

Los varistores de óxido metálico

El varistor de óxido metálico (MOV) en los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS): principios de funcionamiento, parámetros críticos para una correcta selección y mecanismos microestructurales de degradación que pueden desencadenar una falla térmica.

Ing. Sergio Roberto Santos
Lambda Consultoría y Embrastec
sertantos1963@gmail.com

Ing. Cleiton Busse
Responsable técnico en Embrastec

José Márcio Rosa
Fundador y CEO de Embrastec

Glosario de siglas

- » DPS: dispositivo de protección contra sobretensiones
- » MOV: *Metal Oxide Varistors*, 'varistores de óxido metálico'

URL estable: <https://www.editores.com.ar/node/8619>

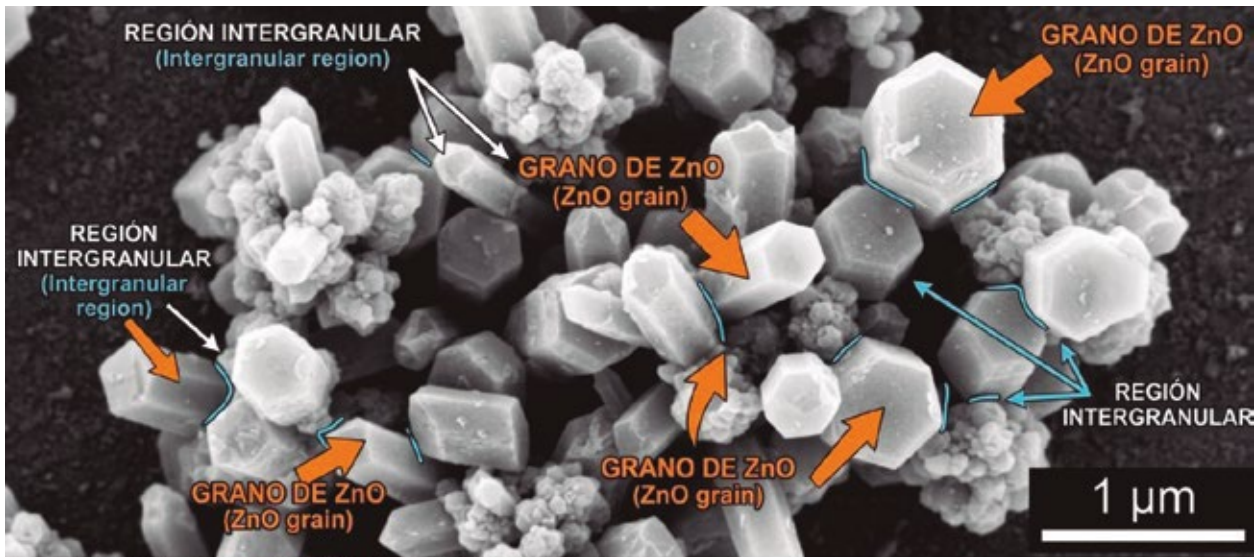
El varistor de óxido metálico (MOV) es el componente no lineal más empleado en la fabricación de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (DPS). Se trata de una resistencia cuyo valor cambia según la tensión presente en sus terminales (varistor: resistencia dependiente de la tensión), disminuyendo drásticamente cuando esa tensión supera un límite predefinido y desviando así la energía de la sobretensión para proteger un circuito eléctrico [1].

Por esta razón, comprender las características del MOV es esencial para especificar correctamente los DPS, además de facilitar la selección del dispositivo más adecuado. Estas características determinan la eficacia, fiabilidad y durabilidad de los DPS que los incorporan; asimismo, se relacionan directamente tanto con su desempeño durante la actuación como con su comportamiento al final de la vida útil.

