

Modelo para predecir la respuesta del diodo zener ante señales impulsivas

Julio Guillermo Zola

RESUMEN / ABSTRACT

Los diodos zener, son comúnmente utilizados como referencia de tensión por su confiabilidad y bajo costo. Sin embargo, poseen una amplia aplicación en protección de sistemas sensibles ante señales impulsivas de baja energía, (descargas electrostáticas o sobretensiones). Los modelos de SPICE para el zener resultan muy simples y no predicen correctamente su respuesta a estas señales. En este trabajo se desarrolla un modelo que adecua mejor esta respuesta, agregándose además una condición de funcionamiento límite para cuando el impulso posee una energía suficientemente elevada que deteriora su funcionamiento normal. Los resultados obtenidos por simulación, se verifican mediante medición en laboratorio.

Palabras claves: Zener, Modelización, Protección impulsiva, SPICE

Zener diodes are commonly designed for voltage regulation and their popularity has constantly grown thanks to their excellent reliability and their low cost. However these devices can be used to protect a circuit against weak energy surge impulses (electrostatic discharges and overvoltages). The SPICE formalisms to describe the zener behavior have to be improved using more complex modelling. So we have developed a more accurate SPICE model which is able to correctly predict the behaviour of these devices under surge voltages, including a high energy limit condition where the device response becomes abnormal. Simulations are in acceptable agreement with measurements.

Key words: Modeling, SPICE, Surge protection, Zener diode

Model to Predict Zener Diode Response to Surge Voltages

INTRODUCCION

Los diodos zener, comúnmente llamados "zener", poseen un amplio espectro de aplicaciones en circuitería, que van desde la referencia de tensión o voltaje en circuitos reguladores [1], hasta la protección de circuitos integrados y equipos electrónicos de bajo nivel de potencia ante señales impulsivas, como son las descargas electrostáticas y las sobretensiones (corrientes inducidas por descargas atmosféricas, arranque de motores, micro cortes de la alimentación, etc.) [2, 3, 4]. Los modelos para simulación de los zener, se basan principalmente en obtener su característica I-V en bajas frecuencias y el agregado de sus efectos capacitivos, De esta forma se obtienen modelos que predicen, con elevada exactitud en muchos casos, la respuesta del dispositivo cuando su función es la de referencia de tensión [5, 6, 7, 8]. Sin embargo, ante señales impulsivas, estos modelos dan resultados bastante alejados de los medidos.

La onda impulsiva a aplicar a los zener en los ensayos que se realizaron, se obtuvo de un generador de impulsos de corriente, cuyo esquema circuital básico se muestra en la Figura 1a. Este generador posee las siguientes características de forma de onda de voltaje y corriente de salida típicas [9,10]:

- A circuito abierto, entrega una onda de 300 V máximo, con 0.7 μ s de tiempo de crecimiento y 7 μ s de tiempo de caída para alcanzar la mitad de su valor máximo.
- En cortocircuito, entrega una onda de 100 A máximo, con 3 μ s de tiempo de crecimiento y 2 ms de tiempo de caída para alcanzar la mitad de su valor máximo.

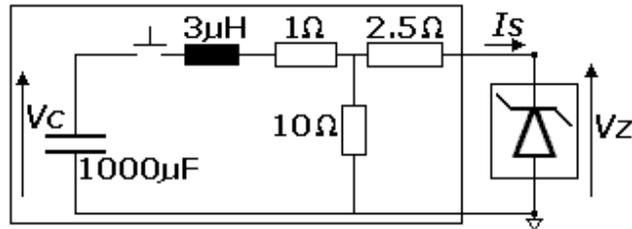


Figura 1a. Generador de impulsos de corriente utilizado para el ensayo,

En la Figura 1b se observa la respuesta de un zener de 6.8 V y 5 W ante la señal impulsiva aplicada, mostrándose tanto la respuesta obtenida por medición como por simulación, utilizando un modelo de SPICE. El tiempo de crecimiento de la onda de corriente impulsiva se destaca en una figura aumentada (zoom).

Cabe aclarar que la caracterización de los zener por su potencia y voltaje de regulación es la forma típica de clasificación de estos dispositivos por parte de los fabricantes. Sin embargo, la caracterización completa en detalle de un zener utilizado como regulador necesita de otros parámetros, tales como por ejemplo, la corriente mínima de regulación, sus capacitancias parásitas, coeficientes térmicos, etc.. Sin embargo, estos dos parámetros básicos (potencia y voltaje de regulación) resultan útiles para poder caracterizar y clasificar inicialmente las muestras de dichos dispositivos y poder iniciar la construcción de un modelo de zener que pueda predecir su comportamiento ante corrientes elevadas de corta duración en el tiempo.

