



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN
DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C
SEGÚN NORMA IEC 61643-12 PARA SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN**

Manuel Enrique Recinos Enríquez

Asesorado por el Ing. Carlos Alberto Quijivix Racancoj

Guatemala, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE UN
SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C SEGÚN NORMA IEC
61643-12 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MANUEL ENRIQUE RECINOS ENRÍQUEZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ALBERTO QUIJIVIX RACANCOJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE UN
SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C SEGÚN NORMA IEC
61643-12 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el noviembre de 2005.

Manuel Enrique Recinos Enríquez

Guatemala 30 de Octubre de 2009

Ingeniero Otto Andrino
Coordinador del Área de Electrotécnica
De la Escuela de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ingeniero Andrino:

De manera atenta informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C SEGÚN NORMA IEC 61643-12 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN”**, presentado por el estudiante Manuel Enrique Recinos Enríquez con número de carné 93-11938.

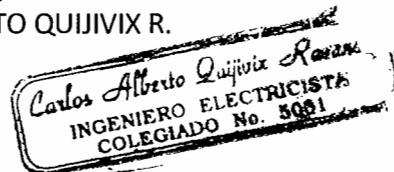
El mencionado trabajo llena los requisitos y cumple con los objetivos planteados por lo que doy mi visto bueno para que proceda a realizar los trámites correspondientes.

Por tanto el autor de esta tesis y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,



ING. CARLOS ALBERTO QUIJIVIX R.





Ref. EIME 21. 2010
Guatemala, 5 de ABRIL 2010.

Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y
SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR
TIPO C SEGÚN NORMA IEC 61643-12 PARA SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN”, del estudiante, Manuel
Enríque Recinos Enríquez, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador del Área de Electrotécnica



OFAG/sro



REF. EIME 33. 2010.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; MANUEL ENRIQUE RECINOS ENRÍQUEZ titulado: “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C SEGÚN NORMA IEC 61643-12 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN”, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



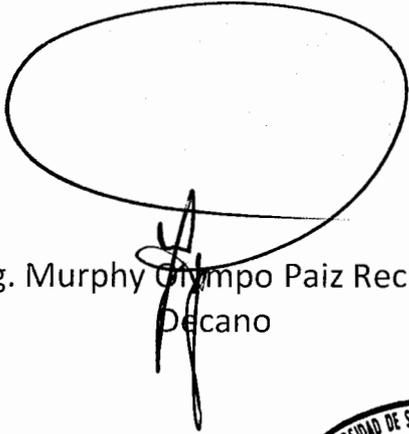
GUATEMALA, 19 DE OCTUBRE 2010.



DTG. 387.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR TIPO C SEGÚN NORMA IEC 61643-12 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN**, presentado por el estudiante universitario **Manuel Enrique Recinos Enríquez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 17 de noviembre de 2010.



/gdech

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	IX
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1 GENERALES.....	1
1.1. Perturbaciones.....	1
1.2. Tipos de perturbaciones.....	2
1.3. Descripción de las perturbaciones.....	3
1.4. ¿Por qué proteger equipos eléctricos en contra de transitorios de voltaje (<i>transients voltage surges</i>)?.....	10
2 FUNCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES.....	11
2.1. Función básica.....	11
2.2. Requisitos adicionales.....	12
2.3. Clasificación.....	13
2.4. Diseños típicos y topologías.....	14
2.5. Ventajas y desventajas de los SPD de uno y dos puertos.....	19
2.6. Condiciones normales de funcionamiento.....	21
2.7. Condiciones anormales de funcionamiento.....	22
3 CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES.....	23
3.1. Reseña en cuanto a SPD fabricados con varistores.....	23
3.2. Características de desempeño.....	23
3.3. Máximo impulso de corriente no repetitiva.....	24

3.4.	Energía máxima.....	25
3.5.	Características típicas V/I de un varistor de ZnO.....	27
3.6.	Limitación de transientes de tensión con varistores de ZnO.....	28
4	SISTEMAS ELÉCTRICOS A PROTEGER.....	31
4.1.	Sistemas de distribución de energía en baja tensión	31
4.2.	Sobrevoltajes y corrientes del rayo.....	31
4.2.1.	Sobrevoltajes de conmutaciones.....	33
4.2.2.	Sobrevoltajes temporales U_{TOV}	32
4.2.3.	Valores estandarizados.....	34
5	¿CÓMO SELECCIONAR UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS	
	MODULAR?.....	37
5.1	Criterio de selección.....	37
5.1.1	Selección de U_c , de U_t y de $I_n/I_{imp}/_{max}/U_{oc}$ del SPD.....	38
5.1.2	Distancia protectora.....	41
5.1.3	Prospecto de vida y modo de fallo.....	42
5.2	Interacción entre SPD's y otros dispositivos:.....	43
5.2.1	Condiciones normales.....	43
5.2.2	Condiciones de falla.....	44
5.2.3	Coordinación entre SPD's y RCD's u otros dispositivos de protección como fusibles o <i>breakers</i>	44
5.2.4	Escoger el nivel de voltaje de protección U_p	45
6	REGLAS Y PRINCIPIOS DE COORDINACIÓN DE UN SPD	
	MODULAR.....	47
6.1	Información general.....	47
6.2	Problemas de coordinación.....	48
6.3	Caso simple de coordinación de dos varistores de ZnO.....	51

6.4	Caso simple de coordinación entre un SPD basado en una cápsula y un SPD basado en un varistor ZnO.....	56
6.4.1	Generales.....	56
6.4.2	Ejemplo del cálculo de los valores estimados requeridos para una inductancia de desacoplo entre una cápsula y un varistor.....	57
6.5	Coordinación a través del método de energía - LTE (<i>Let-through Energy Method</i>)	61
6.5.1	General.....	61
6.5.2	El método.....	64
7	APLICACIONES DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES.....	67
7.1	Posibles modos de instalación y protección.....	67
7.2	Concepto de protección por zonas.....	76
7.3	Ejemplo de un uso doméstico.....	78
7.4	Ejemplo de un uso industrial.....	82
	CONCLUSIONES.....	89
	RECOMENDACIONES.....	93
	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Ruido eléctrico presente en la señal senoidal de voltaje.....	3
2. Ruido en modo común.....	4
3. Ruido en modo diferencial.....	4
4. <i>Transient voltage surge</i> o transitorio de voltaje.....	5
5. <i>Notches</i> o Hendiduras.....	6
6. Distorsión en el voltaje en un centro de cómputo.....	6
7. <i>Sag</i>	7
8. <i>Swell</i>	8
9. Ejemplos de combinación de componentes en un SPD.....	15
10. Ejemplos de SPD's de un puerto.....	16
11. Ejemplos de SPD's de dos puertos.....	17
12. Respuesta de SPD's de uno y dos puertos a un impulso de onda combinada.....	18
13. Gráfica de un impulso de corriente.....	26
14. Comportamiento de V con respecto a I en un varistor de ZnO.....	28
15. Circuito simplificado de la implementación de un varistor para eliminar transientes.....	28
16. Valores máximos de U_{TOV} según IEC 60634-4-442.....	35
17. U_T y U_{TOV}	40
18. Uso típico de dos SPD's.....	47
19. Dos varistores de ZnO con la misma corriente de descarga nominal.....	52

20. Dos varistores de ZnO con diferentes corrientes de descarga nominal.....	53
21. Coordinación entre una cápsula y un varistor de ZnO.....	57
22. <i>LTE</i> - Métodos de coordinación con parámetros estándares de impulso.....	61
23. Instalación de supresores de transitorios en sistemas TN.....	69
24. Instalación de supresores de transitorios en sistemas TT (SPD's aguas debajo de un RCD).....	70
25. Instalación de supresores de transitorios en sistemas TT (SPD's aguas arriba de un RCD).....	71
26. Instalación de supresores de transitorios en sistemas IT sin neutro distribuido.....	72
27. Instalación típica de supresores de transitorios en la entrada en el caso que tengamos un sistema TNC-S.....	73
28. Forma general de instalar un supresor de transientes de un puerto.	74
29. Ejemplos de instalaciones aceptables e inaceptables de un SPD con respecto a los efectos electromagnéticos.....	75
30. Subdivisión de un edificio en zonas de protección.....	76
31. Ejemplo del uso de SPD's en una instalación domiciliar.....	81
32. Ejemplo del uso de SPD's en una instalación industrial.....	83
33. Detalle interno en una instalación industrial.....	86