Funcionamiento del MOV

El MOV está formado por un disco sinterizado de granos de óxido de zinc (ZnO), dopado con pequeñas cantidades de otros óxidos metálicos, como bismuto, cobalto y manganeso, para obtener las propiedades eléctricas deseadas. Las fronteras entre estos granos de ZnO, denominadas "límites de grano", forman uniones semiconductoras bidireccionales que proporcionan al MOV una resistencia eléctrica altamente no lineal. Mientras el grano de ZnO es extremadamente conductor, la región intergranular funciona como una barrera de potencial aislante debido al dopaje con otros óxidos. Así se crea una propiedad eléctrica no lineal: bajo tensiones normales, la región intergranular bloquea la corriente; cuando se producen picos de tensión, la barrera colapsa instantáneamente y permite que la corriente fluya a través del material para proteger el circuito (figura 1) [2].

Por tanto, bajo la tensión normal de funcionamiento de la red, el MOV conduce solamente una corriente de fuga del orden de los microamperios. No obstante, cuando una sobretensión ele-



ESTRUCTURA DE ÓXIDO DE ZINC (ZnO)

- **Granos Cristalinos (Hexagonales/Prismáticos):** Conductores de Óxido de Zinc.
- **Región Intergranular:** Interfaces y Contornos de Grano que forman barreras de potencial eléctrico en varistores.

Figura 1. Estructura de óxido de zinc: los granos cristalinos (hexagonales/prismáticos) son conductores de óxido de zinc; la región intergranular son interfaces y contornos de grano que forman barreras de potencial eléctrico en varistores.

va la tensión en los terminales del varistor hasta el valor de su región de limitación, su resistencia interna descende de megaohmios a unos pocos ohmios en una escala de nanosegundos, permitiendo que el dispositivo desvíe la energía de la sobretensión y absorba una parte de ella. Cuando cesa el transitorio, el MOV retorna instantá-

neamente al estado de alta impedancia y vuelve a conducir solamente una corriente de fuga de microamperios. Como este proceso ocurre sin conmutación mecánica, el MOV resulta muy eficaz para limitar la magnitud de las sobretensiones transitorias (figura 2) [3].

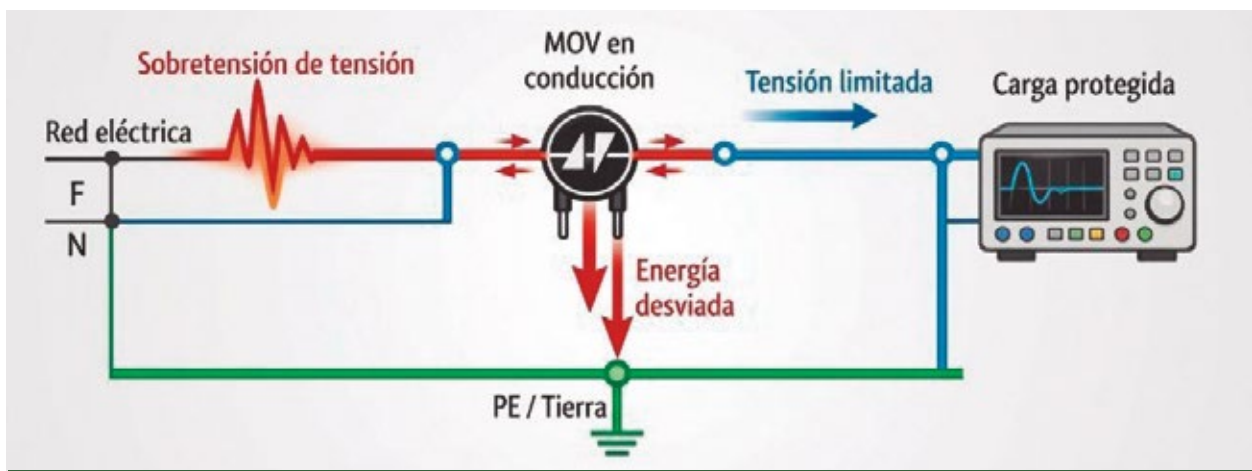


Figura 2. Actuación del MOV

Principales parámetros de un MOV

Aunque la hoja de datos de un MOV incluye diversos parámetros, vale destacar los que se consideran fundamentales para su actuación como componente no lineal de un DPS [3] [4].

