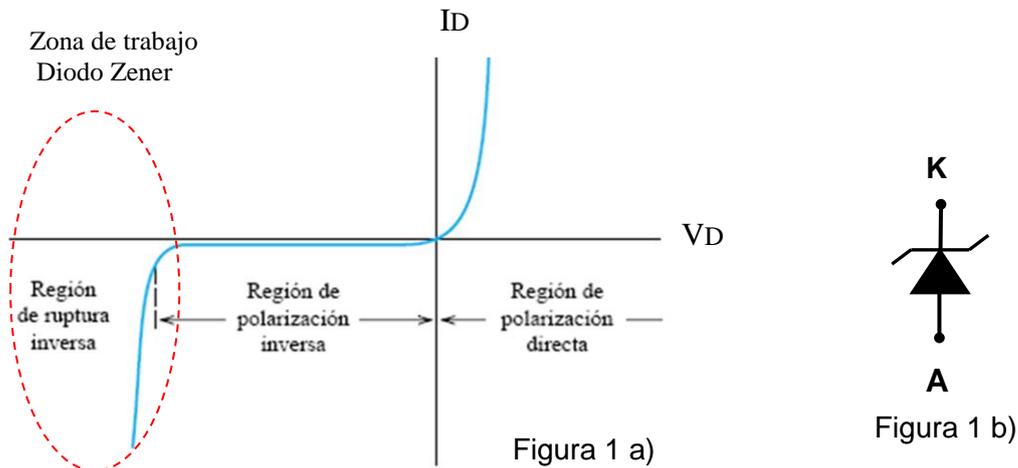


Diodo Zener

Cuando la tensión inversa aplicada a un diodo de juntura PN excede cierto valor denominado **tensión de ruptura** la corriente inversa crece muy rápidamente mientras que la tensión sobre el diodo permanece casi constante. Los diodos denominados genéricamente diodos **Zener** trabajan específicamente en esta zona, como se muestra en la figura 1 a). La figura 1 b) muestra el símbolo esquemático y los terminales.



En todas las junturas PN se produce el fenómeno de ruptura. Físicamente la ruptura se produce por dos fenómenos diferentes: ruptura Zener y ruptura por avalancha. El factor que determina cual mecanismo de ruptura ocurre en una juntura está determinado por las concentraciones de impurezas en los materiales que forman la juntura. La región de carga espacial siempre se extiende más en el material que tiene mayor resistividad. Una juntura que tiene una región de carga espacial angosta desarrollará un alto campo eléctrico y romperá por el mecanismo Zener. Una juntura con una región de carga espacial más ancha romperá por el mecanismo de avalancha. En forma comercial los diodos de ruptura, sin discriminar el mecanismo físico que la produce, se denominan diodos Zener.

Cualitativamente el mecanismo de ruptura Zener se produce debido a que la región de carga espacial es muy estrecha y con la aplicación de una relativamente baja polarización inversa (del orden de 5 V) el campo eléctrico en la región de carga espacial alcanza un valor aproximado a 3×10^5 V/cm. Este campo ejerce una gran fuerza sobre los electrones de valencia en los átomos de silicio, de modo que puede romper los enlaces covalentes generando pares electrón-hueco que rápidamente incrementan la corriente inversa. Si en el circuito donde se conecta el diodo no se coloca un resistor que pueda limitar la corriente el dispositivo podría destruirse por autocalentamiento. En general, los dispositivos con tensiones de ruptura menores a 5 V presentan ruptura Zener. Los dispositivos con tensiones de ruptura mayores que 8V presentan ruptura por efecto de avalancha. Entre 5 V y 8 V ambos mecanismos pueden estar involucrados.

En el proceso de ruptura por avalancha, denominada también ionización por impacto, los portadores libres que forman la corriente inversa de saturación pueden ganar energía del campo eléctrico y al chocar con la red cristalina rompen enlaces covalentes. Como cada portador que choca crea dos portadores adicionales, un electrón y un hueco, se produce una

rápida multiplicación de portadores en la región de carga espacial cuando la polarización aplicada tiene el valor suficiente como para desencadenar este proceso.

Efecto de la temperatura

Los mecanismos de ruptura Zener y avalancha varían de forma diferente con la temperatura. El valor de la tensión necesaria para producir la ruptura Zener decrece al aumentar la temperatura, en tanto que la tensión de ruptura aumenta con el incremento de la temperatura para la ruptura por avalancha.

En el caso de la ruptura Zener, el aumento de la temperatura aumenta la energía de los electrones de valencia. Esto debilita la fuerza de enlace y se necesita aplicar menos tensión para mover los electrones de valencia de sus posiciones alrededor del núcleo.