TABLAS

I.	Tabla número dos de la norma IEEE 1159-1995: categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia.....	09
II.	Valores de la constante K respecto a t_2	26
III.	Valores máximos de TOV según es dado en IEC 60634-4-44.....	34
IV.	Ecuaciones de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía <i>LTE</i>	65
V.	Valores de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía <i>LTE</i>	65
VI.	Ecuaciones con valores incluidos de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía <i>LTE</i>	66

GLOSARIO

Caída de voltaje (en por ciento)	$\Delta U = [(U_{in} - U_{out}) / U_{in}] \times 100\%$. Es el valor calculado según la anterior ecuación en donde U_{in} es el voltaje de entrada y U_{out} es el voltaje de la salida de un dispositivo protector de sobretensión medidos simultáneamente con una carga conectada. Este parámetro (caída de voltaje) se utiliza solamente para dispositivos protectores de sobretensión (SPD's) de dos puertos.
Clasificación de las pruebas de impulso	<p>a) Prueba clase I: Es la prueba que soporta una corriente nominal de descarga (I_n), un impulso de voltaje 1.2/50 μs y una corriente máxima de impulso I_{imp}.</p> <p>b) Prueba clase II: Es la prueba que soporta una corriente nominal de descarga (I_n), un impulso de voltaje 1.2/50 μs y una corriente de máxima descarga I_{max}.</p> <p>c) Prueba clase III: Es la prueba que soporta con la onda combinada (1.2/50 μs, 8/20 μs).</p>
Corriente de descarga nominal (I_n)	Es el valor de cresta de la corriente que atraviesa el SPD que tiene una forma de onda de 8/20 μs . Ésta se utiliza para la clasificación del SPD para la prueba de la clase II y tiene un valor de onda de 20 kA.

Corriente de funcionamiento Continua (I_c)	Es la corriente que atraviesa cada modo de la protección del SPD cuando está energizado en el voltaje máximo de funcionamiento continuo (U_c).
Corriente del Impulso (I_{imp})	Es definida por un valor máximo actual (I_{pico}) y la carga (Q). Esta se utiliza para la clasificación del SPD para la prueba de la clase I con forma de onda de 10/350 μ s.
Corriente de la carga (I_L)	Es la corriente máxima r.m.s. o d.c. que puede ser suministrada a una carga conectada a una salida protegida por un SPD.
Corriente máxima de descarga (I_{max}) para prueba de clase II	Es el valor de cresta de una corriente que tenga una forma de onda de 8/20 μ s y una magnitud de 40 kA. Hay que notar que I_{max} es mayor que I_n .
Desenganche del dispositivo de protección de Sobretenión	Es un dispositivo para desconectar un SPD del sistema en el momento de una falla del SPD. En algunas ocasiones el SPD tiene una señal visible de falla para saber cuándo hay que cambiarlo.
Dispositivo actual residual (RCD)	Es un dispositivo de conmutación o de una asociación mecánica con dispositivos previstos para causar una abertura en sus contactos cuando la corriente residual o desequilibrada logra un valor dado bajo condiciones especificadas.

Dispositivo protector de sobretensión (SPD)	Es un dispositivo que se diseña para limitar sobrevoltajes transitorios y para desviar corrientes producidas por dichos sobrevoltajes. Contiene por lo menos un componente no lineal.
Fugitivo termal	Es una condición operacional cuando la disipación sostenida de la energía de un SPD excede la capacidad termal de la disipación de la cubierta y de las conexiones, conduciendo a un aumento acumulativo en la temperatura de los elementos internos que culminan en una falla.
Impulso de corriente 8/20 μ s	Es un impulso de corriente con un tiempo de subida de 8 μ s hasta alcanzar el 90% de su valor máximo y un tiempo de descenso de 20 μ s hasta alcanzar el 50% de su valor.
Impulso de voltaje 1.2/50 μ s	Es un impulso de voltaje con un tiempo de subida de 1.2 μ s (tiempo de subir de un 10% al 90% del valor máximo del impulso) y un tiempo descenso de 50 μ s hasta alcanzar el 50% de su valor.
Estabilidad termal	Un SPD es térmicamente estable si después de un incremento en su temperatura debido a la prueba de funcionamiento, ésta desciende en el momento en que el SPD se energiza en el voltaje de funcionamiento continuo máximo y en las condiciones de temperatura ambiente.
Onda combinada	Es un tipo de onda que puede ser entregada por un generador que aplique un impulso de voltaje de 1.2/50 μ s a través de un circuito abierto y un impulso de corriente de

8/20 μ s en un cortocircuito. El voltaje, la amplitud actual y las formas de onda que se entregan a un SPD, son determinados por el generador y la impedancia del SPD al cual se aplica la onda. El cociente del voltaje máximo de circuito abierto a la corriente máxima de cortocircuito es 2Ω , esto se define como la impedancia ficticia (Z_f). La corriente del cortocircuito es simbolizado por (I_{sc}). El voltaje del circuito abierto es simbolizado por (U_{oc}).

Pérdida de la inserción

En una frecuencia dada, la pérdida de la inserción de un SPD conectado a un sistema de energía dado se define como el cociente de los voltajes que aparecen antes y después en las barras donde se conecta el SPD. Este resultado se expresa en decibeles (dB).

Máximo voltaje de funcionamiento continuo del sistema de energía (U_{cs})

Es el valor máximo del voltaje r.m.s. o d.c. del sistema en donde se conectará un SPD. Este valor toma en cuenta las regulaciones de voltaje del sistema. Está ligado directamente con U_0 . Además, este valor no considera armónicos, averías o condiciones transitorias.

Nivel protección del voltaje (U_p)

Es el valor del voltaje admisible por los equipos que se desean proteger sin que se vean dañados. Un SPD debe asegurarnos que el voltaje entre sus bornes (U_p) cuando esté descargando a un sistema de puesta a tierra sea inferior a la soportada por el equipo a proteger.

Sobretensión temporal (U_T) Es el valor del máximo r.m.s. o d.c. de la sobretensión que el SPD puede soportar y que excede el voltaje de funcionamiento continuo máximo (U_c) para una duración especificada del tiempo.

Sobretensión temporal de la red (U_{TOV}) Es una sobretensión que ocurre en la red en una localización dada, de duración relativamente larga. Las U_{TOV} 's pueden ser causadas por las fallas internas del sistema de baja tensión $U_{TOV/lv}$ o en el interior del sistema de alta tensión $U_{TOV/hv}$.

Voltaje de cebado en un SPD Es el valor máximo de voltaje antes de que ocurra una descarga disruptiva entre los electrodos de la cápsula de Gas de un SPD.

Voltaje máximo de funcionamiento continuo (U_c) Es el voltaje máximo r.m.s. o voltaje d.c. que se puede aplicar continuamente al SPD.

Voltaje nominal del sistema Es el voltaje al cual un sistema o un equipo están diseñados para funcionar. Un ejemplo es 120 V / 240 V. Bajo condiciones normales del sistema, el voltaje en las terminales del equipo puede diferenciar del voltaje nominal según lo determinado por las tolerancias del sistema.

Nota 1. En este trabajo de graduación se ha utilizado una tolerancia del $\pm 10\%$.

Nota 2. El voltaje nominal de fase a tierra en un sistema se denomina U_n .

Nota 3. El voltaje nominal de fase a neutro en un sistema se llama U_0 .

Voltaje residual (U_{res})

Es el valor máximo del voltaje que aparece entre los terminales de un SPD debido al paso de una corriente derivada a tierra.