Tensión del varistor (V_{1mA})

La tensión del varistor, normalmente identificada como " V_{1mA} ", es la tensión medida en los terminales del componente cuando circula una corriente continua de referencia de 1 mA. Este valor se emplea como punto de referencia para caracterizar el inicio de la conducción significativa del varistor, aunque este no funciona como un interruptor brusco de encendido y apagado. Debido a su comportamiento no lineal, el varistor comienza a conducir gradualmente y la corriente aumenta con rapidez cuando la tensión supera esta región (figura 3).

En la práctica, V_{1mA} permite comparar modelos y comprobar si el componente es compatible con la tensión nominal del circuito. Debe selec-

cionarse de manera que el varistor no conduzca de forma relevante durante el funcionamiento normal, pero entre en conducción ante sobretensiones peligrosas. Si V_{1mA} es demasiado bajo, el componente puede calentarse y degradarse; si es demasiado alto, la protección puede actuar demasiado tarde.

Tensión máxima de funcionamiento continuo (U_c)

La tensión máxima de funcionamiento continuo, indicada como " U_c " o "MCOV", es la mayor tensión eficaz en corriente alterna o la máxima tensión en corriente continua que puede aplicarse permanentemente al varistor sin causar conducción excesiva, calentamiento progresivo o envejecimiento acelerado. Es uno de los parámetros más relevantes en la selección, pues determina si el componente soportará la tensión normal del sistema durante toda su vida útil.

En aplicaciones conectadas a la red eléctrica, U_c debe superar la tensión máxima que pueda presentarse en régimen permanente, considerando