La dependencia con la temperatura de la ruptura por avalancha es muy distinta. Como la región de carga espacial es muy ancha al aumentar la temperatura crece la vibración de los átomos del cristal y aumenta la probabilidad de choques entre las partículas libres, electrones y huecos, y los átomos de la red. Los portadores libres tienen menos oportunidad de ganar la energía suficiente como para producir el proceso de avalancha y necesitan una mayor tensión para iniciar el proceso. La figura 2 muestra la diferencia del coeficiente térmico entre un diodo de ruptura de 3.3 V (Zener) y de 33 V (avalancha)

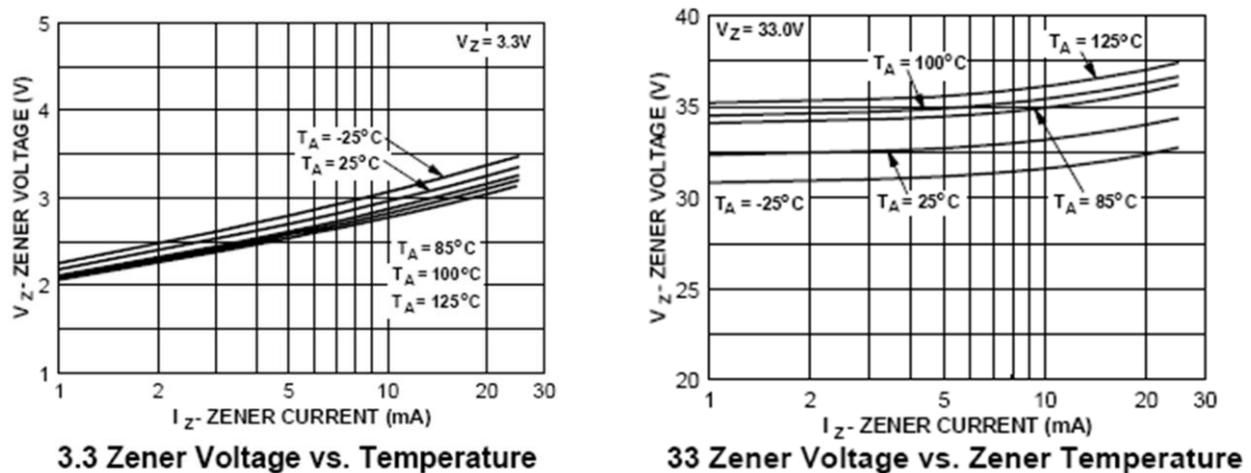


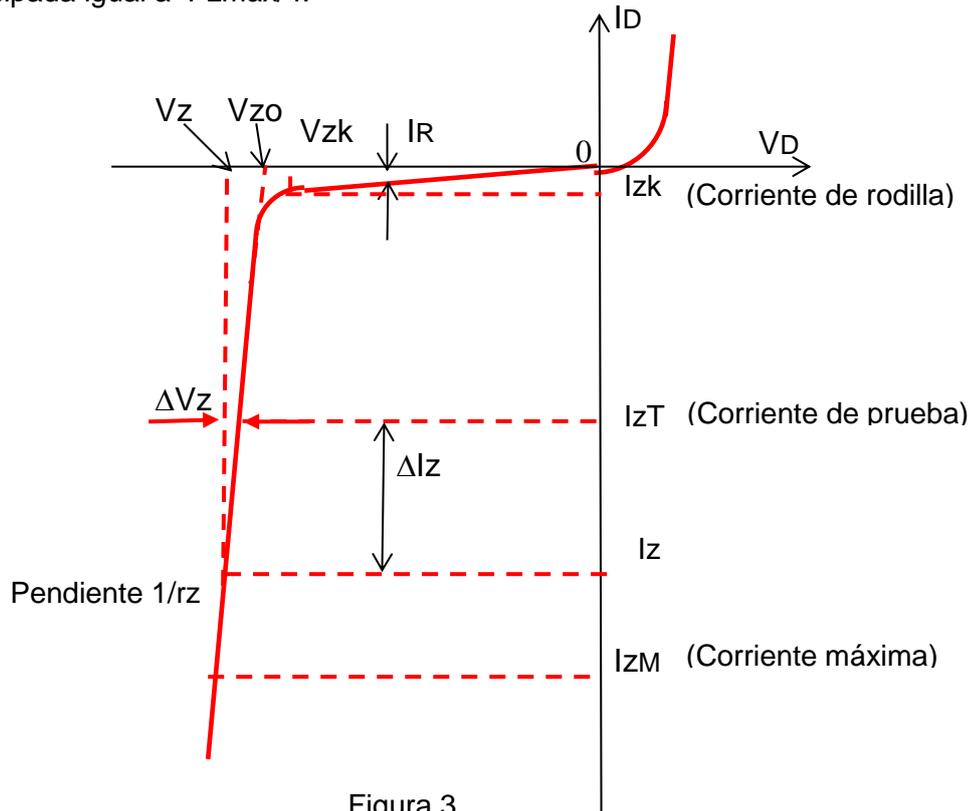
Figura 2

Característica corriente-tensión

La característica I_D - V_D del diodo en la figura 1 a) muestra que para un diodo de ruptura se identifican tres zonas o regiones de funcionamiento. En polarización directa el dispositivo se comporta como un diodo común con una tensión umbral V_γ . En polarización inversa se distinguen dos zonas bien definidas: la región inversa para la cual circula la corriente inversa I_R , y la región de ruptura (zona de trabajo para un diodo de tensión de ruptura V_{BR}).