OBJETIVOS

- **General**

Explicar el diseño, construcción, caracterización y selección de un supresor de transitorios tipo C en instalaciones eléctricas de baja tensión según la norma IEC 61643-12.

- **Específicos**

1. Describir el diseño interno ideal que deben tener los supresores de transitorios clase C de perturbaciones tipo impulso, para que eliminen eficientemente las sobretensiones y sobrecorrientes transitorias que resultarán inevitablemente al momento que una perturbación de este tipo se presente en un sistema eléctrico de baja tensión.
2. Establecer a detalle los pasos a seguir para la correcta selección de un supresor de transitorios clase C de perturbaciones tipo impulso, según el equipo que se tenga o se quiera proteger.
3. Determinar los principios y las reglas que se deben tomar en cuenta para la correcta coordinación de dos o más supresores de transitorios de perturbaciones tipo impulso a través de métodos de energía.
4. Conocer los campos de aplicación doméstica e industrial que puede tener para un supresor de transitorios clase C.

INTRODUCCIÓN

Las sobretensiones y sobrecorrientes transitorias son voltajes y corrientes de una magnitud muy elevada, del orden de 10 a 30 veces el valor nominal del voltaje o corriente de un sistema eléctrico, que ocurren en lapsos muy pequeños, por el orden de los micro-segundos. Estas sobretensiones y sobrecorrientes son muy peligrosas para los equipos eléctricos debido a que pueden dañarlo parcial o completamente, o también pueden serlo para el operario que administra estos equipos debido a que pueden provocarle una descarga eléctrica.

Los protectores (o supresores) de perturbaciones transitorias tipo impulso son dispositivos eléctricos que eliminan estas perturbaciones que se presentan debido a fenómenos electroatmosféricos o por conmutaciones de maquinaria de gran potencia. Hay perturbaciones de muchas clases, pero en la mayoría, todas tienden a ser de valores mucho mayores a los valores de voltaje y corriente en estado normal de funcionamiento. Los supresores modulares de transitorios son aquellos que con ciertas técnicas de construcción pueden insertarse en equipo o en paneles puesto que su tamaño es pequeño comparado con el equipo o equipos a proteger. Si no se escoge al protector adecuado para el sistema a proteger o si no se instala correctamente, no funcionará adecuadamente y entonces puede llegar a convertirse en una inversión sin sentido y por lo tanto, llegar a ser una protección obsoleta.

En este trabajo de graduación, se describen con amplitud los temas que conciernen al diseño y construcción de este tipo de supresores, específicamente los de la Clase C, los cuales son para instalarse en paneles eléctricos de distribución de circuitos, no a los paneles principales que están en la entrada de la acometida eléctrica, sino a los que se encargan de distribuir la energía a los diferentes circuitos del inmueble. Así mismo, se describen los pasos a seguir para su correcta selección, así como también la coordinación que se debe tener en cuenta cuando se instala más de uno, para que funcionen todos correctamente. También se explica algunas aplicaciones domésticas e industriales para este tipo de supresores de perturbaciones transitorias.

1. GENERALES

A continuación una descripción de lo que son las perturbaciones, los tipos que existen, una descripción de cada una de ellas y el porqué es importante proteger a los equipos eléctricos en contra de este tipo de perturbaciones.

1.1 Perturbaciones

Las perturbaciones del tipo impulso ocurridas en lapsos muy pequeños (inferiores a los 100 μ s), totalmente imperceptibles para el ojo humano, pueden oscilar entre los 100 y los 50,000 voltios, convirtiéndose en voltajes sumamente peligrosos, tanto para el equipo como para el operario. El equipo pierde la capacidad de proporcionar el servicio para el cual fue creado o puede disminuir su vida útil con estas perturbaciones tipo impulsos. A un operario puede ocasionarle hasta la muerte. Por motivo que el lapso en el cual ocurren es muy pequeño, se necesita de elementos capaces de eliminar sus efectos, protegiendo de esta manera el equipo y al operario. El tiempo de respuesta del elemento protector debe ser casi instantáneo al momento de la perturbación, puesto que si no, ésta ocurrirá y dañará al equipo. Además, el protector debe ser capaz luego de capturar la falla y de enviarla a un sistema de puesta a tierra, de reducir a valores capaces de asimilar por el equipo los voltajes residuales que siempre se presentan al momento de una perturbación, de lo contrario, el supresor podrá eliminar la falla pero no el voltaje residual con lo cual el equipo se quemará de todos modos.

Muy pocas ocasiones en la industria guatemalteca se hace un análisis de las causas por las cuales un equipo eléctrico se quema (hablando de cortocircuitos y transitorios), con suerte encontramos algún asesor en ventas que nos indique algo para contrarrestar dichas pérdidas de equipo, que sin conocer el proceso de eliminación de un transitorio o transiente, nos pone a nuestro alcance un protector, sin conocer si será el adecuado y además con muy poca información técnica sobre él.

La caracterización, selección, así como la instalación de protectores modulares del Tipo C o también llamados Tipo II o Clase II, en equipos eléctricos conectados a redes de baja tensión es un trabajo del ingeniero, que con elementos de juicio, planeará y ejecutará el mejor sistema para prevenir este tipo de perturbaciones, tanto en equipos grandes como lo puede ser un transformador o un motor, hasta equipos muy sensibles como una Computadora Personal (PC, siglas en inglés) o un Controlador Lógico Programable (PLC, siglas en inglés).

1.2 Tipos de perturbaciones

Las perturbaciones en la red eléctrica se pueden clasificar de la siguiente manera:

a) Perturbaciones aleatorias:

Son fenómenos aleatorios pasajeros que tienen su origen tanto en los elementos de la red eléctrica, como en la propia instalación del usuario. La consecuencia típica de estas perturbaciones es una caída de tensión transitoria, y en ocasiones un corte más o menos prolongado de algunas zonas de la red.

Las causas típicas de estas perturbaciones son los rayos, las maniobras en alta tensión, las variaciones bruscas de cargas y los cortocircuitos.

b) Perturbaciones estacionarias:

Son fenómenos de carácter permanente, o que se extienden a lapsos bien definidos que desde el punto de vista de los fenómenos que analizamos, podemos considerarlos como permanentes. Estas perturbaciones tienen, en su mayoría, origen en el funcionamiento de ciertos equipos localizados normalmente en la instalación del usuario.

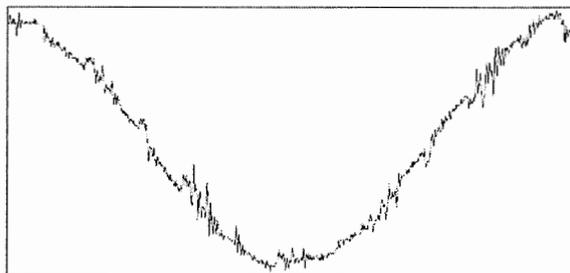
1.3 Descripción de las perturbaciones

Las perturbaciones más frecuentes en la red eléctrica son las siguientes:

a) Ruido:

Señal eléctrica indeseable que produce efectos adversos en los circuitos de control. Ver figura 1.

