

Ejercicios Resueltos de Dispositivos Electrónicos I¹

Examen Final de Junio de 2000 - Ejercicio 2

Enunciado

Obtener analíticamente y dibujar la gráfica de la función $I_e = f(V_e)$ el siguiente circuito.

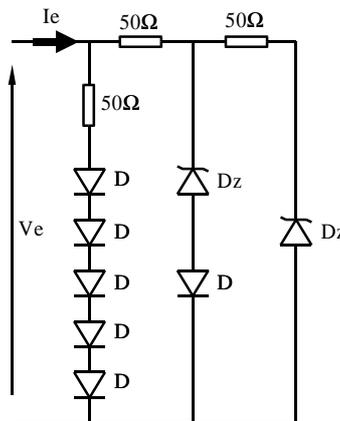


Figura 1: Circuito del Enunciado

Para los diodos tomar los siguientes datos:

D : $V_\gamma = 0,7$ V; $R_f = 0$; $R_r = \infty$

D_Z : $V_\gamma = 0,7$ V; $V_Z = 1,9$ V; $R_f = 0$; $R_r = \infty$; $R_Z = 0$

Solución:

Se pide la función de la corriente de entrada (I_e) en función del valor de la tensión de entrada (V_e). No se especifica el rango en el que varía V_e , por lo tanto es necesario evaluar la función de transferencia entre $-\infty$ y $+\infty$.

Para aclarar la solución del problema vamos a volver a dibujar el circuito indicando las corrientes que circulan por las distintas ramas del mismo, como se muestra en la Figura 2.

Este dibujo permite observar que la corriente de entrada (I_e) se puede dividir en dos corrientes, I_1 e I_2 , y posteriormente esta última en otras dos, I_3 e I_4 . Estas corrientes pueden tener o no ese sentido, dependiendo de si los componentes que hay en la rama lo permiten.

Procedamos a analizar cada una de las ramas suponiendo que los diodos son ideales.

Para que circule la corriente I_1 es necesario que la tensión aplicada (V_e) a la rama formada por la resistencia de 50Ω y los cinco diodos (D_2 a D_6) sea superior a la suma de las tensiones umbrales de estos cinco diodos (3,5 V). No es posible que circule corriente en sentido contrario al indicado, pues no lo permiten las uniones PN de los diodos.

El valor y sentido de la corriente I_2 viene determinado por los valores y sentidos de las corrientes I_3 e I_4 .

Para que circule la corriente I_3 por la rama formada por D_{Z1} y D_1 es necesario que la tensión en el nudo A sea superior a la tensión de Zener de D_{Z1} más la tensión umbral V_γ de D_1 (2,6 V). Tampoco en esta rama es posible que circule corriente en sentido contrario, al no permitirlo la union PN del diodo D_1 .

¹Resuelto por el Prof. Andrés A. Nogueiras Meléndez, aagusto@dt.e.uvigo.es, 2000

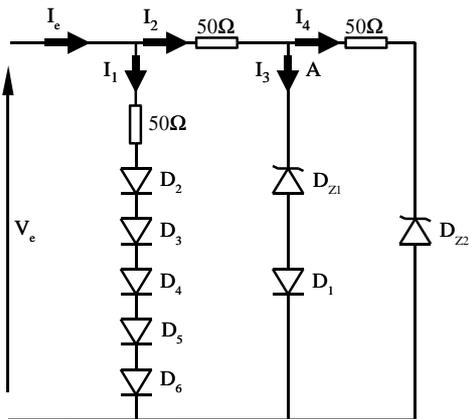


Figura 2: Circuito del enunciado con indicación de corrientes

Para que circule la corriente I_4 es necesario que la tensión en el nudo A sea positiva y superior a la tensión de Zener de D_{Z2} (1,9 V), o negativa y superior en módulo a la tensión V_γ . En esta rama la corriente puede circular en los dos sentidos siempre que el diodo esté trabajando en una de sus zonas de conducción (Zener o directa).

A partir de estos razonamientos procedamos a deducir que ramas conducen y que sentido tendrá la corriente en cada momento.

Si la tensión de entrada V_e es negativa, ni la rama de I_1 ni la rama de I_3 pueden conducir, pero si puede hacerlo la rama de I_4 , ya que el diodo Zener D_{Z2} está polarizado directamente. De los datos del enunciado obtenemos que este diodo se puede considerar ideal con la función de transferencia que se muestra en la Figura 3.

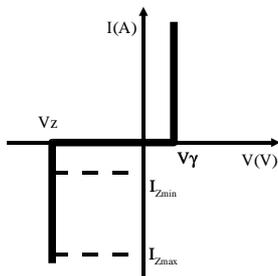


Figura 3: Función de transferencia de los diodos Zeners

Luego el circuito equivalente, bajo estas condiciones, es el de la Figura 4.

