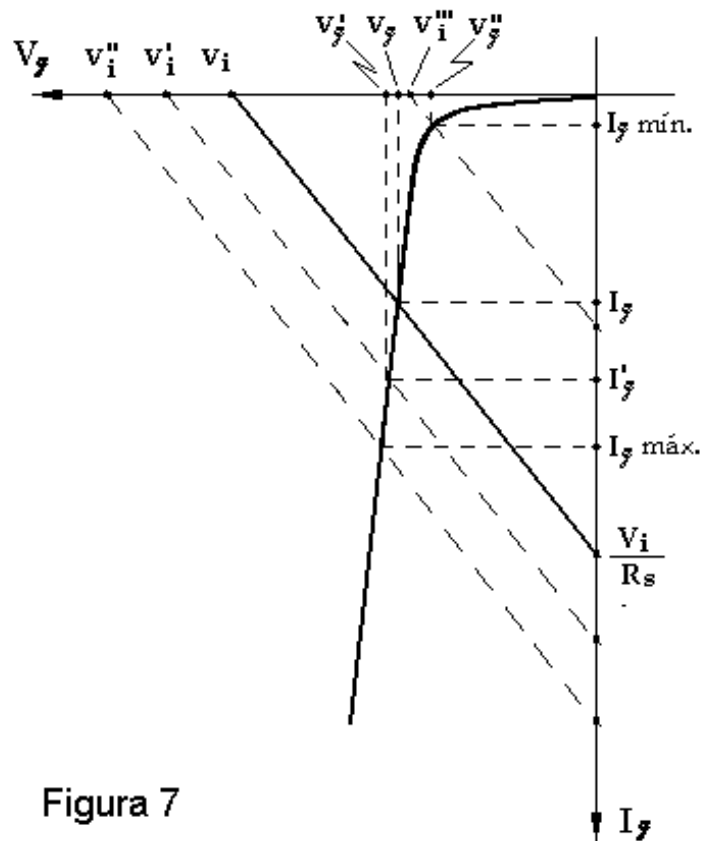


Figura 7

Figura 7.

Sobre la característica del Zener trazamos la recta de carga recordando que, para el zener su carga es R_S .

Los valores usados para este trazado son los que corresponden a los valores iniciales del problema.

La intersección de la recta de carga con la característica del diodo da el punto de funcionamiento determinado por los valores $V_Z - I_Z$.

Supongamos que ahora la tensión de entrada aumenta a un valor $V'_i > V_i$.

Al no variar R_S la pendiente de la recta de carga no varía y el punto de funcionamiento pasa a $V'_Z - I'_Z$.

Observamos que la caída de tensión $V'_z \cong V_z$, o sea que no ha variado prácticamente la tensión sobre el zener. Esta tensión casi constante se obtiene a expensas de la variación de la corriente en el zener que ahora es $I'_z > I_z$.

Nos preguntamos entonces hasta que valor puede aumentar la tensión de entrada. La respuesta es evidente en la figura. La tensión de entrada podrá variar hasta un valor V''_i tal que el punto de funcionamiento sea I_z mx. Si la corriente llegara a ser superior a I_z mx el diodo disipará mayor potencia que la admisible y no tardará en destruirse.

En forma análoga al razonamiento hecho, suponiendo que V_i aumenta lo podemos hacer para el caso que V_i disminuya.

Para este caso el límite mínimo de V_i ocurrirá cuando a la recta de carga corte a la característica del diodo en un punto tal que $I_z = I_z$ mín.

Se ve que, para este punto, la tensión sobre el Zener tiene un valor V'''_z casi igual a V_z .

Concluimos que, mientras la tensión de entrada varíe entre los valores V''_i y V'''_i , la tensión sobre el Zener y también sobre la carga R_L , se mantendrá con variaciones muy pequeñas o sea que V_z es sensiblemente constante.

Del mismo modo que hemos analizado el problema en forma gráfica, lo podemos hacer en forma analítica a partir de la ecuación general de malla circuito regulador. Dicha ecuación esta dada por:

$$V_i = I_S R_S + V_z \quad (7)$$

donde $I_S = I_L + I_z$ (8)

o sea $V_i = (I_L + I_z) R_S + V_z$ (9)

En la (9) tendremos que:

V_i Tensión de entrada; puede variar:

V_z Debe ser constante por condiciones del problema:

I_L Debe ser constante por condiciones del problema:

R_S Es un valor que se calcula y se incorpora al circuito, por lo tanto no varía durante el funcionamiento del regulador.

Entonces se V_i crece, para mantener la igualdad de la ecuación, I_z debe aumentar forzosamente. Esta condición es la misma que ya hemos encontrado en forma gráfica.