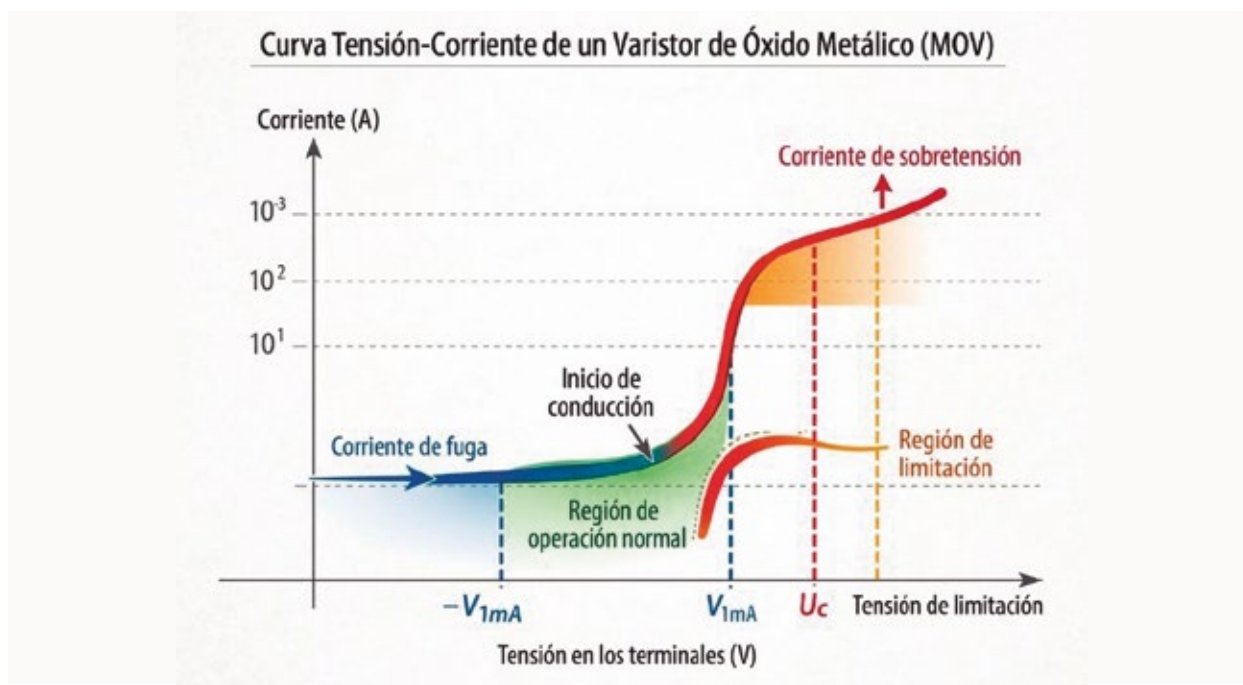


Figura 3. Curva característica del MOV

las tolerancias de la red, las variaciones de fabricación y las posibles sobretensiones sostenidas. Un varistor con U_c inferior al necesario puede permanecer parcialmente en conducción, disipar potencia de manera continua y fallar por calentamiento. En cambio, un U_c demasiado alto aumenta la tensión que se deja pasar al circuito durante las sobretensiones y disminuye la eficacia de la protección.

Un U_c demasiado alto aumenta la tensión que se deja pasar al circuito durante las sobretensiones y disminuye la eficacia de la protección

Capacidad de absorción de energía (E)

La capacidad de absorción de energía expresa cuánta energía de una sobretensión puede absorber el varistor de forma segura, y normalmente se especifica en joules. Durante un evento transitorio, la energía eléctrica se transforma en calor dentro del material del varistor. Cuantos mayores sean la energía del pulso y su duración, mayor será el esfuerzo térmico aplicado al componente.

Este parámetro debe analizarse junto con la forma de onda de ensayo indicada en el catálogo del varistor, pues la energía soportada depende del perfil de la sobretensión. Un varistor puede resistir bien pulsos rápidos y aislados, pero degradarse si se somete a sobretensiones repetitivas o prolongadas. En proyectos críticos, conviene prever un margen de seguridad y asociar el varistor con fusibles, interruptores automáticos u otros elementos de protección para evitar fallos peligrosos en caso de sobrecarga.

Un varistor puede resistir bien pulsos rápidos y aislados, pero degradarse si se somete a sobretensiones repetitivas o prolongadas

Tensión de limitación (V_c)

La tensión de limitación, también llamada “tensión de sujeción” o “clamping”, es la tensión máxima aproximada que aparece en los terminales del varistor durante la conducción de una corriente de sobretensión especificada. Representa el nivel de tensión que el circuito protegido todavía podrá recibir durante el evento transitorio. Por ello, no basta con seleccionar un varistor que soporte la sobretensión; también es necesario confirmar que la tensión de limitación quede por debajo del nivel admisible para los componentes del circuito.

Existe un compromiso importante: los varistores con una tensión de limitación más baja suelen proteger mejor los componentes sensibles, pero pueden conducir más corriente y disipar más energía durante las sobretensiones. Una tensión de limitación demasiado alta reduce el esfuerzo sobre el varistor, aunque permite que una sobretensión mayor llegue a la carga. La selección adecuada equilibra la capacidad del varistor con la soportabilidad eléctrica del equipo protegido.

Una tensión de limitación demasiado alta reduce el esfuerzo sobre el varistor, aunque permite que una sobretensión mayor llegue a la carga

Corriente de fuga (IL)

La corriente de fuga es la pequeña corriente que circula por el varistor cuando está sometido a la tensión normal de funcionamiento del circuito, por debajo de la región de conducción intensa. En condiciones ideales, esta corriente debe mantenerse baja, ya que valores elevados indican una mayor disipación de potencia y calentamiento, con posible envejecimiento del componente.

El incremento de la corriente de fuga con el tiempo puede indicar degradación causada por sobretensiones repetidas, temperatura elevada o una elección inadecuada de U_c . Por ello, en equi-

pos que requieren alta fiabilidad, este parámetro debe considerarse no solamente en el diseño inicial, sino también en el análisis de vida útil y en el mantenimiento preventivo del DPS que emplea el varistor.