La característica corriente-tensión se presenta en detalle en la figura 3. La corriente inversa I_R es una función del potencial inverso V_R , y para aplicaciones prácticas puede ser considerada despreciable. Cuando la tensión inversa $V_D = V_R$ se aproxima a la tensión de ruptura V_{BR} la corriente inversa aumenta bruscamente. Debido a este comportamiento, se distinguen dos corrientes en la región inversa: la corriente I_R cuando $V_R < V_z$ y la corriente

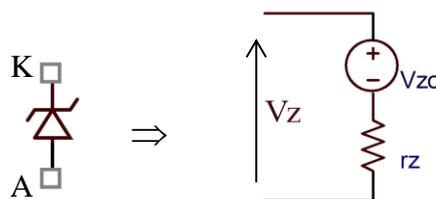
I_Z cuando $V_R \geq V_Z$. La tensión V_Z se denomina genéricamente tensión de ruptura Zener, sin diferenciar entre el mecanismo físico que origina la ruptura, efecto Zener o avalancha. Para el funcionamiento en la región de ruptura la corriente I_Z varía entre una $I_{Z\text{mínima}} = I_{Zk}$, denominada comúnmente *corriente de rodilla*, y que se corresponde con el punto de inflexión en la característica inversa, y la corriente $I_{Z\text{máxima}} = I_{ZM}$, limitada por la disipación máxima permisible: $I_{ZM} = P_{Z\text{máx}}/V_Z$. En el rango $I_{Zk} \leq I_Z \leq I_{ZM}$ la tensión se mantiene aproximadamente constante en V_Z . La corriente I_{Zk} varía dependiendo de las características o tipo de diodo y es un dato que da el fabricante en las hojas de datos del dispositivo. Algunas veces se especifica la corriente I_{ZT} (*corriente de prueba*) que se define para una potencia disipada igual a $P_{Z\text{máx}}/4$.



La inversa de la pendiente de la característica I_D - V_D se denomina resistencia incremental o dinámica r_z , y normalmente es de bajo valor. En algunos casos se especifica la tensión V_{Z0} , que corresponde a la tensión para la cual la pendiente $1/r_z$ interseca al eje de tensión. En la práctica $V_{Z0} \cong V_{Zk}$. Esta consideración permite determinar la tensión V_Z como:

$$V_Z = V_{Z0} + r_z I_Z$$

Usando la expresión anterior se puede construir el modelo eléctrico equivalente para la región de ruptura, figura 4.



La corriente inversa IR en la región de polarización inversa anterior a la ruptura es del orden de los nA a 25 °C y presenta una fuerte dependencia con la temperatura, figura 5.

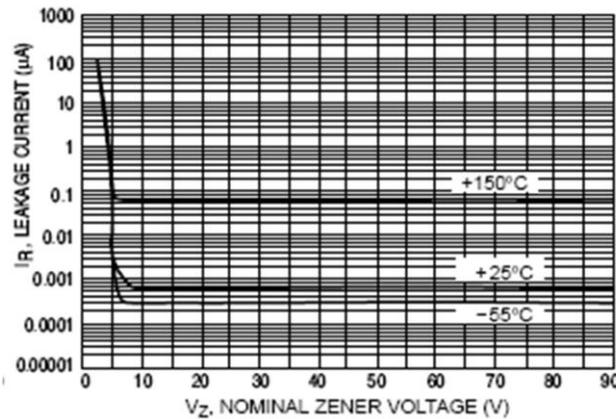


Figura 5

El coeficiente de temperatura se define como:

$$TC = \frac{1}{V_z} \frac{\Delta V_z}{T - T_0} \times 100 \left[\frac{\%}{^\circ C} \right]$$

ΔV_z es el cambio en la tensión Zener debido a la variación de la temperatura y puede ser positivo o negativo. También es un dato graficado en las hojas de datos, figura 6.

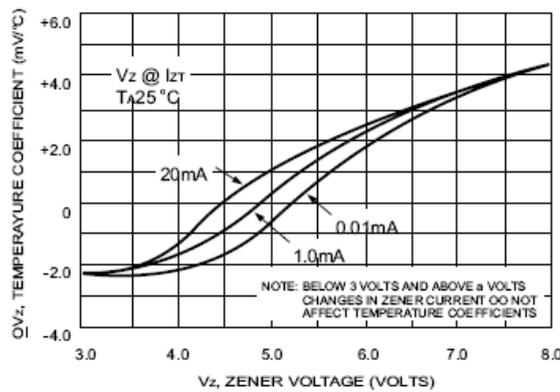


Figura 6

Encapsulados

La figura 7 muestra distintos tipos de encapsulado para diodos de ruptura Zener.

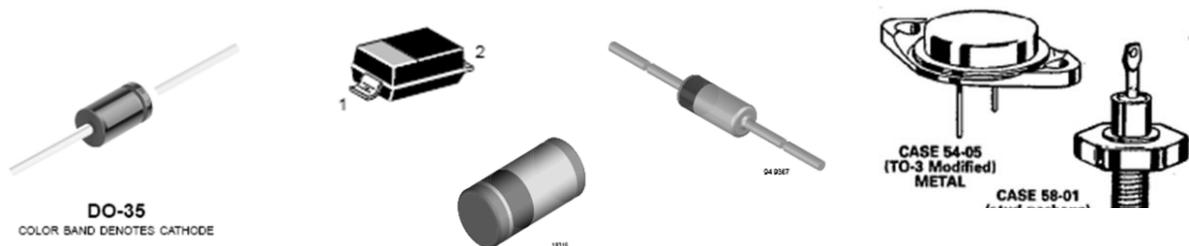


Figura 7

Hoja de datos

En la hoja de datos provista por el fabricante se encuentran las especificaciones y límites de funcionamiento necesarios para obtener un buen uso del dispositivo. Las Figuras 8 a) y b) muestran las características eléctricas indicadas en dos hojas de datos típicas.