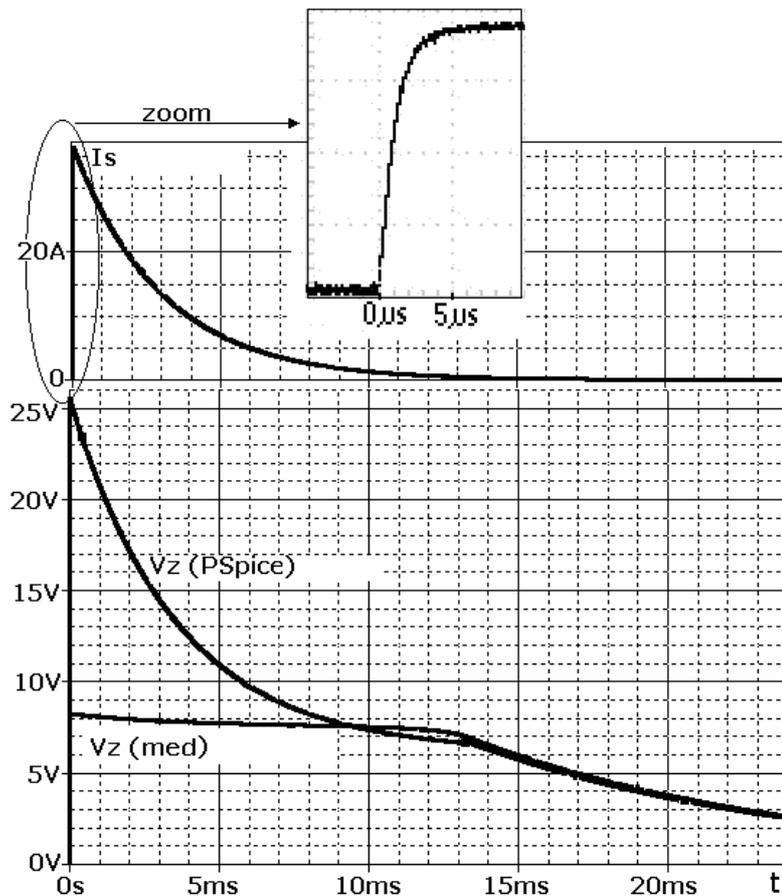


Figura 1b. Respuesta de un zener de 6.8 V y 5 W a un impulso de corriente, I_s .

Volviendo a la Figura 1b, se observa que la respuesta que predice el modelo de SPICE se aparta en casi tres veces del valor medido, coincidiendo cuando ha cesado prácticamente el impulso. Esta diferencia en la respuesta, se debe a que la caída de tensión adicional en la resistencia dinámica del zener, R_z , resulta diferente en el dispositivo real y en el modelo.

Evidentemente, R_z es un parámetro crítico que produce tal disparidad en los resultados cuando el nivel de corriente es elevado, ya que R_z no permanece constante, tal como indican los modelos de SPICE, sino que varía con el nivel de corriente, I_z , aproximadamente como se indica en la Figura 2 y en la expresión (1) [11,12,13].

$$R_z \cong R_{z_T} \frac{I_{z_T}}{I_z} \quad (1)$$

Los parámetros R_{z_T} e I_{z_T} son los valores de R_z e I_z medidos en el punto de test, indicado en la hoja de datos del dispositivo.

Sin embargo, la corrección de la tensión de zener, ΔV_z , que se muestra en (2), obtenida a partir de (1) y descrita en la Ref. [12], resulta válida para la zona de trabajo del zener utilizado como referencia de tensión, pero no cuando se lo utiliza como dispositivo protector ante señales impulsivas.

$$\Delta V_z \cong 2I_z R_{z_T} \frac{I_z - I_{z_T}}{I_z + I_{z_T}} \quad (2)$$

Puede observarse en (2) que, para $I_z \gg I_{z_T}$, $\Delta V_z \cong 2I_z R_{z_T}$, lo cual podría llegar a resultar en un valor mucho mayor a V_z .

Ante un impulso de corriente, se espera que R_z tienda a un valor mínimo como el indicado en la Figura 2. Esta curva experimental [12,13] y característica en distintas hojas de datos de fabricantes, muestra que R_z alcanza un valor mínimo que depende del tipo de encapsulado y otros efectos parásitos del dispositivo.

El análisis de los fenómenos físicos que caracterizan tanto a R_z como a su forma de variación con la corriente está fuera del objetivo de este trabajo, siendo su curva característica de variación con la corriente el dato necesario para la construcción del modelo propuesto para el zener.

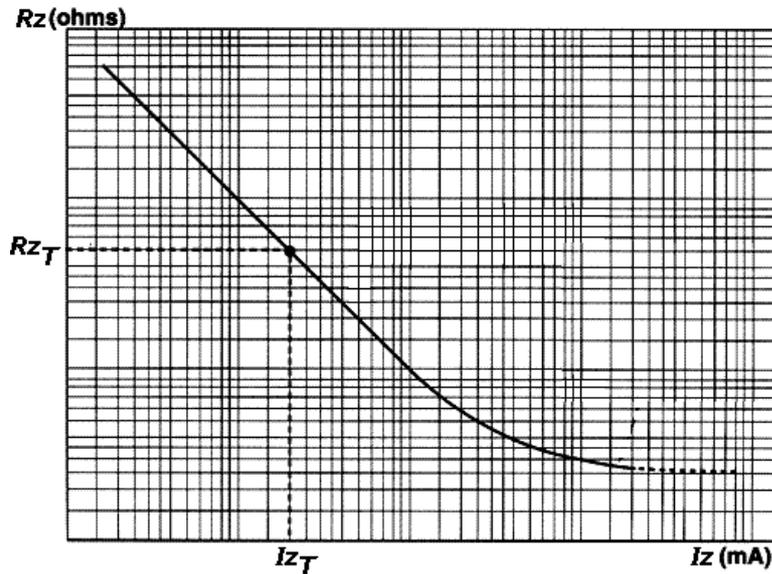


Figura 2. Variación de la resistencia dinámica R_z con I_z .