Corriente de sobretensión ($I_{m\acute{a}x}$)

La corriente de sobretensión es la máxima corriente transitoria que el varistor puede conducir durante un pulso de sobretensión sin fallar de inmediato. Suele especificarse para formas de onda normalizadas, como 8/20 μs , y puede aparecer como corriente máxima de pico, corriente nominal de descarga o capacidad de múltiples pulsos, según el tipo de componente y la norma aplicable.

En aplicaciones expuestas a descargas atmosféricas indirectas, conmutación de cargas inductivas, motores, contactores o redes largas, la corriente de sobretensión debe seleccionarse con suficiente holgura. Un varistor subdimensionado puede soportar los primeros eventos, pero perder gradualmente su capacidad de protección. En sistemas más severos, la protección puede exigir varistores de mayor diámetro, una asociación de componentes o el uso de DPS.

El rendimiento inicial del MOV y su estabilidad durante la vida útil dependen tanto de la tensión de funcionamiento continuo como de la severidad y frecuencia de las sobretensiones aplicadas

Estos parámetros deben evaluarse en conjunto, pues el rendimiento inicial del MOV y su estabilidad durante la vida útil dependen tanto de la tensión de funcionamiento continuo como de la severidad y frecuencia de las sobretensiones aplicadas.

Conviene destacar que la calidad de un DPS que utiliza un varistor no depende exclusivamente de las características de este componente, ya que

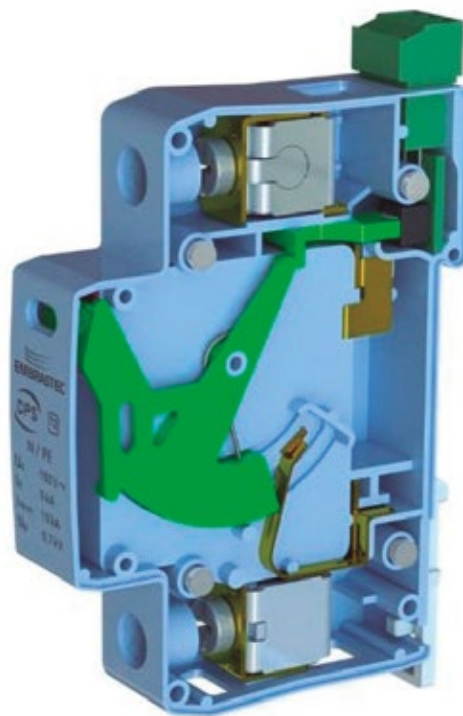


Figura 4. Vista interna de un DPS que utiliza ZnO

otros factores, como las conexiones y la envolvente, también son muy importantes (figura 4).

Degradación del MOV

La degradación de los varistores de ZnO es un fenómeno crítico que limita la vida útil de los DPS que los emplean. En esencia, la degradación consiste en la pérdida de la no linealidad de la curva tensión-corriente (V-I), lo que genera un aumento continuo de la corriente de fuga en condiciones normales de funcionamiento, provoca un efecto joule excesivo y, en casos extremos, lleva a la destrucción térmica del componente [5].

Para entender por qué la corriente de fuga aumenta con el envejecimiento, resulta útil examinar lo que sucede en la microestructura cerámica del MOV.

Los granos de ZnO son altamente conductores. Durante el proceso de sinterización se incorpo-

ran óxidos de metales pesados, como bismuto, bario, cobalto, manganeso y antimonio. Estos dopantes se segregan en los límites de los granos de ZnO. La interfaz entre los granos de ZnO y los óxidos segregados crea estados de trampa electrónica que capturan electrones libres. Esto origina una región de carga espacial (de agotamiento) y una doble barrera de potencial de tipo Schottky. Esta barrera impide el flujo de corriente a bajas tensiones.