1N746A - 1N759A

| Electrical Characteristics <small>T_A = 25°C unless otherwise noted</small> | | | | | | | | | |
|---|--------------------|--|---|---|-----------------------|-------------------------|--|--|--|
| Device | V _Z (V) | Z _Z (Ω) @ I _Z (mA) | I _{R1} (μA) @ V _R (V) | I _{R2} (μA) @ V _R (V) | T _C (%/°C) | I _{ZRM} * (mA) | | | |
| 1N746A | 3.3 | 28 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.070 | 110 | | | |
| 1N747A | 3.6 | 24 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.065 | 100 | | | |
| 1N748A | 3.9 | 23 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.060 | 95 | | | |
| 1N749A | 4.3 | 22 20 | 2.0 1.0 | 30 1.0 | +/- 0.055 | 85 | | | |
| 1N750A | 4.7 | 19 20 | 2.0 1.0 | 30 1.0 | +/- 0.030 | 75 | | | |

Figura 8 a)

1N957

| ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T _A = 25°C unless otherwise noted, V _F = 1.5 V Max @ I _F = 200 mA for all types) | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------------------------|-----|-------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----|---------------------------|-------|
| Device (Note 2.) | Device Marking | Zener Voltage (Note 3.) | | | Zener Impedance (Note 4.) | | | Leakage Current | | I _{ZM} (Note 5.) | |
| | | V _Z (Volts) | | | @ I _{ZT} | Z _{ZT} @ I _{ZT} | Z _{ZK} @ I _{ZK} | I _R @ V _R | | | |
| | | Min | Nom | Max | mA | Ω | Ω | mA | μA | | Volts |
| 1N957B | 1N957B | 6.46 | 6.8 | 7.14 | 18.5 | 4.5 | 700 | 1.0 | 150 | 5.2 | 47 |
| 1N958B | 1N958B | 7.125 | 7.5 | 7.875 | 16.5 | 5.5 | 700 | 0.5 | 75 | 5.7 | 42 |
| 1N959B | 1N959B | 7.79 | 8.2 | 8.61 | 15 | 6.5 | 700 | 0.5 | 50 | 6.2 | 38 |
| 1N960B | 1N960B | 8.645 | 9.1 | 9.555 | 14 | 7.5 | 700 | 0.5 | 25 | 6.9 | 35 |
| 1N961B | 1N961B | 9.5 | 10 | 10.5 | 12.5 | 8.5 | 700 | 0.25 | 10 | 7.6 | 32 |

Figura 8 b)

La Figura 9 muestra los datos típicos en una hoja de datos para un diodo Zener.

Zeners
1N746A - 1N759A

Absolute Maximum Ratings* T_A = 25°C unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Value | Units |
|------------------|---|-------------|-------|
| P _D | Power Dissipation | 500 | mW |
| T _{STG} | Storage Temperature Range | -65 to +200 | °C |
| T _J | Operating Junction Temperature | + 175 | °C |
| | Lead Temperature (1/16" from case for 10 seconds) | + 230 | °C |

*These ratings are limiting values above which the serviceability of the diode may be impaired.

NOTES:
1) These ratings are based on a maximum junction temperature of 200 degrees C.
2) These are steady state limits. The factory should be consulted on applications involving pulsed or low duty cycle operations.

Tolerance: A = 5%

DO-35
COLOR BAND DENOTES CATHODE

Electrical Characteristics T_A = 25°C unless otherwise noted

| Device | V _Z (V) | Z _Z (Ω) @ I _Z (mA) | I _{R1} (μA) @ V _R (V) | I _{R2} (μA) @ V _R (V) | T _C (%/°C) | I _{ZRM} * (mA) |
|--------|--------------------|--|---|---|-----------------------|-------------------------|
| 1N746A | 3.3 | 28 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.070 | 110 |
| 1N747A | 3.6 | 24 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.065 | 100 |
| 1N748A | 3.9 | 23 20 | 10 1.0 | 30 1.0 | - 0.060 | 95 |
| 1N749A | 4.3 | 22 20 | 2.0 1.0 | 30 1.0 | +/- 0.055 | 85 |
| 1N750A | 4.7 | 19 20 | 2.0 1.0 | 30 1.0 | +/- 0.030 | 75 |

Potencia máxima

Régimen térmico

Encapsulado

Corriente máxima

Tensión Zener

Impedancia Zener

Corriente inversa

Coefficiente temperatura

Figura 9

Potencia máxima PD: Los diodos Zener se especifican para trabajar a una potencia de disipación máxima denominada PD en la hoja de datos. Por ejemplo, como se muestra en la hoja de datos de la Figura 10 la potencia disipada máxima es de 1 W.

Dado que $PD = Vz I_z$ puede calcularse $I_{zm\acute{a}x} = PD/Vz$.