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO PARA CORRIENTES IMPULSIVAS

Obtención del ΔV_z :

Para obtener una aproximación de la variación de V_z , ΔV_z , ante impulsos de corriente, se partirá de una expresión que describa la curva de la Figura 2, tal como lo hace (2), pero para valores alejados de I_{zT} . De esta forma, una expresión simple como (3), tiene en cuenta la disminución de R_z con I_z , hasta alcanzar un valor mínimo para $I_z \gg I_{zT}$, de kI_zR_{zT} .

El modelo quedaría entonces como el mostrado en la Figura 3. En el modelo, el zener podría contener todos los parámetros de SPICE, salvo R_z , el que quedaría incluido en la fuente ΔV_z , cuya expresión sería la indicada en (3).

$$\Delta V_z \cong I_z R_{zT} \left(\frac{2}{1 + I_z / I_{zT}} + k \right) \quad (3)$$

El valor de k , dependerá de la máxima corriente de impulso que pueda soportar el zener, I_{sm} .

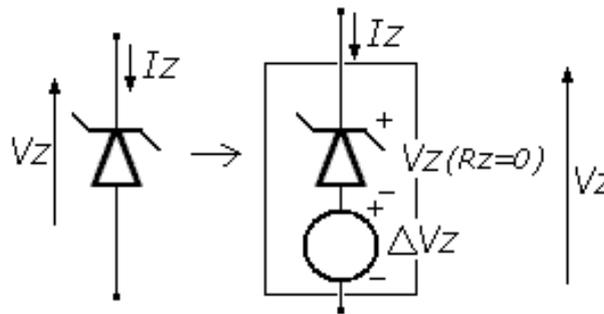


Figura 3. Modelo del zener para señales impulsivas

Si bien I_{sm} debería determinarse por medición para cada señal impulsiva particular, resultaría aceptable como referencia adoptar el valor de corriente impulsiva máxima correspondiente a un impulso de 8.33ms de duración (medio ciclo de 60Hz), ya que es el indicado habitualmente en las hojas de datos. La Figura 4 muestra la comparación entre la respuesta de un zener de 12 V y 5 W con la obtenida por simulación utilizando el modelo propuesto, cuando se le aplica una onda impulsiva como la indicada en la Figura 1, estimando el parámetro k como $k \cong I_{zT} / I_{sm}$.

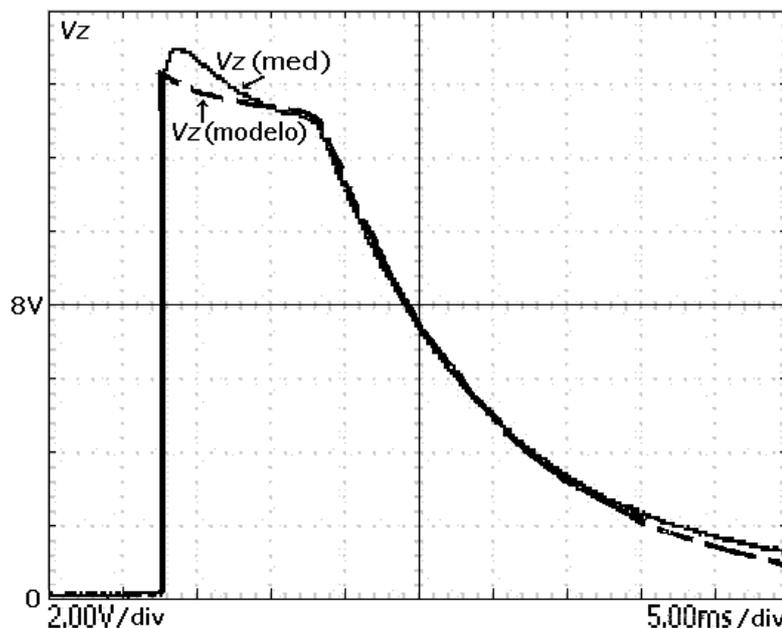


Figura 4. V_z medida y V_z del modelo con $k \cong I_{zT} / I_{sm}$, al aplicar una onda de 30 A máximo como la vista en la Figura 1.