Figura 1. Ruido eléctrico presente en la señal senoidal de voltaje



Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

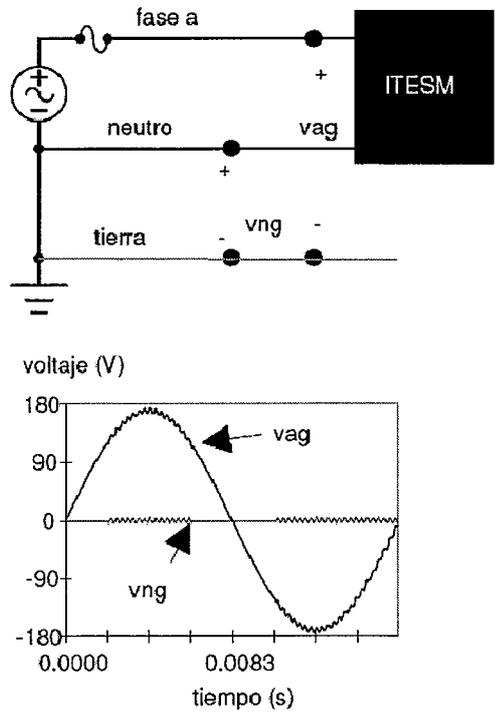
i. Ruido en modo común:

Ruido en voltaje que aparece (con la misma magnitud y en fase) en los dos conductores que llevan corriente con respecto a tierra. Ver figura 2. El voltaje de fase a neutro no contiene ruido, a lo cual se le conoce como V_{an} , que es una senoidal pura.

ii. Ruido en modo diferencial:

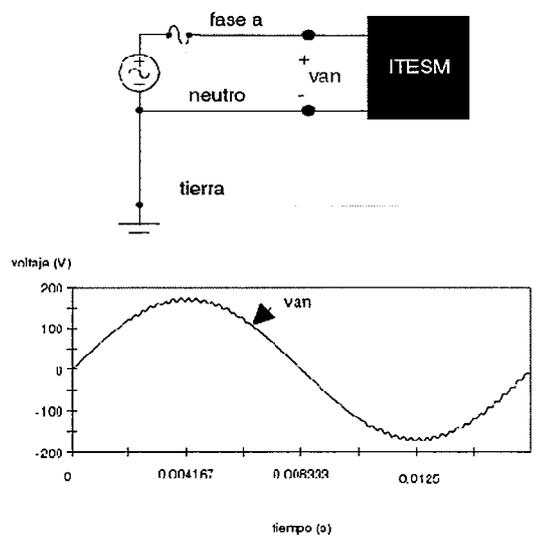
Señal de ruido que aparece entre fase y neutro, pero no entre estos conductores y tierra, ver figura 3. El voltaje de fase a tierra es una senoidal pura y el voltaje de neutro a tierra es cero.

Figura 2. Ruido de modo común



Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

Figura 3. Ruido de modo diferencial

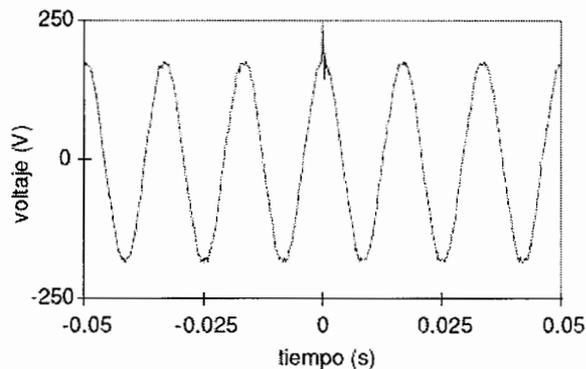


Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

b) *Transient voltage surge* o transitorio de voltaje:

Disturbio en el voltaje de alimentación que dura menos de medio ciclo y que inicialmente tiene la misma polaridad que el voltaje normal, de tal manera que el disturbio se suma a la forma de onda nominal, (es un transitorio, figura 4). Los transitorios son ocasionados por maniobras con interruptores y por descargas atmosféricas.

Figura 4. *Transient voltage surge* o transitorio de voltaje

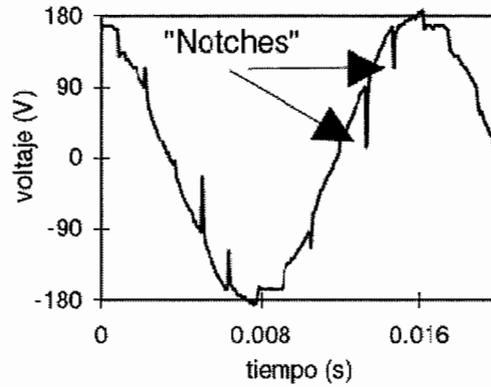


Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

c) *Notch* o Hendidura:

Disturbio en el voltaje de alimentación que dura menos de medio ciclo y que inicialmente tiene polaridad opuesta al voltaje normal, de tal manera que el disturbio se resta a la forma de onda nominal, (es un transitorio). Las muescas o *notches* son ocasionadas por cortos entre fases debido a la conmutación de los SCRs. Cuando un SCR se debe encender y el de otra fase se debe apagar hay un corto tiempo en el cual los dos conducen y se ocasiona el corto entre fases. La figura 5 es el voltaje de fase a tierra en terminales de un UPS.

Figura 5. *Notches* o Hendiduras

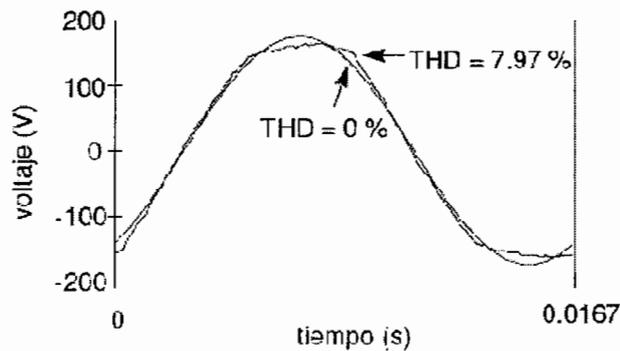


Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

d) Distorsión en el voltaje:

Es una deformación de la forma de onda de tensión, debido a la presencia de armónicos. Ver figura 6. Su nombre técnico es Distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés). Se debe principalmente a la conexión a la red eléctrica de máquinas con núcleo magnético saturado, convertidores estáticos (rectificadores controlados y no controlados, sistemas de alimentación ininterrumpida, fuentes conmutadas) y otras cargas no lineales. La mayoría de los equipos de cómputo toleran una distorsión de hasta el 5%.

Figura 6. Distorsión en el voltaje en un centro de cómputo

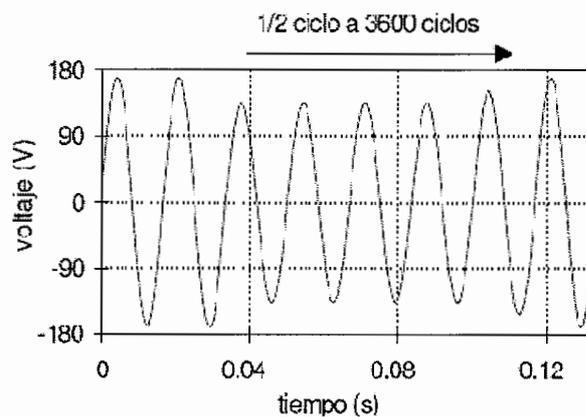


Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

e) *Sag*:

Disminución o reducción en el valor efectivo del voltaje de alimentación con duración de medio ciclo a 3,600 ciclos (de 8.33 ms a 60 s), ver figura 7.

Figura 7. *Sag*



Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

f) *Undervoltage* o Bajo voltaje:

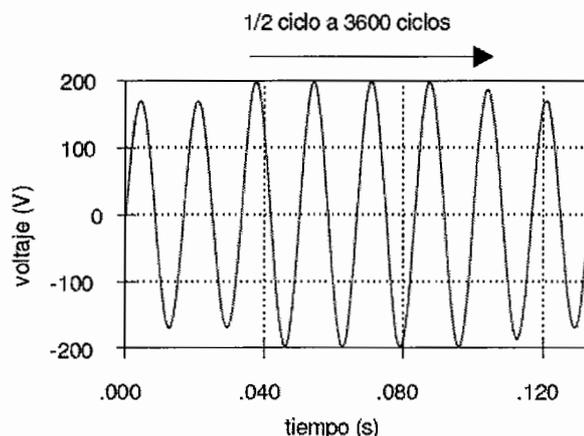
Reducción del valor efectivo del voltaje de alimentación con duración de más de un minuto. El *undervoltage* difiere del *sag* sólo en que dura más.

Las disminuciones de voltajes se presentan cuando hay un corto circuito en el sistema eléctrico. La magnitud de la disminución depende de la cercanía del corto. Las disminuciones también son ocasionadas por el arranque de cargas grandes.

g) *Swell*:

Aumento en el valor efectivo del voltaje de alimentación con duración de medio ciclo a unos 600 ciclos (de 8.333 ms a 10 s). Ver figura 8.