La potencia máxima se especifica como un valor constante hasta cierto valor de temperatura, $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ para los diodos de la Figura 10. A partir de ese valor la potencia disipada se reduce en un determinado valor, $\theta = 6.67\text{ mW}/^\circ\text{C}$ en este caso. La reducción de la potencia se puede calcular a partir de la expresión:

$$PD = PD_{m\acute{a}x} - \theta[mW/^\circ\text{C}] \Delta T$$

$$PD = PD_{m\acute{a}x} - \theta[mW/^\circ\text{C}] (T - T_{ref})$$

donde T_{ref} es la temperatura máxima para la cual la potencia se mantiene constante y T es la temperatura de trabajo. Para el caso de los datos de la Figura 10 se tendrá:

$$PD = 1\text{ W} - 6.67 \times 10^{-3} [W/^\circ\text{C}] (T - 50\text{ }^\circ\text{C})$$

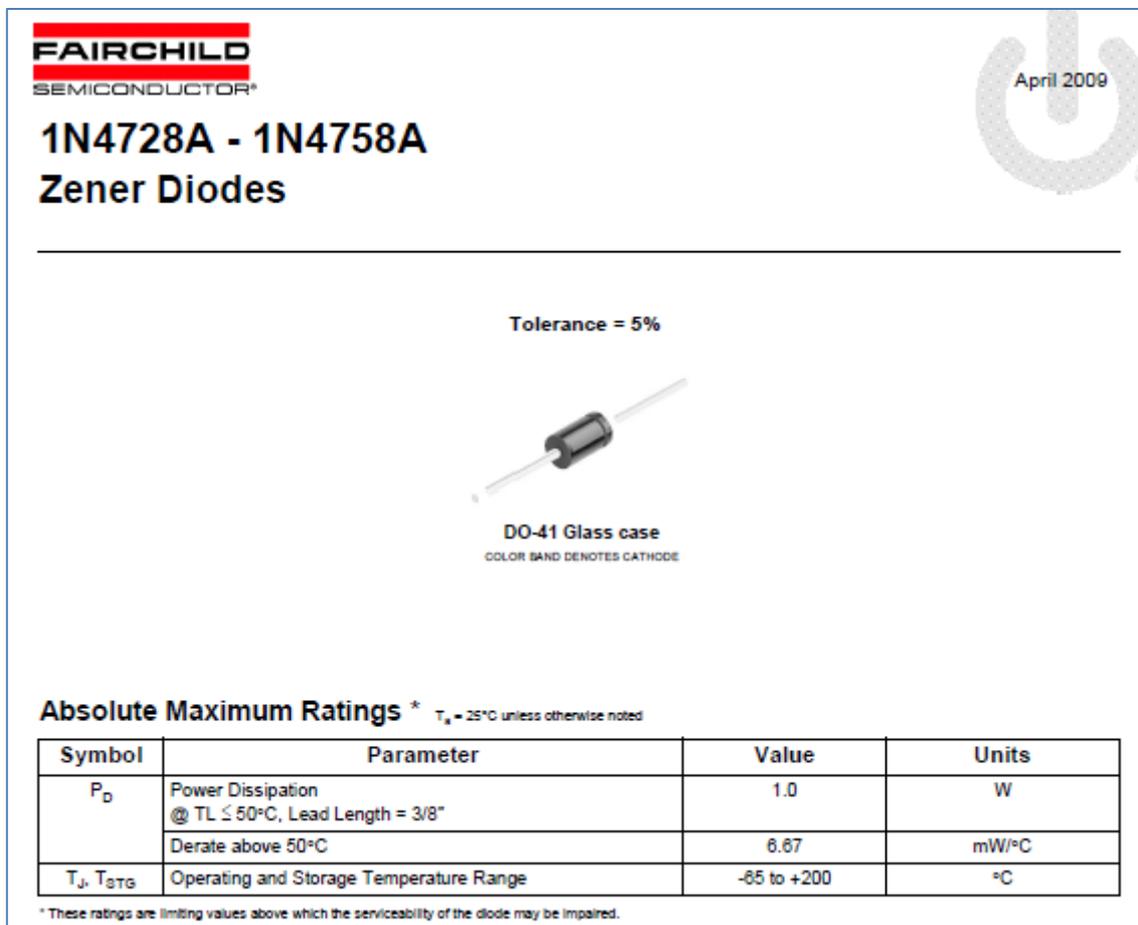


Figura 10

La información anterior se puede representar en forma gráfica obteniendo el gráfico de la Figura 11. Aplicando la ecuación anterior se calcula una temperatura máxima de trabajo de $150\text{ }^\circ\text{C}$.

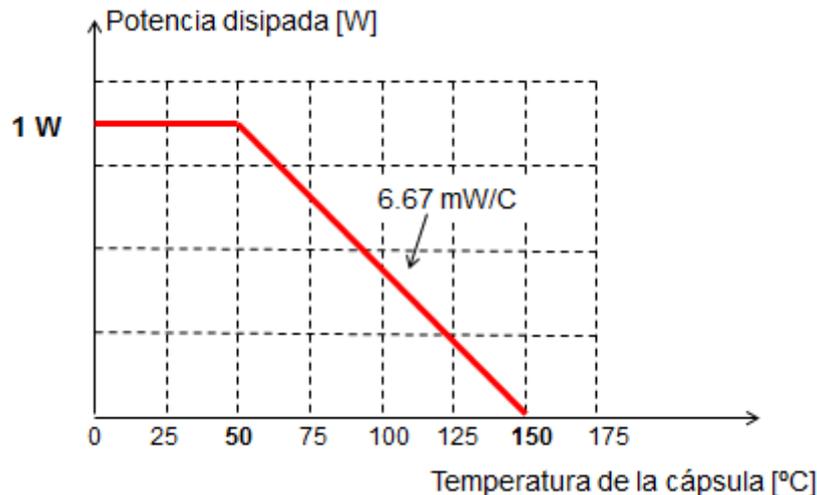


Figura 11

T_J (temperatura de juntura) y **T_{STG}** (temperatura de almacenamiento) indican el rango de temperaturas permitido para operar el dispositivo conectado en un circuito en el primer caso (T_J) y el rango de temperaturas para las cuales puede ser mantenido sin estar conectado a un circuito.