Podrían buscarse otras formas de aproximar k , tal como se muestra en las Figuras 5 y 6, como $k \cong I_{z_M}/I_{s_m}$, donde I_{z_M} correspondería a la máxima corriente de regulación, es decir $I_{z_M} = P_{max}/V_z$, o como $k \cong (I_{z_T} + I_{z_M})/2I_{s_m}$. Sin embargo, cualquiera de estos tres valores de k resulta en una buena aproximación y es aceptable para una gran variedad de zener y distintas señales impulsivas [9,10].

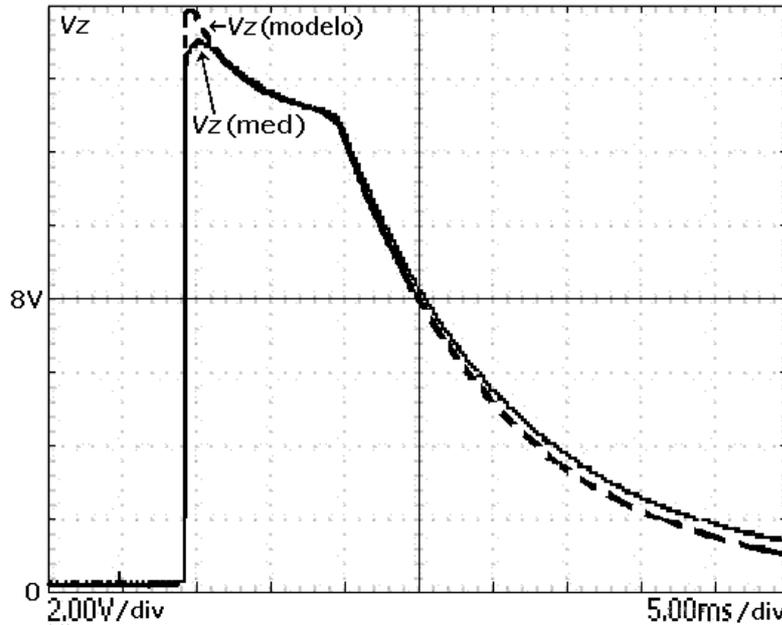


Figura 5. V_z medida y V_z del modelo con $k \cong I_{z_M}/I_{s_m}$, al aplicar una onda de 30 A máximo como la vista en la Figura 1.

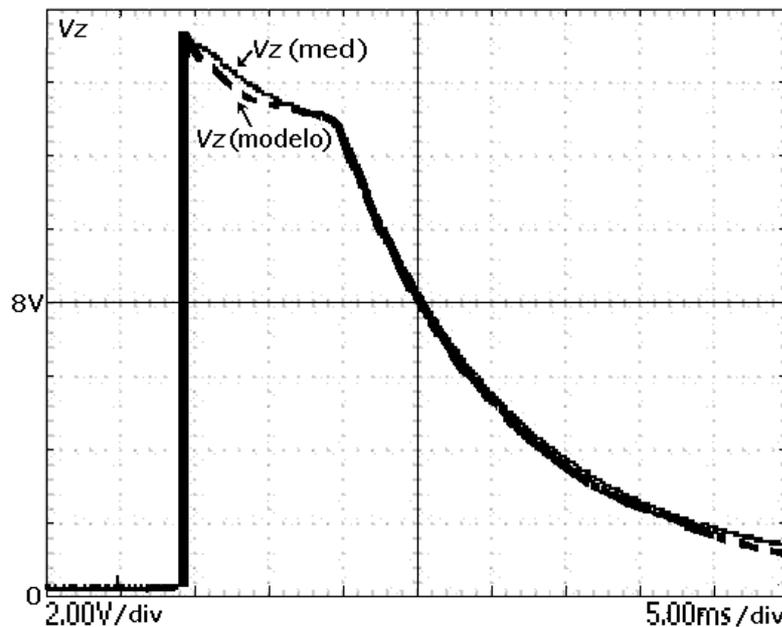


Figura 6. V_z medida y V_z del modelo con $k \cong (I_{z_T} + I_{z_M})/2I_{s_m}$, al aplicar una onda de 30 A máximo como la de la Figura 1.

Respuesta para $I_s > I_{s_m}$:

La Figura 7, muestra la respuestas de un zener de 12 V y 5 W, cuando se aumenta progresivamente la corriente impulsiva desde 30 A hasta 45 A. Puede observarse que V_z resulta apenas creciente con la corriente máxima aplicada, hasta 40 A aproximadamente, hecho que pone en evidencia la disminución de R_z , la cual para corrientes tan elevadas ya no influye prácticamente en el aumento de V_z .