De forma análoga se observa que si V_i decrece es imprescindible que I_z disminuya.

Reiteramos que la V_z se mantiene casi constante en el intervalo varían entre I_z mínimo e I_z máximo.

Hay que hacer notar que las variaciones de I_z producen una caída de tensión sobre R_S que será variable pues $V_S = (I_L + I_z) R_S = I_S R_S$

Para comprender mejor el caso planteado ver el problema I.

5.2. - Caso en que la corriente en la carga varía.

En este caso tendremos como condiciones del problema:

V_i permanece constante;

V_z permanece constante por la condición que fija el regulador;

I_L es el valor que puede variar cuando la carga R_L se modifique por cualquier circunstancia.

Haciendo uso de la (9) y de las condiciones anteriores se encuentra el valor

$$(I_L + I_z) R_S \quad (10)$$

Siempre debe ser el mismo.

Por lo tanto, si suponemos que I_L aumenta en la carga, I_Z debe disminuir en el Zener pero nunca ser menor que I_Z mínimo.

En la misma forma si I_L disminuye, el valor de I_Z debe aumentar pero sin sobrepasar el valor de I_Z máximo.

La razón de las variaciones de I_Z se justifica pues el incremento de la corriente I_L , no puede provenir de la fuente de alimentación ya que la caída en R_S es constante y por lo tanto la corriente I_S , no puede cambiar mientras el diodo trabaje dentro de la zona de regulación.

La corriente adicional sólo puede ser debida a un cambio de la corriente del Zener. Así, si I_L aumenta, la corriente del Zener debe disminuir y viceversa.

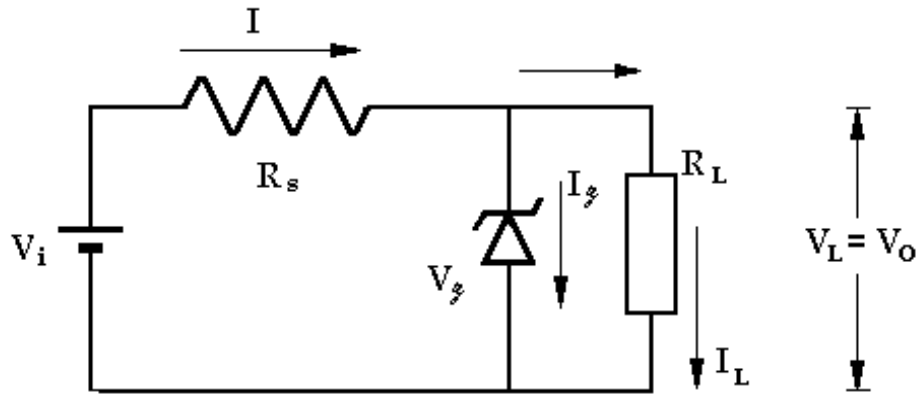
Para una mejor interpretación de este caso ver el problema **II**.

En la práctica se pueden presentar simultáneamente variaciones de R_L y V_i ; con los argumentos anteriormente expuestos no resulta difícil concluir que las dos combinaciones corresponderán a:

- a) La presencia de un V máximo y una I mínima, en cuyo caso la I_Z aumentará y deberá mantenerse igual o menor a la I_Z máxima del diodo.
- b) La presencia de un V_i mínimo y una I_L máxima en cuyo caso I_Z disminuirá, debiendo mantenerse igual o mayor a la I_Z mínima del Zener. El correcto diseño del circuito permitirá mantener el funcionamiento del diodo dentro de sus límites.

PROBLEMAS:

I.- Se desea mantener constante una tensión de 7,2 volts sobre una carga por donde circula una corriente I_L igual a 24 mA.



La tensión de entrada V_i es igual a 12 volts; se usa un diodo zener que disipa una potencia máxima de 0,4 watts y tiene una I_z mínima de 4 mA.

Se pide calcular los valores de V_i mínimo y V_i máximo que el diodo Zener puede regular;

$$+I = I_z + I_L \quad (1)$$

Aplicando el teorema de mallas se puede escribir:

$$V_i = IR_S + V_z = (I_z + I_L) R_S + V_z \quad (2)$$

De la (2) debemos calcular R_S que es un valor que no conocemos.