Para los datos mostrados en la Figura 10 corresponde al rango -65 °C a 200 °C.

La **tensión de Zener V_Z** suele darse en las hojas de datos con valores mínimo, típico y máximo, medidos para la corriente denominada I_{ZT} o corriente de prueba. La corriente de prueba I_{ZT} se define por la condición para la cual la potencia disipada es la cuarta parte de la potencia máxima, Figura 12

Electrical Characteristics T_a = 25°C unless otherwise noted

| Device | V _Z (V) @ I _Z (Note 1) | | | Test Current I _Z (mA) | Max. Zener Impedance | | | Leakage Current | | Non-Repetitive Peak Reverse Current I _{ZSM} (mA) (Note 2) |
|---------|--|------|-------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|------------------------|-----------------------|---|
| | Min. | Typ. | Max. | | Z _Z @I _Z (Ω) | Z _{ZK} @ I _{ZK} (Ω) | I _{ZK} (mA) | I _R (μA) | V _R (V) | |
| 1N4728A | 3.135 | 3.3 | 3.465 | 76 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1380 |
| 1N4729A | 3.42 | 3.6 | 3.78 | 69 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1260 |
| 1N4730A | 3.705 | 3.9 | 4.095 | 64 | 9 | 400 | 1 | 50 | 1 | 1190 |
| 1N4731A | 4.085 | 4.3 | 4.515 | 58 | 9 | 400 | 1 | 10 | 1 | 1070 |
| 1N4732A | 4.465 | 4.7 | 4.935 | 53 | 8 | 500 | 1 | 10 | 1 | 970 |

Figura 12

Impedancia máxima del Zener: se especifican dos valores que dependen del punto de operación, Figura 13. La impedancia máxima del Zener **Z_Z** es la impedancia a la corriente de prueba I_{ZT}. La impedancia máxima del Zener **Z_{ZK}** es la impedancia que se mide en el punto de inflexión I_{ZK}.

La **corriente de fuga** o **corriente inversa I_R** es la corriente que circula por el dispositivo cuando está en polarización inversa pero no en la región de ruptura para una cierta tensión de polarización inversa V, Figura 14.

Electrical Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Device | V_Z (V) @ I_Z (Note 1) | | | Test Current I_Z (mA) | Max. Zener Impedance | | | Leakage Current | | Non-Repetitive Peak Reverse Current I_{ZSM} (mA) (Note 2) |
|---------|----------------------------|------|-------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------------|--------------|--|
| | Min. | Typ. | Max. | | $Z_Z @ I_Z$ (Ω) | $Z_{ZK} @ I_{ZK}$ (Ω) | I_{ZK} (mA) | I_R (μA) | V_R (V) | |
| 1N4728A | 3.135 | 3.3 | 3.465 | 76 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1380 |
| 1N4729A | 3.42 | 3.6 | 3.78 | 69 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1260 |
| 1N4730A | 3.705 | 3.9 | 4.095 | 64 | 9 | 400 | 1 | 50 | 1 | 1190 |
| 1N4731A | 4.085 | 4.3 | 4.515 | 58 | 9 | 400 | 1 | 10 | 1 | 1070 |
| 1N4732A | 4.465 | 4.7 | 4.935 | 53 | 8 | 500 | 1 | 10 | 1 | 970 |

Figura 13

Electrical Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Device | V_Z (V) @ I_Z (Note 1) | | | Test Current I_Z (mA) | Max. Zener Impedance | | | Leakage Current | | Non-Repetitive Peak Reverse Current I_{ZSM} (mA) (Note 2) |
|---------|----------------------------|------|-------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------------|--------------|--|
| | Min. | Typ. | Max. | | $Z_Z @ I_Z$ (Ω) | $Z_{ZK} @ I_{ZK}$ (Ω) | I_{ZK} (mA) | I_R (μA) | V_R (V) | |
| 1N4728A | 3.135 | 3.3 | 3.465 | 76 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1380 |
| 1N4729A | 3.42 | 3.6 | 3.78 | 69 | 10 | 400 | 1 | 100 | 1 | 1260 |
| 1N4730A | 3.705 | 3.9 | 4.095 | 64 | 9 | 400 | 1 | 50 | 1 | 1190 |
| 1N4731A | 4.085 | 4.3 | 4.515 | 58 | 9 | 400 | 1 | 10 | 1 | 1070 |
| 1N4732A | 4.465 | 4.7 | 4.935 | 53 | 8 | 500 | 1 | 10 | 1 | 970 |

Figura 14

Regulador con Diodo Zener

El circuito regulador con diodo Zener mostrado en la Figura 15 produce una tensión relativamente constante sobre la carga R_L . Generalmente se utilizan en aplicaciones para bajas corrientes de carga. El circuito tiene un funcionamiento simple. Si el diodo se encuentra polarizado en la región de ruptura mantiene una tensión prácticamente constante entre sus terminales, manteniendo la misma tensión sobre la carga, aunque varíe la tensión aplicada a la entrada. A medida que varía la tensión de entrada, suponiendo una carga constante, varía la corriente I_Z por el diodo. El rango máximo de variación de I_Z estará limitado entre I_{ZK} e I_{ZM} .