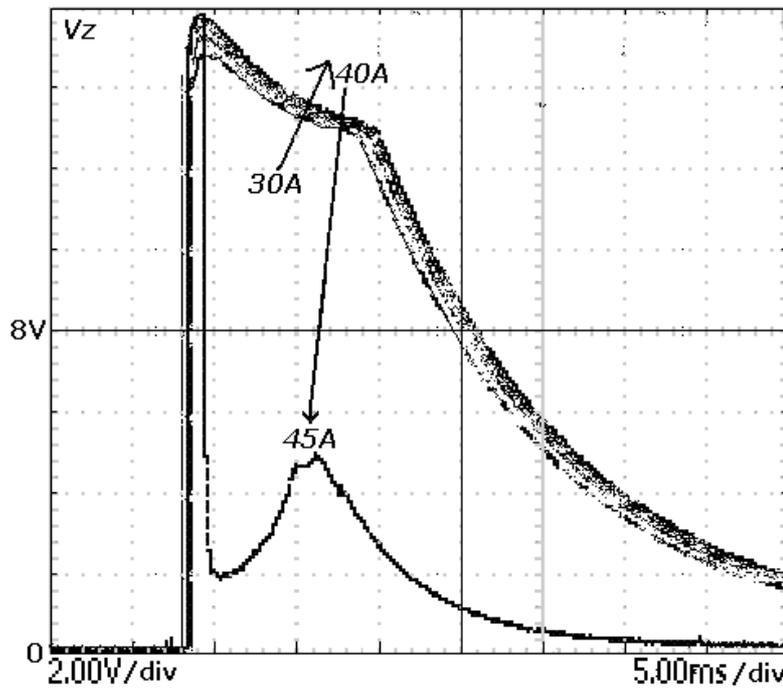


Figura 7. Respuesta de un zener de 12 V y 5 W al aplicarle distintas señales impulsivas de 30 A a 45 A.

El dispositivo se destruye para valores superiores de corriente, cayendo la tensión a 2 V (punto de retroceso) y siguiendo luego a la señal de excitación, una vez apagado [14, 15]. El efecto de ruptura resulta destructivo, tal como se observa en la Figura 8, donde se vuelve a aplicar sobre el mismo dispositivo una corriente impulsiva de 30 A máximo, obteniéndose una respuesta similar al caso de la corriente que lo destruyó previamente.

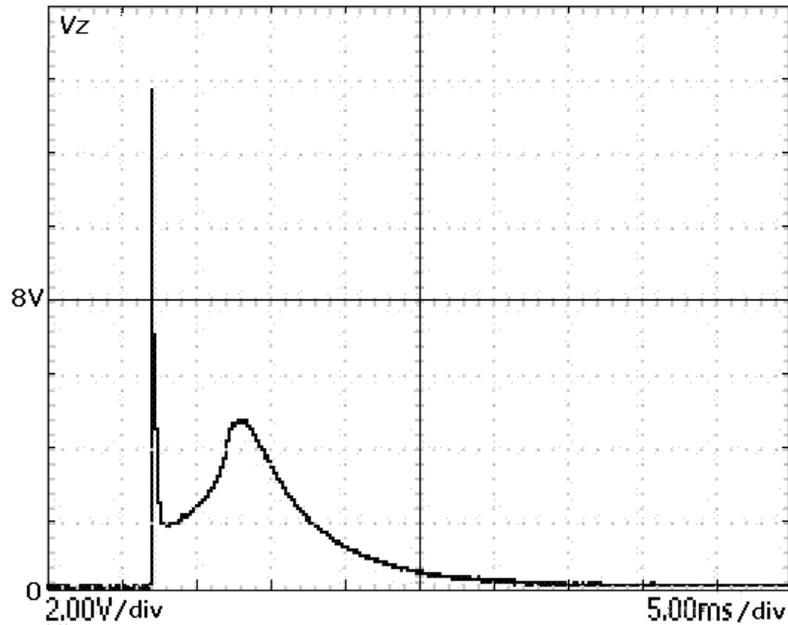


Figura 8. Respuesta de un zener de 12 V y 5 W al aplicarle una señal impulsiva de 30 A, una vez superado su valor de corriente máxima.

La finalidad de agregar al modelo la condición de corriente máxima, apunta a que se muestre bajo qué condición de corriente máxima el zener se destruye (punto de retroceso), y no la forma exacta de su respuesta posterior a ese instante.

Para agregar al modelo propuesto la condición de corriente impulsiva máxima, se puede pensar como el efecto de un dispositivo de disparo que se activa a partir de una dada corriente por el zener, tal como se muestra en la Figura 9 [16].

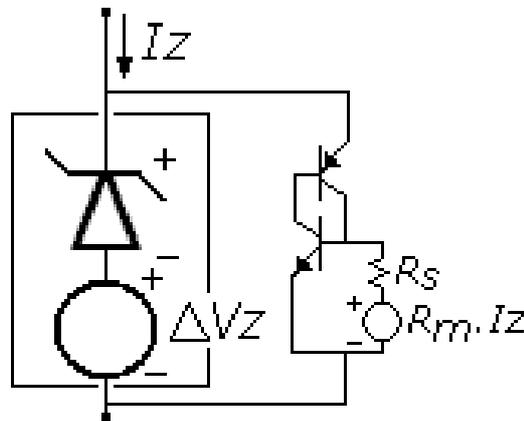


Figura 9. Modelo del zener para señales impulsivas con limitación por condición de corriente máxima.