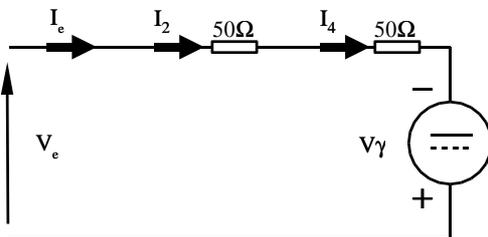


Figura 4: Circuito equivalente

La corriente de entrada I_e es igual, en este caso, a la corriente I_2 , que a su vez es igual a la corriente I_4 . Resolviendo la malla obtenemos:

$$V_e = I_e \cdot 50\Omega + I_e \cdot 50\Omega - V_\gamma \tag{1}$$

y el valor de la corriente es:

$$I_e = \frac{V_e + V_\gamma}{100\Omega} = \frac{V_e + 0,7V}{100\Omega} \quad (2)$$

Falta por determinar hasta que valor de V_e es válida esta ecuación, o lo que es igual, para que valor de V_e deja de conducir el diodo D_{Z2} en directa. Esto ocurrirá cuando el valor de V_e sea mayor que $-V_\gamma$. Por lo tanto la ecuación anterior es válida para

$$V_e \in (-\infty; -0,7) V \quad (3)$$

Nótese que cuando V_e sea $-0,7V$ la corriente I_e es cero. Esta es una de las condiciones para que un diodo, que sigue el modelo de la Figura 4, deje de conducir, es decir, pase de conducción a corte.

Cuando la tensión de entrada sea mayor que $-0,7V$, la rama de I_4 deja de conducir y el circuito equivalente es el de la Figura 5.

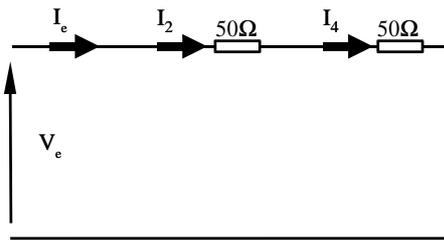


Figura 5: Circuito equivalente

En este caso, la corriente de entrada es igual a cero y la ecuación que se pide es:

$$I_e = 0 \quad (4)$$

Falta por determinar hasta que valor de V_e es válido esta circuito, o lo que es igual, para que valor de V_e comienza a conducir alguna de las ramas. De los párrafos anteriores sabemos que la rama de I_4 comenzará a conducir cuando la tensión aplicada al diodo D_{Z2} sea igual o superior a $V_Z=1,9V$. La rama de I_3 comenzará a su vez a conducir cuando la tensión en el nudo A sea igual o superior a $2,6V$ y la rama de I_1 cuando la tensión de entrada supere los $3,5V$.

Como $I_e = 0$, la tensión aplicada a todas las ramas es la misma (V_e) y la condición de conducción que se cumple primero es la de la rama de I_4 (zener D_{Z2} regula). El valor de la tensión de entrada para que el zener entre en zona de regulación es de $1,9 V$ y el circuito equivalente es el de la Figura 6.

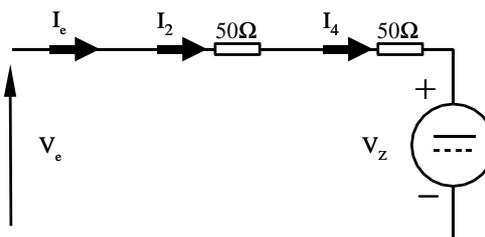


Figura 6: Circuito equivalente

Por lo tanto, el rango de valores de la tensión de entrada para los cuales es válida la ecuación 4 es:

$$V_e \in (-0,7; 1,9) V \quad (5)$$

Una vez que la tensión de entrada (V_e) supera el umbral de los $1,9V$, la corriente de entrada es igual, también en este caso, a la corriente I_2 , que a su vez es igual a la corriente I_4 . Resolviendo la malla obtenemos:

$$V_e = I_e \cdot 50\Omega + I_e \cdot 50\Omega + V_Z \quad (6)$$

y el valor de la corriente es:

$$I_e = \frac{V_e - V_Z}{100\Omega} = \frac{V_e - 1,9V}{100\Omega} \quad (7)$$

Esto se cumple hasta que comiencen a conducir cualesquiera de las otras dos ramas (I_1 o I_3). Para que conduzca la rama de I_1 la tensión $V_e \geq 3,5V$. Para que la rama I_3 conduzca la tensión en el nudo A del circuito debe ser igual o superar los 2,6V. La ecuación que define la tensión en el nudo A es:

$$V_A = V_e - I_e \cdot 50\Omega = I_e \cdot 50\Omega + V_Z \quad (8)$$

Lo que falta hallar es el valor de V_e que hace que V_A sea igual a 2,6V. Operando:

$$V_A = I_e \cdot 50\Omega + V_Z = \frac{V_e - V_Z}{100\Omega} 50\Omega + V_Z = \frac{V_e - 1,9V}{50\Omega} + 1,9V \quad (9)$$

Despejando y resolviendo vemos que $V_e = 3,3V$ para que la rama de I_3 empiece a conducir. Este valor nos dice donde está la frontera entre los dos modos de funcionamiento del circuito. Por lo tanto el rango de valores en el cual es válida la ecuación 7 es:

$$V_e \in (1,9; 3,3) V \quad (10)$$

Cuando V_e sea mayor que 3,3V y menor que 3,5V no es suficiente para hacer conducir la rama de I_1 . Luego el circuito equivalente es el de la Figura 7.