Figura 8. *Swell*



Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

h) *Overvoltage* o Sobrevoltaje:

Aumento en el valor efectivo del voltaje de alimentación con duración de más de diez segundos. El *overvoltage* difiere del *swell* sólo en que dura más.

i) Interrupción:

La pérdida total de voltaje durante un período de tiempo. Cuando el voltaje cae a un valor entre el 10% y el 90% es una disminución de voltaje, si el voltaje cae a un valor inferior al 10% es una interrupción.

j) *Flicker* o Parpadeo:

Variación de voltaje con amplitud suficiente para que se aprecie en las fuentes luminosas. En algunos casos se aprecia el parpadeo en los monitores. Una fuente de parpadeo (*flicker*) es la operación en hornos de arco eléctrico, ya que toman gran corriente de manera pulsante, lo que ocasiona caída de voltaje pulsante.

Recientemente, la IEEE publicó el estándar IEEE 1159-1195. En este aparece la siguiente tabla que contiene definiciones más detalladas de estas perturbaciones.

Tabla I. Tabla número dos de la Norma IEEE 1159-1995: Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia.

Categoría	Contenido típico espectral	Duración típica	Magnitud típica del voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s de elevación	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Frecuencia media	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
1.2.3 Alta frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu
2.0 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos – 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos – 3 seg	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos – 3 seg	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 seg – 1 min	0.1 – 0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado estable	0.5 – 2 %
5.0 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de directa		Estado estable	0 – 0.1 %
5.2 Contenida armónico	0 – 100th H	Estado estable	0 – 20 %
5.3 Inter armónicas	0 – 6 kHz	Estado estable	0 – 2 %
5.4 Muecas en el voltaje		Estado estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado estable	0 – 1 %
6.0 Fluctuaciones de voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 0.7 %

Fuente: <http://www.mty.itesm.mx/dia/maestrias/ie/materias/e-242/Presentaciones/articulos/01.PQ&INST.doc>

1.4 ¿Por qué proteger equipos en contra de transitorios de voltaje (*transients voltaje surges*)?

Cuando se produce una sobretensión del tipo impulso en una línea, puede llegar a circular una corriente del orden de los kiloamperios (kA). Para evitar que la sobretensión destruya el equipo conectado a esa línea, debe instalarse un protector antes del equipo. El supresor si es elegido e instalado correctamente derivará hacia tierra la intensidad generada por la sobretensión sin que pase por el equipo. Cuando el supresor está derivando la corriente generada por una sobretensión, en sus extremos aparece un voltaje debido a su propia impedancia, llamado Voltaje residual. Este voltaje si es mayor de lo que el equipo puede llegar a soportar, aún cuando el equipo no experimentó la sobrecorriente, se quemará.

2. FUNCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES

Llegar a conocer cómo funcionan los supresores de transitorios modulares, su clasificación, sus diseños y topologías más comunes, es algo indispensable para llegar a seleccionar el supresor que mejor se adaptará al sistema eléctrico que se tiene, así como el que mejor protegerá al equipo eléctrico.

2.1 Función básica

Los SPD's considerados en este trabajo de graduación son los que se instalan externamente al equipo que se protegerá, es decir, modulares.

Su función puede ser descrita como sigue:

- En sistemas energizados en ausencia de sobrevoltajes: el SPD no tendrá una influencia significativa en las características operacionales de los sistemas a los cuales se aplica.
- En sistemas energizados durante la aparición de un sobrevoltaje: el SPD responde a un sobrevoltaje bajando su impedancia y de esta manera enviando al sistema de puesta a tierra conectado a él la corriente del sobrevoltaje. Como resultado de este último hecho, se produce un voltaje residual en los bornes del SPD.
- En sistemas energizados, después de la eliminación del sobrevoltaje, el SPD se recupera a un alto valor de la impedancia y luego de haber extinguido cualquier energía posible.

Las características de los SPD's se especifican para alcanzar las funciones antes mencionadas bajo condiciones normales del servicio. Las condiciones normales del servicio son especificadas por la frecuencia del voltaje del sistema, la altitud (en relación con la presión de aire), la humedad y temperatura del aire ambiente.

2.2 Requisitos adicionales

Dependiendo del uso del SPD, existen requisitos adicionales que se pueden llegar a necesitar, por ejemplo:

- Protección del SPD contra contacto directo: debe estar en concordancia con la norma IEC 60364-4-41, la cual nos habla sobre las protecciones de seguridad que se deben tener para no incurrir en daños por descargas eléctricas, tanto por contacto directo como por contacto indirecto en instalaciones eléctricas.

- Seguridad en un sobrevoltaje cuando el SPD falla.

Un SPD puede fallar o destruirse cuando los sobrevoltajes son más grandes que su capacidad de energía máxima y que su máxima corriente de falla. Así que un SPD puede quedar luego de que falle cualquiera de los siguientes modos:

a) Modo del circuito abierto:

En el modo del circuito abierto el sistema queda sin protección y bajo la influencia de sobrevoltajes externos. Para asegurarse que el SPD malo pueda ser reemplazado antes del siguiente sobrevoltaje, debería contar con un sistema visual que indicara su situación de fallo, el cual normalmente viene en la parte frontal del mismo. Para cuando no tengan un sistema visual para determinar su

estado, deberá recurrirse a equipos proporcionados por el fabricante, los cuales nos dirán si el SPD aún se encuentra en buen estado o hay que reemplazarlo.

b) Modo del cortocircuito:

En el modo de cortocircuito, el sistema es severamente influenciado por el fallido SPD. La corriente de falla de otro sobrevoltaje atravesará el SPD, y toda la energía disipada podrá causar fuego, lo que luego se puede convertir en un incendio. Por eso, la instalación del SPD debería cumplir con la norma IEC 61643-1, la cual indica que se debería instalar un accesorio de desconexión junto al SPD que lo sacará de ejecución en cualquier momento que necesitemos, de esta manera evitamos el riesgo de incendio.

2.3 Clasificación

Los supresores de transitorios son dispositivos protectores que se clasifican de la siguiente forma según el documento IEC 61643-1:

1. Número de puertos: uno o dos.
2. Topología del diseño: clase I, II y III.
3. Localización: de interior o al aire libre.
4. Accesibilidad: accesible, no accesible.
5. Método del montaje: permanente o portable.
6. Desenganche: localización (externo, interno, externo e interno, ninguno) y función (termal, corriente de la salida, sobre intensidad de corriente).
7. Protección de reserva de la sobre intensidad de corriente: especificado o no el grado de protección proporcionado por el recinto del SPD (código del IP).
8. Gama de temperaturas.

- Nota: por definición, externos significa afuera en gabinetes cubiertos. Por lo tanto, tales SPD están sujetos a condiciones externas.

Cada uno de los fabricantes, deberá establecer las normas que cumple, para que así el consumidor pueda saber qué SPD adquirir, todo según el ambiente que tenga, sea externo o interno.