La fuente de tensión controlada $R_m I_z$, activa el dispositivo de disparo cuando $I_z = I_{s_m}$. Una vez disparado, el circuito se mantiene activado ya que la disminución en la tensión $R_m I_z$, cuando I_z comienza a disminuir, será compensada por la caída sobre R_s , manteniendo al transistor NPN activo hasta un valor de corriente mínima en el que el dispositivo vuelve a su condición de circuito abierto, aún cuando su comportamiento como zener se haya modificado debido a un daño parcial en su estructura.

La Figura 10 muestra la comparación de la respuesta del zener con el modelo propuesto.

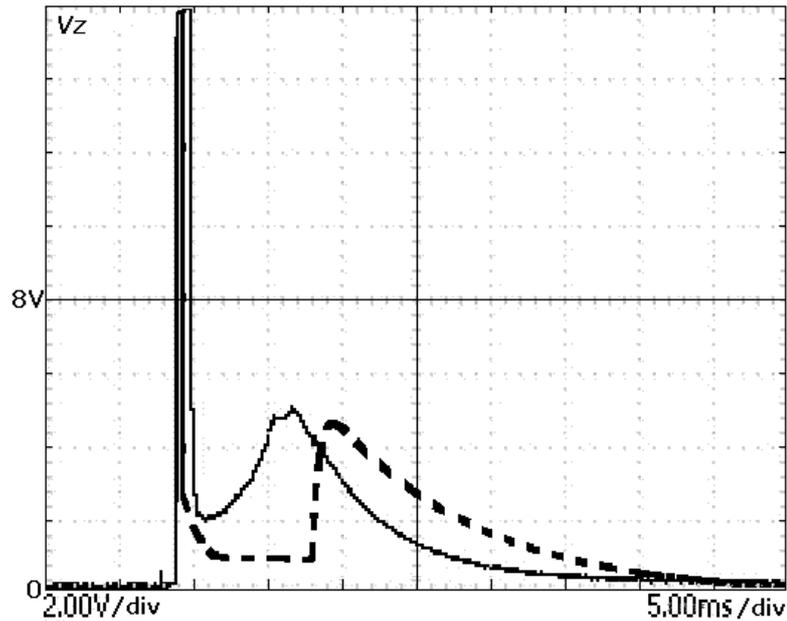


Figura 10. Respuesta de un zener de 12 V y 5 W (línea continua) y del modelo (línea de trazos) al aplicarle una señal impulsiva de 45 A.

En la Figura 11 se muestra otro caso donde se le aplicó previamente al zener una corriente máxima de 100 A. Puede observarse que las respuesta medida, aún con la diferencia de escala respecto a la Figura 10, no parece responder a la misma forma. Esto resulta lógico ya que el grado de deterioro de cada dispositivo puede llegar a ser diferente, dependiendo además de la corriente máxima que provoca su destrucción. Sin embargo, el punto de retroceso, coincidente con el que predice el modelo, es prácticamente el mismo para ambas muestras.

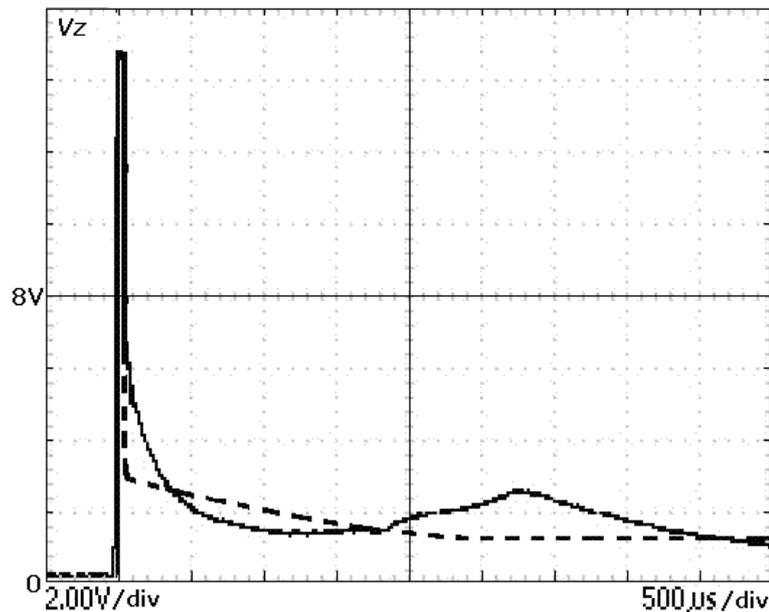


Figura 11. Respuesta de un zener de 12 V y 5 W (línea continua) habiéndole aplicado una señal impulsiva previa de 100 A máximo y respuesta del modelo (línea de trazos), al aplicarle luego una señal impulsiva de 30 A.

AJUSTE DE VALORES EN EL MODELO

Para mostrar los valores de los parámetros a configurar en el modelo, se tomarán los valores indicados en la hoja de datos del zener 1N5349 [17]. Los datos a tener en cuenta son los indicados en la Tabla I. La Tabla II muestra el cálculo de los parámetros del modelo en base a los datos de la Tabla I.