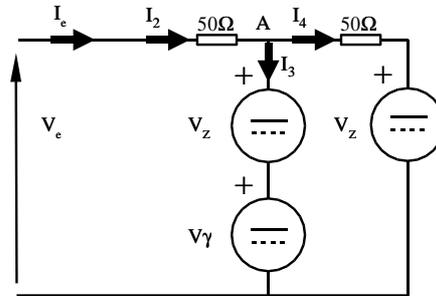


Figura 7: Circuito equivalente

La corriente de entrada es igual, también en este caso, a la corriente I_2 , que ahora es igual a la suma de las corrientes I_3 e I_4 . Podemos obtener el valor de la corriente de entrada resolviendo la malla de la izquierda de la Figura 7:

$$V_e = I_e \cdot 50\Omega + V_Z + V_\gamma = I_e \cdot 50\Omega + 1,9V + 0,7V \quad (11)$$

y el valor de la corriente es:

$$I_e = \frac{V_e - V_Z - V_\gamma}{50\Omega} = \frac{V_e - 2,6V}{50\Omega} \quad (12)$$

como se razonó en un párrafo anterior, la ecuación 12 es válida para:

$$V_e \in (3,3; 3,5) V \quad (13)$$

Por último, cuando la tensión V_e iguale o supere los 3,5V, el circuito equivalente es el de la Figura 8.

La corriente I_e es igual a la suma de las corrientes I_1 e I_2 . Podemos obtener el valor de la corriente de entrada resolviendo las ecuaciones:

$$V_e = I_1 \cdot 50\Omega + 5 \cdot V_\gamma = I_1 \cdot 50\Omega + 3,5V \quad (14)$$

$$V_e = I_2 \cdot 50\Omega + V_Z + V_\gamma = I_2 \cdot 50\Omega + 2,6V \quad (15)$$

y el valor de la corriente de entrada es:

$$I_e = I_1 + I_2 = \frac{V_e - 3,5V}{50\Omega} + \frac{V_e - 2,6V}{50\Omega} = \frac{V_e - 3,05V}{25\Omega} \quad (16)$$

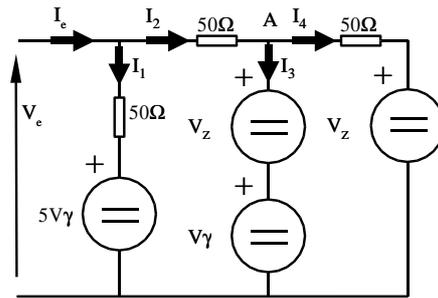


Figura 8: Circuito equivalente

La ecuación es válida para $V_e \geq 3,5V$.

Una vez obtenidos todos los puntos de inflexión de la gráfica vamos a resumirlos en una tabla:

$I_e = f(V_e)$	Rango de V_e , en V	Pendiente
$\frac{V_e + 0,7V}{100\Omega}$	$-\infty; -0,7$	$\frac{1}{100}$
0	$-0,7; 1,9$	0
$\frac{V_e - 1,9V}{100\Omega}$	$1,9; 3,3$	$\frac{1}{100}$
$\frac{V_e - 2,6V}{50\Omega}$	$3,3; 3,5$	$\frac{1}{50}$
$\frac{V_e - 3,05V}{25\Omega}$	$3,5; +\infty$	$\frac{1}{25}$

Cuadro 1: Resumen de funciones y fronteras

Y lo que queda es dibujar la función de transferencia en los ejes, indicando los valores que sean necesarios para acotar el dibujo, como se ve en la Figura 9.

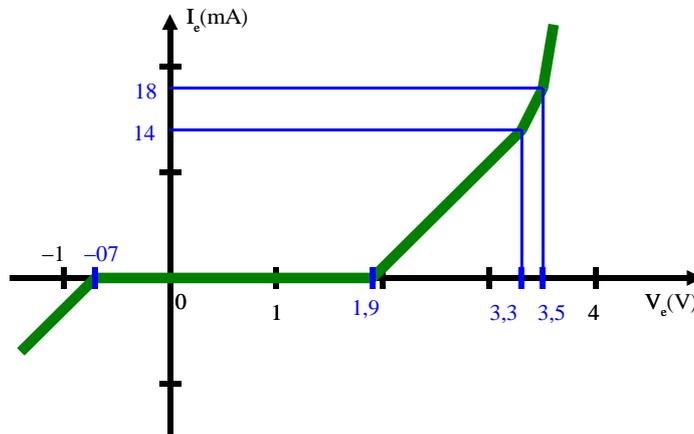


Figura 9: Gráfico de la función de transferencia $I_e = f(V_e)$

Una prueba para comprobar si las ecuaciones son correctas es calcular el valor de la corriente en los puntos de inflexión. En cualquiera de las dos ecuaciones debe ser el mismo.