2.4 Diseños típicos y topologías

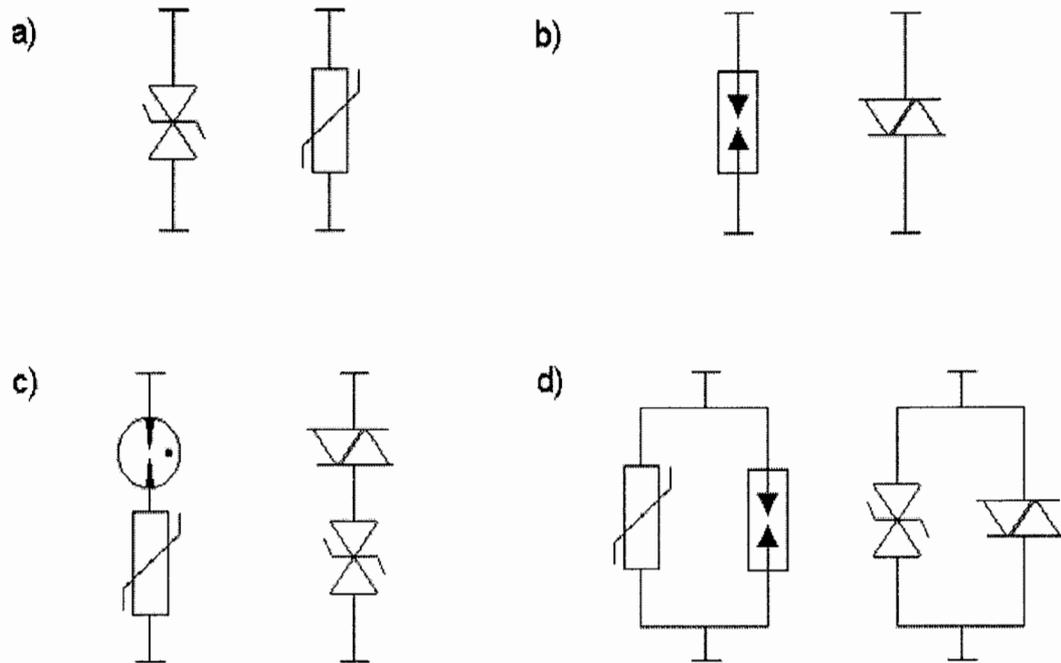
Los componentes protectores principales de SPD's pertenecen a dos categorías:

- Componentes que limitan el voltaje: varistores, diodos supresores, etc.
- Componentes de conmutación de voltaje: Cápsulas de aire, tubos de descarga de gas, tiristores (rectificadores controlados de silicio), etc.

De acuerdo con estos componentes, los diseños básicos del SPD son los siguientes: (véase la figura 9):

- Componente para limitar el voltaje en una línea (figura 9 a).
- Componente para realizar una conmutación en el voltaje (figura 9 b).
- Combinación de componentes limitadores y que conmutan el voltaje (figura 9 c).

Figura 9. Ejemplos de combinación de componentes de un SPD



Leyenda:

- a) Componentes que limitan el voltaje.
- b) Componentes que conmutan el voltaje.
- c) Componentes limitadores del voltaje en serie con componentes conmutadores del voltaje.
- d) Componentes limitadores del voltaje en paralelo con componentes conmutadores del voltaje.

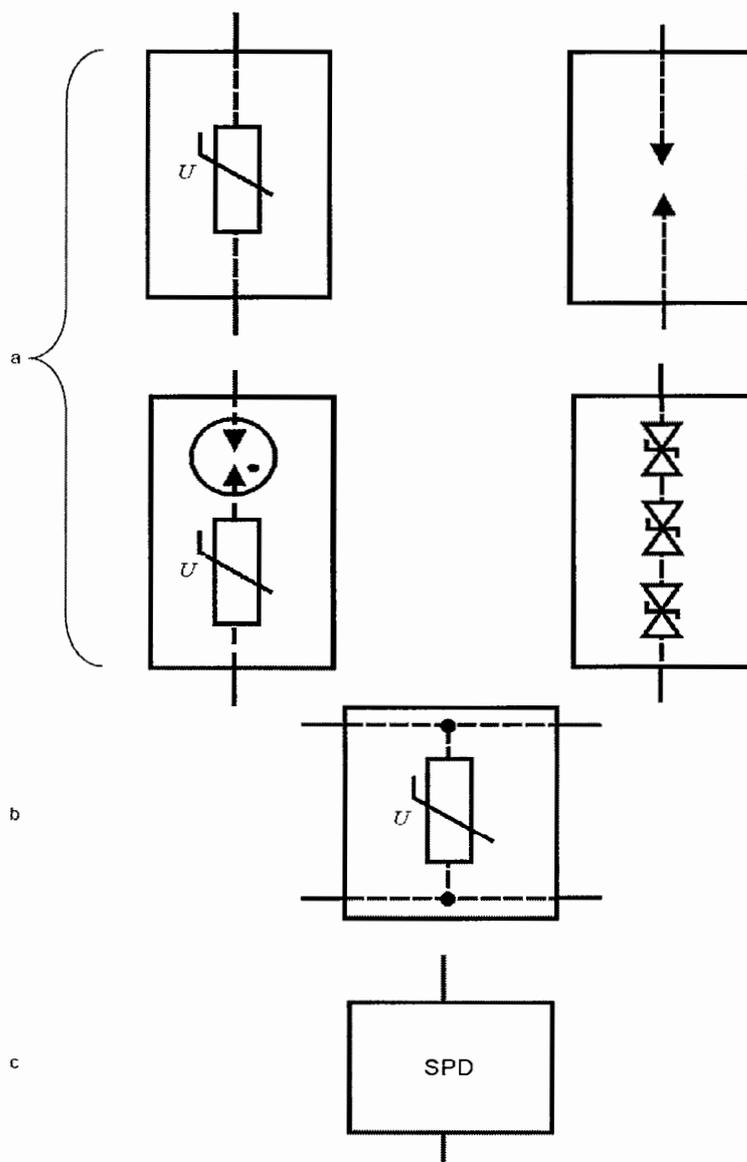
Fuente: Norma IEC 61643-12

No todo SPD es definido por un arreglo simple de componentes básicos. Podían incorporar indicadores, desenganches, fusibles, inductores, condensadores y otro tipo de componentes.

Otra manera de catalogar a los SPD's es a través del número de puertos:

1. De un puerto:

Figura 10. Ejemplos de SPD's de un puerto



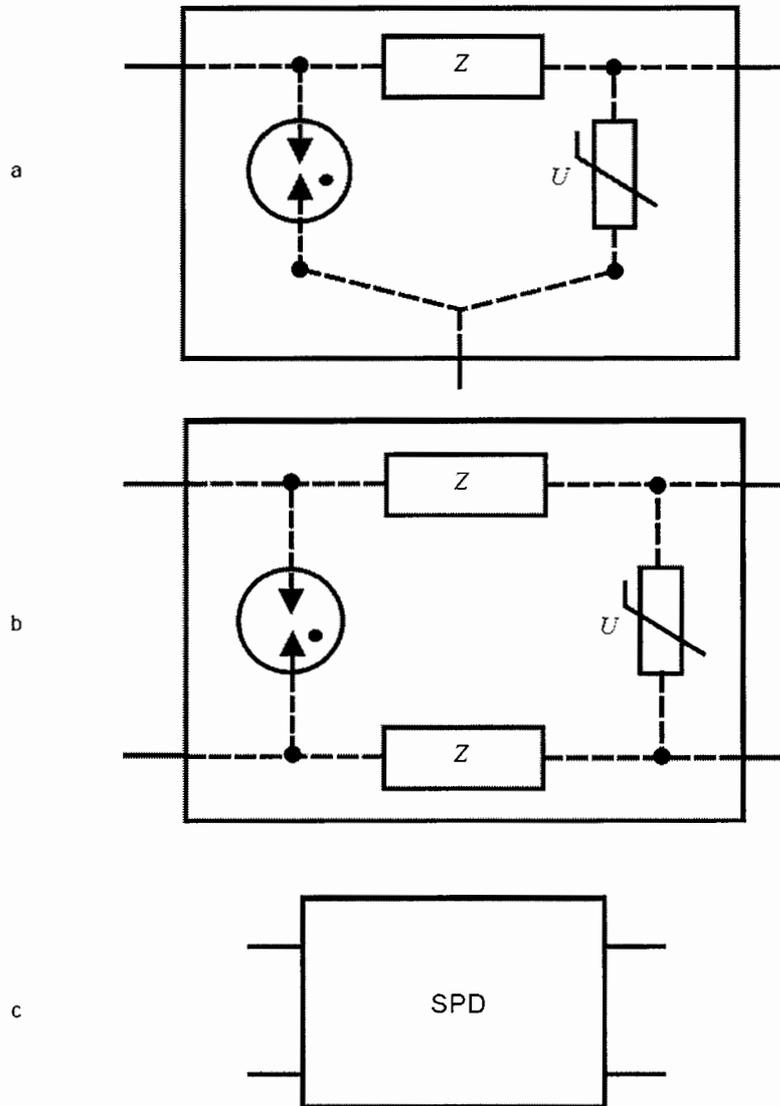
Leyenda:

- a) SPD's de un puerto.
- b) SPD de un puerto con entradas y salidas separadas.
- c) Símbolo genérico de un SPD de un puerto.