TABLA I
1N5349: HOJA DE DATOS

Parámetros	Valores
V_Z	12 V
I_{ZT}	100 mA
R_Z	2.5 Ω
I_{ZM}	395 mA
I_{Sm} (8.33ms)	7.5A
Capacitancia ($V_D \rightarrow 0$)	1 nF

TABLA II
1N5349: PARAMETROS DEL MODELO

Parámetros	Valores
BV	$V_Z - I_{ZT}R_{ZT} \cong 11.75$ V
CJO	1 nF
k	$k \cong (I_{ZT} + I_{ZM}) / 2I_{Sm} \cong 0.03$
I_{Sm} (2 ms)	I_{Sm} (8.33ms).8.33 / 2 $\cong 31$ A
Rm	$V_{BE} / 31A \cong 0.02$
Rs	1 Ω
TF _{PNP}	1 us

El valor de R_s está estimado sin mayor exactitud y sólo para lograr que el circuito PNP-NPN mantenga su estado de disparo hasta que la corriente disminuya a un valor muy por debajo de su máximo. Para ello, su valor debe encontrarse alrededor de 1 Ω . El valor de TF_{PNP} (tiempo de tránsito en la base del transistor PNP), entre 1us y 5us, resulta necesario para asegurar la convergencia de la simulación, agregando un retardo al disparo que se asemeja a la respuesta mostrada en el osciloscopio.

EJEMPLOS

Con el fin de verificar el modelo propuesto, se ensayó un zener 1N5341 de 6.2 V. Para ello, se obtuvieron los parámetros del modelo, como se muestran en la Tabla III.

TABLA III
1N5341: PARAMETROS DEL MODELO

Parámetros	Valores
BV	$V_Z - I_{ZT}R_{ZT} \cong 6$ V
CJO	2 nF
k	$k \cong (I_{ZT} + I_{ZM}) / 2I_{Sm} \cong 0.04$
I_{Sm} (2 ms)	I_{Sm} (8.33ms).8.33 / 2 $\cong 52$ A
Rm	$V_{BE} / 52A \cong 0.013$
Rs	1 Ω
TF _{PNP}	1 us

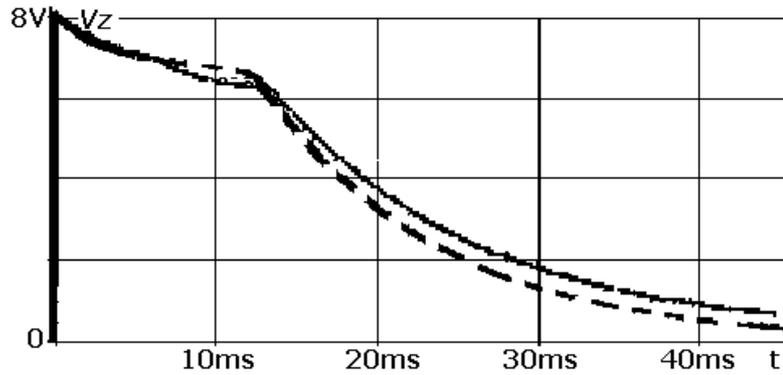


Figura 12a. Respuesta de un zener de 6.2 V y 5 W (línea continua) y del modelo (línea de trazos) al aplicarle una señal impulsiva de 35 A.

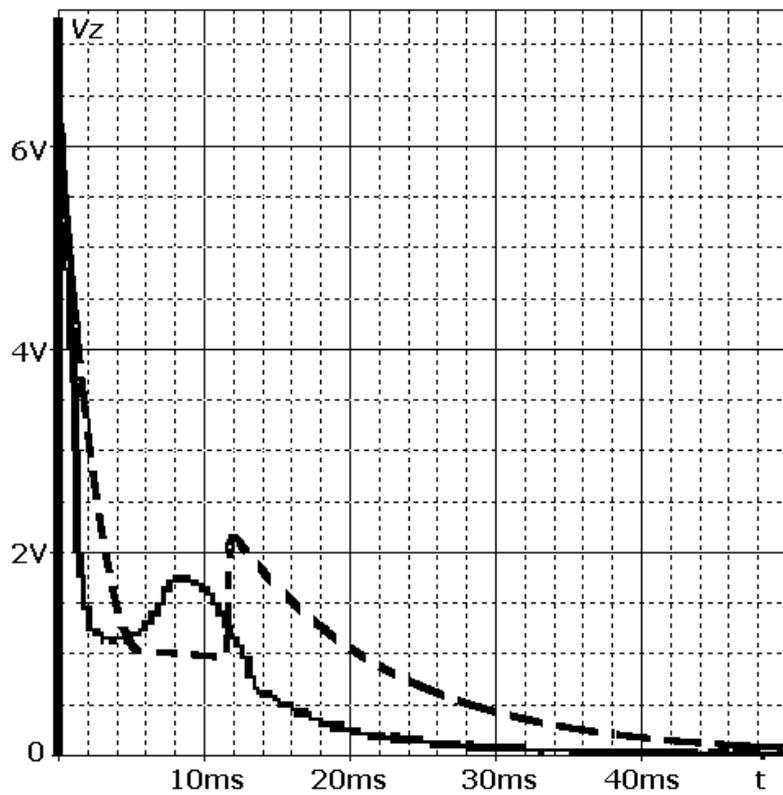


Figura 12b. Respuesta de un zener de 3.3 V y 1 W (línea continua) y del modelo (línea de trazos) al aplicarle una señal impulsiva de 30 A.