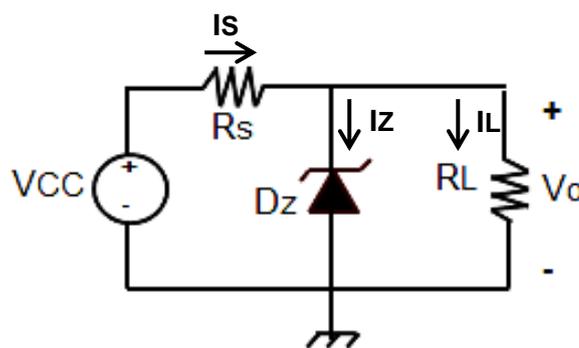


Figura 15

Como ejemplo supongamos que en el circuito anterior se utiliza el diodo 1N4742A para mantener la tensión sobre una carga $R_L = 10 \text{ mA}$ y una resistencia serie $R_S = 470 \Omega$. De la hoja de datos se obtiene $V_Z = 12 \text{ V}$, $P_D = 1 \text{ W}$, $I_{ZK} = 0.25 \text{ mA}$, $Z_Z = 9 \Omega$. Con estos datos obtenemos $I_{ZM} = 1000 \text{ mW} / 12 \text{ V} = 83.33 \text{ mA}$.

En principio si consideramos despreciable la impedancia de Zener Z_z , del análisis del circuito:

$$I_S = I_Z + I_L$$

$$I_{S\text{mín}} = I_{ZK} + I_L = 0.25 \text{ mA} + 10 \text{ mA} = 10.25 \text{ mA}$$

$$I_{S\text{máx}} = I_{ZM} + I_L = 83.33 \text{ mA} + 10 \text{ mA} = 93.33 \text{ mA}$$

$$V_{CC\text{mín}} = I_{S\text{mín}} R_S + V_Z = 16.82 \text{ V}$$

$$V_{CC\text{máx}} = I_{S\text{máx}} R_S + V_Z = 55.52 \text{ V}$$

Este circuito, idealmente, puede regular la tensión de entrada entre 16.82 V y 55.52 V manteniendo una tensión de 12 V sobre la carga. En el caso real la tensión de salida variará algo debido a la presencia de la impedancia Z_z .

En general se pretende mantener la tensión constante sobre la carga aunque esta varíe. En este caso si la carga varía entre una $R_{L\text{mín}}$ y una $R_{L\text{máx}}$ se producirá una variación de la corriente por la carga en el rango $I_{L\text{máx}} - I_{L\text{mín}}$. En estas condiciones el circuito deberá mantener la tensión constante sobre la carga por lo que se limita el rango de variación de la corriente por el diodo Zener. Si la tensión de entrada se mantiene constante, a medida que R_L se reduce desde su máximo valor la corriente por la carga aumenta y dado que la corriente por R_S se mantiene constante, la corriente I_Z por el diodo va disminuyendo. Esta situación impone las condiciones límites de funcionamiento del circuito para carga variable:

$$I_S = I_Z + I_L = \text{constante}$$

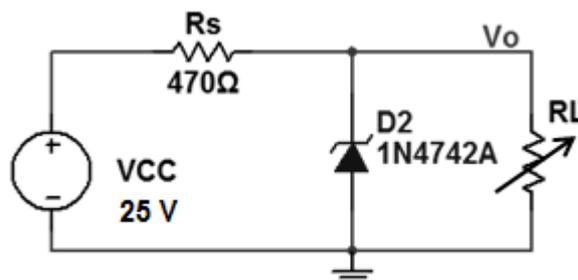
$$I_S = I_{Z\text{mín}} + I_{L\text{máx}} = I_{ZK} + I_{L\text{máx}}$$

$$I_S = I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{mín}} = I_{ZM} + I_{L\text{mín}}$$

Un caso extremo a considerar es el caso que se desconecte la carga. En esas condiciones la corriente por la carga será nula y toda la corriente I_S circulará por el diodo Zener. En esas condiciones la corriente deberá ser como máximo I_{ZM} para no sobrepasar la máxima disipación de potencia por el dispositivo.

Ejemplo:

Suponiendo que R_L puede variar desde $R_{L\text{mín}}$ a infinito calcular el valor de $R_{L\text{mín}}$ manteniendo la tensión sobre la carga.



De la hoja de datos:

$$I_{ZK} = 0.25 \text{ mA}$$

$$I_{ZM} = 83.33 \text{ mA}$$

Cuando $R_L = \infty$, $I_L = 0$ y entonces $I_S = I_Z$. Para mantener el funcionamiento del circuito en esas condiciones $I_Z \leq I_{ZM}$.

$$I_S = \frac{25 - 12 \text{ V}}{0.47 \text{ K}\Omega} = 27.66 \text{ mA} = I_Z$$

Como se cumple que $I_Z < I_{ZM} = 83.33 \text{ mA}$ el diodo Zener puede manejar este valor de corriente sin afectar su funcionamiento.