Fuente: Norma IEC 61643-12

2. De dos puertos:

Figura 11. Ejemplos de SPD's de dos puertos



Leyenda:

a) SPD de dos puertos y tres terminales.

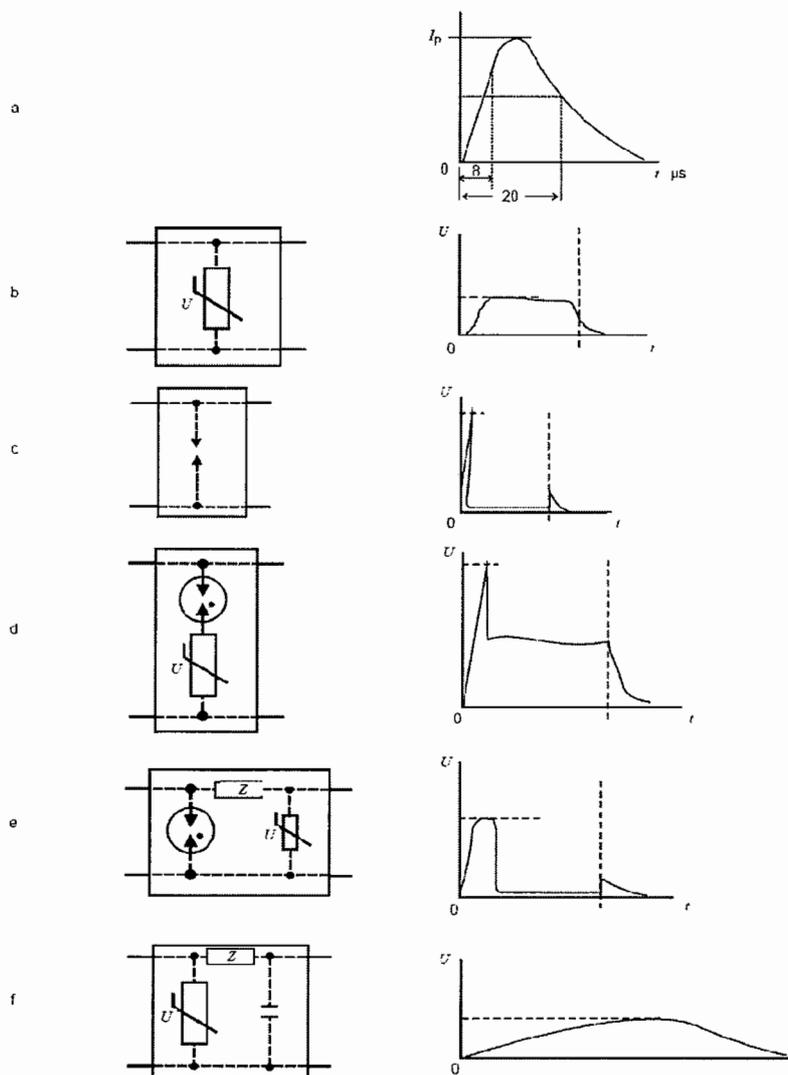
b) SPD de dos puertos y cuatro terminales.

c) Símbolo genérico de un SPD de dos puertos.

Z Impedancia en serie entre las terminales de entrada y salida.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Figura 12. Respuesta de SPD's de uno y dos puertos a un impulso de onda combinada



Leyenda:

- a) Forma de onda aplicada.
- b) Respuesta de una limitación de voltaje por un SPD.
- c) Respuesta de una limitación de voltaje por un SPD.
- d) Respuesta de un SPD combinado de un puerto.
- e) Respuesta de un SPD combinado de dos puertos.
- f) Respuesta de un SPD combinado de dos puertos con filtro.

Los niveles de voltaje son sólo representativos no indicando un valor real.

Fuente: Norma IEC 61643-12

2.5 Ventajas y desventajas de los SPD de uno y dos puertos

A continuación se mencionan algunas ventajas y desventajas de cada uno de los SPD que se muestran en la figura 12, es decir, de uno y dos puertos, ante un impulso de onda combinada del tipo 8/20 μ s:

a) SPD del inciso (b):

Ventajas:

- Durante el impulso limita el voltaje a un nivel que no dañará el equipo.
- El nivel de voltaje luego del impulso no incrementa, se mantiene y regresa a valor cero.
- El costo de este tipo de SPD es barato con respecto a los demás tipos.

Desventajas:

- Su reacción no es tan rápida conforme el impulso va en aumento.
- El nivel del voltaje limitado se mantiene, lo ideal es que disminuya rápidamente a valor cero.

b) SPD del inciso (c):

Ventajas:

- Limita el voltaje a valores muy pequeños, en algunos casos casi iguales a cero.
- El nivel de voltaje luego del impulso, regresa pronto a valor cero.

Desventajas:

- Desafortunadamente, para activarse necesita que el valor del sobrevoltaje sea muy alto, lo cual da oportunidad a que el equipo se pueda quemar.

- Puede absorber poca cantidad de energía, es decir, que no se podrá usar para impulsos tipo rayo que anden por arriba de los 10 kiloamperios.

c) SPD del inciso (d):

Ventajas:

- Debido a que ya incorpora una cápsula de gas (primer elemento en el SPD) tiene la capacidad de absorber una gran cantidad de energía, más que cualquier otro mencionado en los incisos anteriores.
- Si su coordinación entre los dos elementos internos es buena, es un SPD muy eficiente ante casi cualquier tipo de impulso, debido a que el primer elemento se encarga de eliminar el frente de onda más alto del impulso, y el segundo elemento de reducir a valores manejables el voltaje residual que aparecerá inevitablemente en las terminales del SPD.

Desventajas:

- El costo es elevado, aún más que los SPD vistos en los incisos anteriores.
- Si no se logra la correcta coordinación entre ambos elementos (el primero y el segundo) la cantidad de energía eliminada por el primero se puede acumular en el segundo y hará que el SPD explote y ponga en riesgo a toda la instalación.

d) SPD del inciso (e):

Ventajas:

- La limitación de voltaje del frente de onda es muy efectiva, llevándolo a valores casi iguales a cero.
- Puede manejar impulsos de gran cantidad de energía debido a la cápsula de gas que tiene incorporado.

Desventajas:

- En este tipo de configuración, el tiempo de respuesta se vuelve algo lento, permitiendo con esto una acumulación mediana de energía, lo cual si no es bien manejada por el segundo elemento puede causar que el equipo a proteger se queme.
- El costo es algo elevado debido a la capsula de gas incluida.

e) SPD del inciso (f):

Ventajas:

- El tiempo de respuesta es bastante rápido, al mismo tiempo en que el frente de onda está entrando al SPD, éste ya está respondiendo.
- Gracias al filtro, la curva de sobrevoltaje es suavizada lentamente a valores bajos, de igual manera su descenso es suavizado.

Desventajas:

- No es apto para frentes de onda que lleven gran cantidad de energía, como por ejemplo cuando el impulso es provocado por un rayo y éste anda por arriba de los 40 kiloamperios.
- El sobrevoltaje se extiende mucho con respecto al tiempo, lo que provoca la acumulación de energía en las terminales de salida del SPD, lo cual a su vez puede provocar que el equipo se queme.