En la Figura 12a, pueden verse la V_z para una corriente impulsiva de 35 A. medida (línea continua) y la respuesta obtenida mediante el modelo propuesto (línea de trazos). El dispositivo se destruyó con una corriente de 50 A, valor que se acerca al máximo de 52 A estimado en el modelo.

En la Figura 12b se muestra la respuesta real y del modelo para una corriente impulsiva de 30 A aplicada sobre un zener de 3.3V y 1W (1N4728). En este ejemplo se observa la ocurrencia de la falla permanente del dispositivo, dado que $I_{sm} \cong 5A$.

CONCLUSIONES

El comportamiento del modelo propuesto del zener para evaluar su respuesta ante impulsos de corriente, resulta cercano a la respuesta real. Esto se debe principalmente, a tener en cuenta la fuerte variación de su resistencia dinámica interna con el nivel de corriente, no evaluada en los modelos de SPICE. La expresión simple propuesta para la variación de R_z , resulta suficiente aproximación y puede obtenerse rápidamente con valores extraídos de las hojas de datos.

Asimismo, el agregado de un circuito que indica el límite de corriente máxima previo a la destrucción del dispositivo, resulta una herramienta que puede ser de utilidad para estudiar el grado de protección máxima que el zener proporciona a un equipamiento dado, sin buscar la forma de respuesta exacta, ya que sólo el impulso máximo es de interés para el análisis de los sistemas de protección.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Ing. Oscar Ferro del Laboratorio de Circuitos Electrónicos - Facultad de Ingeniería de la UBA - por su contribución en la revisión y sugerencias de corrección de este trabajo.

REFERENCIAS

1. **LEE, MITCHELL:** "Understanding and Applying Voltage References", Linear Technology, Application Note 82, November 1999.
2. **MAXIM-IC.COM:** Overvoltage Protection (OVP) for Sensitive Amplifier Applications, Application Note 4035, Maxim Integrated Products, Apr 18, 2007.
3. **LEE, BENNY:** "An Overview of ESD Protection Devices", Compliance Engineering, www.ce-mag.com, 2001.
4. **WOLLEMI TECHNICAL INCORPORATION:** "Knowing the Surge Protection Device", Application Note, www.wollemi.com, 2010.
5. **MITCHESON, PAUL D.:** "SPICE Diode and BJT models", Semiconductor Modelling in SPICE, Department of Electrical and Electronic Engineering Imperial College London, 2011.
6. **SANDLER, STEVEN M.:** "Spice subcircuit accurately models zener characteristics", EXPERT COLUMN EDA, PERSONAL ENGINEERING, November 1998.
7. **HSPICE®:** "Elements and Device Models Manual", Version X-2005.09, September 2005.
8. **LEPKOWSKI, JIM:** "Zener Macro-Models Provide Accurate SPICE Simulations" ONSemiconductor, January,2006--Rev.
9. **ZOLA, JULIO G.:** "Correlación entre ondas de ensayo para dispositivos supresores de sobretensiones", Revista Ingeniería y Ciencia, Universidad EAFIT, Colombia Volumen 4, Número 7, Junio 2008, Páginas:113 – 128.
10. **IEC 61000-4-5:** "Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques – Surge immunity test", 2d Ed. 2005-11.
11. **WONG, S. WONG AND HU, C. M.:** "SPICE macro model for the simulation of Zener diode I-V characteristics", IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 7, 1991.
12. **WALTERS, KENT:** "Zener voltage regulation with current changes", Micronote series 202, Microsemi Corporation 1996.
13. **RENESAS.COM:** "Zener diodes", Renesas Electronics document REJ27G0012-0300/Rev.3.00, August 2008.
14. **ZOLA, JULIO G.:** "Simple model of metal oxide varistor for Pspice Simulation", IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Volume 23, Issue 10, Oct. 2004 Page(s):1491 – 1494.
15. **ZOLA, JULIO G.:** "Gas Discharge Tube Modeling with Pspice", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50 No 4 November 2008, Page(s):1022 – 1025.
16. **LITTELFUSE:** "Transient Suppression Devices and Principles", Application Note AN9768, January 1998.
17. **MICROSEMI:** "Silicon 5 Watt Zener Diodes", Microsemi SCOTTSDALE DIVISION, 2003.

AUTOR

Julio Guillermo Zola: Ingeniero Electrónico de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, graduado en 1990. Profesor de la asignatura Circuitos Electrónicos I de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UBA y Director del Laboratorio de Circuitos Electrónicos – LACE- de la FIUBA. Miembro activo del Subcomité de Equipamiento de Protección contra Rayos, del Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM.

e-mail: jzola@fi.uba.ar