El principal mecanismo de degradación del MOV se relaciona con la deformación y la disminución de la altura de la barrera de Schottky en los límites de grano

El principal mecanismo de degradación del MOV se relaciona con la deformación y la disminución de la altura de la barrera de Schottky en los límites de grano. Esto se produce mediante dos procesos principales:

- » Migración de iones y defectos intersticiales: bajo la acción continua de un campo eléctrico —incluso por debajo del umbral de

conducción— y de temperaturas elevadas de funcionamiento, se produce difusión iónica y, como resultado, disminuye la altura de la barrera de Schottky, facilitando el paso de electrones por emisión termoiónica a tensiones normales de funcionamiento.

- » Las sobretensiones repetidas de alta corriente provocan sobrecalentamiento localizado en los límites de grano: el esfuerzo térmico asociado induce la liberación de oxígeno de la red cristalina en la interfaz —por desorción o migración fuera del límite—. Sin el oxígeno necesario para conservar las trampas electrónicas, la barrera de potencial colapsa de manera permanente.

La degradación se acelera por tres factores principales, que actúan de forma aislada o sinérgica [6]:

- » La aplicación constante de la tensión de red crea un campo eléctrico que impulsa la migración iónica a largo plazo (degradación en régimen permanente).
- » Las sobretensiones repetidas de corriente causan un intenso esfuerzo termomecánico y gradientes térmicos abruptos entre el centro



Figura 5. Estado del varistor

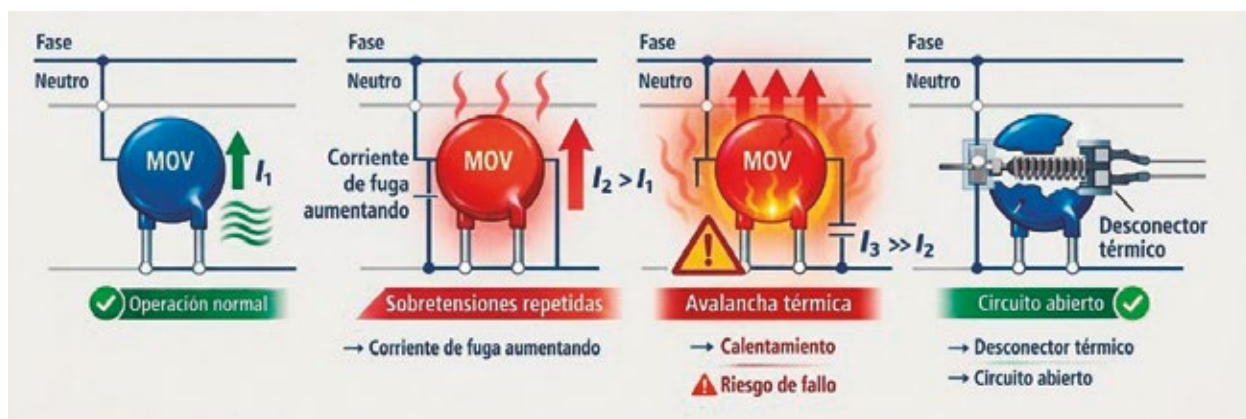


Figura 6. Proceso de degradación del MOV

del grano y el límite, rompiendo enlaces químicos y desplazando iones de oxígeno.

- » La temperatura ambiente elevada: la tasa de difusión iónica y la emisión termiónica de electrones son funciones exponenciales de la temperatura (ecuación de Arrhenius). Los ambientes calientes aceleran notablemente la degradación.

Como los varistores presentan un coeficiente de temperatura negativo de la resistividad en la región de bajas corrientes, el aumento de temperatura reduce aún más la resistencia del componente. Si el calor generado internamente supera la capacidad de la envolvente o del sistema para disiparlo al ambiente, el dispositivo entra en avalancha térmica, lo que puede causar un cortocircuito, una fractura mecánica por esfuerzo térmico o la explosión del componente (figura 5).

Por este motivo, los DPS modernos incorporan desconectores térmicos mecánicos en serie con el varistor de ZnO, diseñados para abrir el circuito antes de que la avalancha térmica destruya la envolvente del dispositivo (figura 6).