Para la condición de $R_{L\text{mín}}$ la corriente por la carga será máxima $I_{L\text{máx}}$ y para que el circuito mantenga la regulación la corriente por el diodo Zener tendrá como límite $I_{Z\text{mín}} = I_{ZK} = 0.25 \text{ mA}$. Como I_S se mantiene constante en 27.66 mA :

$$\begin{aligned} I_S &= I_{Z\text{mín}} + I_{L\text{máx}} = I_{ZK} + I_{L\text{máx}} \\ 27.66 \text{ mA} &= 0.25 \text{ mA} + I_{L\text{máx}} \\ I_{L\text{máx}} &= 27.41 \text{ mA} \\ R_{L\text{mín}} &= \frac{V_Z}{I_{L\text{máx}}} = \frac{12 \text{ V}}{27.41 \text{ mA}} = 0.438 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$

Otro caso de interés resulta diseñar el circuito en condiciones tales que varíen la tensión de entrada ($V_{CC\text{mín}} - V_{CC\text{máx}}$) y la corriente por la carga ($I_{L\text{mín}} - I_{L\text{máx}}$). En esas condiciones el diseño corresponderá a encontrar el valor del resistor serie R_S y si se debe trabajar con un Zener ya elegido verificar que se encuentre en la zona de ruptura.

Para garantizar un buen funcionamiento la corriente por el diodo Zener deberá ser mayor o igual a un valor $I_{Z\text{mín}}$ cuando la tensión de entrada sea $V_{CC\text{mín}}$ y la corriente por la carga tome el valor máximo $I_{L\text{máx}}$. En esas condiciones el valor de la resistencia serie R_S puede calcularse como:

$$R_S = \frac{V_{CC\text{mín}} - V_Z}{I_{Z\text{mín}} + I_{L\text{máx}}}$$

En esas condiciones deberá ser $I_{Z\text{mín}} \geq I_{ZK}$.

Por otra parte, cuando la tensión de entrada sea máxima la corriente por el diodo no deberá exceder la máxima corriente determinada por la disipación máxima de potencia. En esas condiciones el caso peor conduce a:

$$R_S = \frac{V_{CC\text{máx}} - V_Z}{I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{mín}}}$$

En esas condiciones deberá ser $I_{Z\text{máx}} \leq I_{ZM}$.

Como R_S es única en el circuito deberá satisfacerse la siguiente condición:

$$R_S = \frac{V_{CC\text{máx}} - V_Z}{I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{mín}}} = \frac{V_{CC\text{mín}} - V_Z}{I_{Z\text{mín}} + I_{L\text{máx}}}$$

$$(V_{CC\text{mín}} - V_Z) (I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{mín}}) = (V_{CC\text{máx}} - V_Z) (I_{Z\text{mín}} + I_{L\text{máx}})$$

El cumplimiento de esta ecuación impone $I_{Z\text{mín}}$ e $I_{Z\text{máx}}$, por lo que debería considerarse alguna otra condición restrictiva de diseño. Una condición aceptable podría ser:

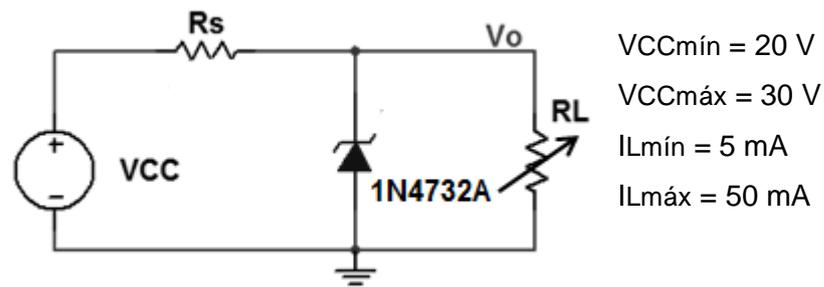
$$I_{Z\text{mín}} = 0.1 I_{Z\text{máx}}$$

En esas condiciones si calculamos $I_{Z\text{máx}}$ resulta:

$$I_{Z\text{máx}} = \frac{(V_{CC\text{máx}} - V_Z) I_{L\text{máx}} - (V_{CC\text{mín}} - V_Z) I_{L\text{mín}}}{V_{CC\text{mín}} - 0.1 V_{CC\text{máx}} - 0.9 V_Z}$$

Ejemplo:

Para el siguiente regulador Zener calcular R_S y la potencia que disipa.



De la hoja de datos del diodo 1N4732A obtenemos los siguientes datos:

$V_Z = 4.7 \text{ V}$, $P_{D\text{máx}} = 1 \text{ W}$, $I_{ZK} = 1 \text{ mA}$, $I_{ZM} = 212.76 \text{ mA}$

Aplicando las condiciones de diseño anteriormente expuestas $I_{Z\text{mín}} = 0.1 I_{Z\text{máx}}$ resulta:

$$I_{Z\text{máx}} \cong 93 \text{ mA} < I_{ZM}$$

$$I_{Z\text{mín}} = 9.3 \text{ mA} > I_{ZK}$$

$$R_S = 258 \Omega$$

Al calcular la potencia en R_S debemos pensar en el peor caso que sería la máxima potencia:

$$P_{R_S} = I_{S\text{máx}}^2 R_S \cong 2.5 \text{ W}$$