En ese caso se tomará una R_S tal que el diodo trabaje en forma estática, para I_z igual a I_z medio;

$$I_{z\text{m}} = \frac{I_{z\text{ mx}} + I_{z\text{ mín}}}{2} \quad (3)$$

El valor de $I_{z\text{ mx}}$ máximo no lo conocemos pero se puede calcular en función de la potencia máxima que puede disipar el diodo:

$$P_{z\text{ mx}} = V_{z\text{ mx}} \cdot I_{z\text{ mx}} \quad (4)$$

$$I_{z\text{ mx}} = \frac{P_{z\text{ mx}}}{V_{z\text{ mx}}} = \frac{0,4\text{ W}}{7,2\text{ V}} \cong 56 \times 10^{-3}\text{ A} \cong 56\text{ mA} \quad (5)$$

Usando el valor de la (5) en la (3), calculamos:

$$I_{z\text{m}} = \frac{(56 + 4) 10^{-3}}{2} = 30 \times 10^{-3}\text{ A} = 30\text{ mA} \quad (6)$$

De la (2) el valor de R_S , para el valor de $I_{z\text{ medio}}$ será:

$$V_i = (I_{z\text{m}} + I_L) R_S + V_z$$

$$R_S = \frac{V_i - V_z}{I_{z\text{m}} + I_L} = \frac{(12 - 7,2) \text{ V}}{(30 + 24) \cdot 10^{-3} \text{ A}} \cong 89 \Omega$$

Como este valor de R_S no es un valor comercial se elige una R_S igual a 91Ω que sí se consigue.

Entonces el valor de la tensión de entrada máxima será:

$$V_i \text{ mx} = (I_{z\text{ mx}} + I_L) R_S + V_z = (56 + 24) \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 91 \Omega + 7,2 \text{ V} = 14,48 \text{ V}$$

$$V_i \text{ mín} = (I_z \text{ mín} + I_L) R_S + V_z = (4 + 24) \cdot 10^{-3} \cdot 91 + 7,2 \text{ V} = 9,76 \text{ V}$$

Entonces en el circuito de la figura, el valor V_O de salida, sobre la carga, se mantendrá constante mientras la tensión de entrada V_i varíe entre **9,75** volts y **14,48** volts.

II.- Un diodo Zener regula una tensión de **50** volts, donde sobre una carga la corriente mínima que va a circular será de **0 mA**. La tensión de alimentación es de **90** volts y se usa un Zener cuya potencia máxima que puede disipar es de **10** watts y tiene una I_z mínima de **10 mA**.

Se pide calcular la corriente máxima de la carga de la R_S de regulación del circuito.

Usaremos el mismo circuito del problema anterior:

Datos conocidos:

$$V_i = 90 \text{ V y constante}$$

$$V_O = 50 \text{ V}$$

$$I_L \text{ mín} = 0$$

$$P_z \text{ mx} = 10 \text{ W}$$

$$I_z \text{ mín} = 10 \text{ mA}$$

Datos a calcular:

$$R_S =$$

$$I =$$

Si escribimos la ecuación de tensiones de malla:

$$V_i = (I_z + I_L) R_S + V_z \quad (1)$$

En nuestro caso los valores de V_i y $V_0 = V_z$, por condiciones del problema, son valores que se mantienen constantes. En estas condiciones, para que se cumpla la ecuación anterior, siempre

$$(I_z + I_L) R_S = \text{cte.} \quad (2)$$

Si R_S es un valor que, luego de calculado, es constante, entonces podremos escribir:

$$(I_z \text{ mín} + I_L \text{ mx}) = \text{cte.} \quad (3)$$

$$(I_z \text{ mx} + I_L \text{ mín}) = \text{cte.} \quad (4)$$

Con los datos conocidos usamos la (4):

$$I = I_z \text{ mx} + I_L \text{ mín} \quad (5)$$

Donde

$$P_z \text{ mx} = V_z \cdot I_z \text{ mx} \quad (6)$$

$$I_z \text{ mx} = \frac{P_{\text{mx}}}{V_z} = \frac{10 \text{ W}}{50 \text{ V}} = 0,2 \text{ A} \quad (7)$$

Entonces:

$$I = (200 + 0) \text{ mA} \quad (8)$$

Usando la (3) podemos calcular una de nuestras incógnitas:

$$I = I_z \text{ mín} + I_L \text{ mx}$$

$$I_L \text{ mx} = I - I_z \text{ mín}$$

Reemplazando valores:

$$I_L \text{ mx} = (200 - 10) 10^{-3} \text{ A} = 190 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 190 \text{ mA}$$

Ahora conocemos que nuestro circuito podrá regular una tensión constante sobre una carga variable siempre que, la corriente en la carga, varía entre **10mA y 190 mA**.

Ahora resulta sencillo calcular R_S . Usando la ecuación (4) y recordando la (2) y la (8) resulta:

$$R_S = \frac{V_i - V_z}{I_L + I_z} = \frac{(90 - 50) \frac{|V|}{|A|}}{0,2} = 200 \Omega$$

----- 0 -----