Los DPS modernos incorporan desconectores térmicos mecánicos en serie con el varistor de ZnO

Conclusión

Los varistores de óxido metálico cumplen un papel fundamental en la protección de circuitos eléctricos contra sobretensiones transitorias, especialmente cuando se emplean en la fabricación de DPS. Su elevada no linealidad les permite permanecer prácticamente como aislantes durante el funcionamiento normal de la red y pasar rápidamente a la conducción durante una sobretensión, limitando la tensión aplicada al equipo protegido y desviando parte de la energía transitoria.

Sin embargo, la eficacia de un MOV no depende solamente de su capacidad inicial para conducir corrientes de sobretensión. La selección adecuada requiere analizar conjuntamente parámetros como la tensión máxima de funcionamiento continuo, la tensión del varistor, la tensión de limitación, la corriente de sobretensión, la capacidad de absorción de energía y la corriente de fuga. Cuando estos parámetros se seleccionan de forma incorrecta, el componente puede actuar tarde, conducir indebidamente en régimen permanente o sufrir un envejecimiento acelerado.

La eficacia de un MOV no depende solamente de su capacidad inicial para conducir corrientes de sobretensión

La degradación de los varistores de ZnO debe considerarse un factor determinante en el diseño y la aplicación de los DPS. Las sobretensiones repetidas, la temperatura elevada y la tensión continua aplicada al componente pueden modificar progresivamente las barreras de potencial en los límites de grano, aumentando la corriente de fuga y favoreciendo la aparición de una avalancha térmica. Por ello, además de una correcta especificación eléctrica, es indispensable considerar la disipación térmica, la repetitividad de las sobretensiones y los mecanismos de desconexión segura al final de la vida útil.

Así, comprender el funcionamiento, los límites y los mecanismos de degradación de los MOV permite diseñar y seleccionar DPS más fiables, seguros y compatibles con las condiciones reales de instalación. Un DPS eficaz no debe evaluarse únicamente por su capacidad para soportar una sobretensión aislada, sino también por su estabilidad a lo largo del tiempo y por su capacidad de fallar de forma controlada, protegiendo tanto el equipo como la instalación eléctrica. ■■

Comprender el funcionamiento, los límites y los mecanismos de degradación de los MOV permite diseñar y seleccionar DPS más fiables

Referencias

- [1] Sueta, Hélio Eiji; Santos, Sergio Roberto; Altafim, Ruy Alberto C. "Protection of Low-Voltage Equipment and Systems". En: Gomes, Chandima (ed.). *Lightning: Science, Engineering, and Economic Implications for Developing Countries*. Singapur: Springer, 2021. cap. 5, p. 149-172. (Lecture Notes in Electrical Engineering, v. 780). DOI: 10.1007/978-981-16-3440-6.
- [2] Matsuoka, Michio. "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", *Japanese Journal of Applied Physics*. Volume 10, nº 6, Junio de 1971.
- [3] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). *IEC 61643-11:2025 "Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to AC low-voltage power systems - Requirements and test methods"*.
- [4] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). *IEC TR 61643-333:2026 "Components for low-voltage surge protection - Part 333: characteristic equations and life evaluation for metal oxide varistors (MOV)"*
- [5] Ramírez, M. A.; Bassi, W.; Bueno, P.R.; Longo, E; Varela, J.A. "Comparative degradation of ZnO - and SnO₂-based polycrystalline non-ohmic devices by current pulse stress". *J. Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 122002 (5pp) doi:10.1088/0022-3727/41/12/122002.
- [6] Ramírez, Miguel Angel; Bassi, Welson; Parra Rodrigo; Bueno, Paulo Roberto; Longo, Elson; Varela, José Arana. "Comparative Electrical Behavior at Low and High Current of SnO₂- and ZnO-Based Varistors". *J. Am. Ceram. Soc.*, 91 [7] 2402-2404 (2008) DOI: 10.1111/j.1551-2916.2008.02436.x