2.6 Condiciones normales de funcionamiento de un SPD

Según describe la norma IEC 6143-1, las condiciones normales de funcionamiento de un SPD son las siguientes:

1. La frecuencia de la fuente de energía está entre 48 Hz y 62 Hz a.c.
2. Altitud que no excede 2,000 metros.

3. La temperatura de almacenaje y operación debe ser:
 - a. Rango normal: -5 °C a 40 °C.
 - b. Rango extendido: -40 °C a 70 °C.
 4. La humedad relativa en temperatura dentro de un recinto debe de estar entre 30% y 90%.
- Nota 1: el usuario determinará la localización de dónde será aplicado el SPD (interior o exterior) y debe decidir si las condiciones de temperatura y humedad son las adecuadas para su uso.
 - Nota 2: la norma IEC 61643-1 también da indicaciones con respecto al voltaje de funcionamiento continuo máximo del SPD.

2.7 Condiciones anormales de funcionamiento de un SPD

1. La exposición del SPD a las condiciones anormales de servicio puede requerir un estudio especial en el diseño o aplicación del mismo.
 2. Radiación solar: la mayoría de los SPD's no deben ser expuestos a radiación solar. En general, la radiación solar no está considerada mientras se ponen a prueba los SPD's. En el caso de que se necesite instalar el SPD's bajo la influencia de radiación solar, deberá ponerse en contacto con el fabricante para recibir mayores instrucciones de su aplicación.
- Nota 3: en cuanto al grado de protección del recinto donde se instalará el SPD, se espera que cumpla por lo menos con un grado de protección IP 2X. El código IP es un sistema de codificación para indicar los grados de protección proporcionados por el recinto contra el acceso a elementos peligrosos (agua, polvo, etc.). En este caso, el grado de protección IP 2X indica que el recinto debe proporcionar una protección en contra de la penetración de cuerpos sólidos con un diámetro superior a los 12 milímetros.

3. CÁLCULO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES

Existen varios tipos de dispositivos electrónicos con los cuales se fabrican los supresores de transitorios, entre los más eficientes para capturar el impulso se encuentran los varistores. A continuación se detalla un poco sobre ellos, sus características y cualidades que nos ayudan a construir un eficiente supresor de transitorios.

3.1 Reseña en cuanto a SPD fabricados con varistores

Los varistores proporcionan una protección fiable y económica contra transitorios de alto voltaje que pueden ser producidos, por ejemplo, por relámpagos, conmutaciones o ruido eléctrico en líneas de potencia de d.c o a.c.

Los varistores tienen la ventaja sobre los diodos (supresores de transitorios) que, al igual que ellos pueden absorber energías transitorias (incluso más altas) pero además pueden suprimir los transitorios positivos y negativos.

Cuando aparece un transitorio, el varistor cambia su resistencia de un valor alto a otro valor muy bajo. El transitorio es absorbido por el varistor, protegiendo de esa manera los componentes sensibles del circuito.

Los varistores se fabrican con un material no-homogéneo (carburo de silicio).

3.2 Características de desempeño

- a) Amplia gama de voltajes, desde 14 V a 550 V (RMS). Esto permite una selección fácil del componente correcto para una aplicación específica.

- b) Alta capacidad de absorción de energía respecto a las dimensiones del componente.
- c) Tiempo de respuesta de menos de 25 ns, absorbiendo el transitorio en el instante que ocurre.
- d) Muy bajo consumo de energía (en *stand-by*), por no decir que es virtualmente nada.
- e) Valores bajos de capacidad, lo que hace al varistor apropiado para la protección de circuitería en conmutación digital.
- f) Alto grado de aislamiento.

3.3 Máximo impulso de corriente no repetitiva

El pico máximo de corriente permitido a través del varistor depende de la forma del impulso, del ciclo de trabajo y del número de pulsos.

Con el fin de caracterizar la capacidad del varistor para resistir impulsos de corriente, se permite generalmente que garantice un ‘máximo impulso de corriente no repetitiva’. Este viene dado por un impulso caracterizado por la forma del impulso de corriente desde ocho microsegundos a 20 microsegundos siguiendo la norma “IEC 60-2”, con tal que la amplitud del voltaje del varistor medido a 1 mA no lo hace cambiar más del 10% como máximo.

Un impulso mayor que el especificado puede ocasionar cortocircuitos o ruptura del propio componente; se recomienda por lo tanto instalar un fusible en el circuito que utiliza el varistor, o utilizar una caja protectora por si estalla. Actualmente, las tecnologías alemanas han mejorado mucho en este aspecto, de tal manera que los SPD’s actuales compuestos por varistores no explotan, simplemente se dañan y dejan de funcionar, lo cual ayudará para que no haya riesgo de incendios.

Si se aplica más de un impulso o el impulso es de una duración más larga, habría que estudiar las curvas que al efecto nos proporcionan los fabricantes, estas curvas garantizan la máxima variación de voltaje (10%) en el varistor con 1 mA.

3.4 Energía máxima

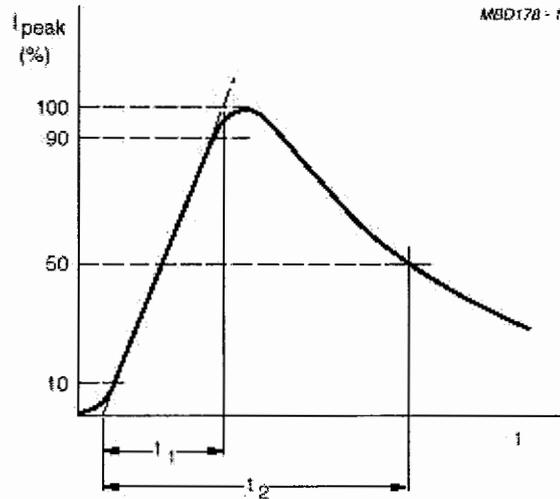
Durante la aplicación de un impulso de corriente, una determinada energía será disipada por el varistor. La cantidad de la energía de disipación es una función de:

- a) La amplitud de la corriente.
- b) El voltaje correspondiente al pico de corriente.
- c) La duración del impulso.
- d) El tiempo de bajada del impulso; la energía que se disipa durante el tiempo entre 100% y 50% del pico de corriente.
- e) La no linealidad del varistor.

Con el fin de calcular la energía disipada durante un impulso, se utiliza generalmente una onda normalizada de la corriente. Esta onda que esta prescrita por la norma "IEC 60-2 sección 6" tiene una forma que aumenta desde cero a un valor pico en un tiempo corto, disminuyendo hasta cero de una manera exponencial o bien sinusoidal (ver figura 12 a).

Esta curva es definida por el tiempo principal virtual (t_1) y el tiempo virtual al valor medio (t_2) como el mostrado en la figura 13.

Figura 13. Gráfica de un impulso de corriente



Fuente: <http://www.ifent.org/lecciones/varistores/>

El cálculo de energía durante la aplicación de tal impulso viene dado por la fórmula:

$$E = V_{\text{peak}} \times I_{\text{peak}} \times t_2 \times K$$

donde:

I_{peak} = corriente de pico

V_{peak} = voltaje a la corriente de pico

K = una constante que depende de t_2 , cuando t_1 va de 8 a 10 microsegundos, ver Tabla 2.

Tabla II. Valores de la constante K respecto a t_2

t_2 (μs)	K
20	1
50	1.2
100	1.3
1000	1.4

Fuente: <http://www.ifent.org/lecciones/varistores/>

La energía máxima no representa entonces la calidad del varistor, pero puede ser un indicio valioso cuando se comparan diversas series de componentes que tienen el mismo voltaje.

La energía máxima indicada por los fabricantes es válida para un impulso estándar de duración entre 10 y 1,000 microsegundos, que da como máxima variación de voltaje un 10% para 1 mA.

Cuando se aplica más de un impulso, se debe recurrir a información adicional que proporcionan los fabricantes.

3.5 Características típicas V/I de un varistor de ZnO

La relación entre la tensión y la corriente en un varistor viene dada por:

$$V = C \times I^b$$

donde:

V = voltaje.

C = es el voltaje del varistor para una corriente de 1 A.

I = es la corriente actual que atraviesa el varistor.

b = es la tangente del ángulo que forma la curva con la horizontal. Este parámetro depende del material con que está fabricado el varistor, en el caso del ZnO su valor es de 0.035.

Ejemplo:

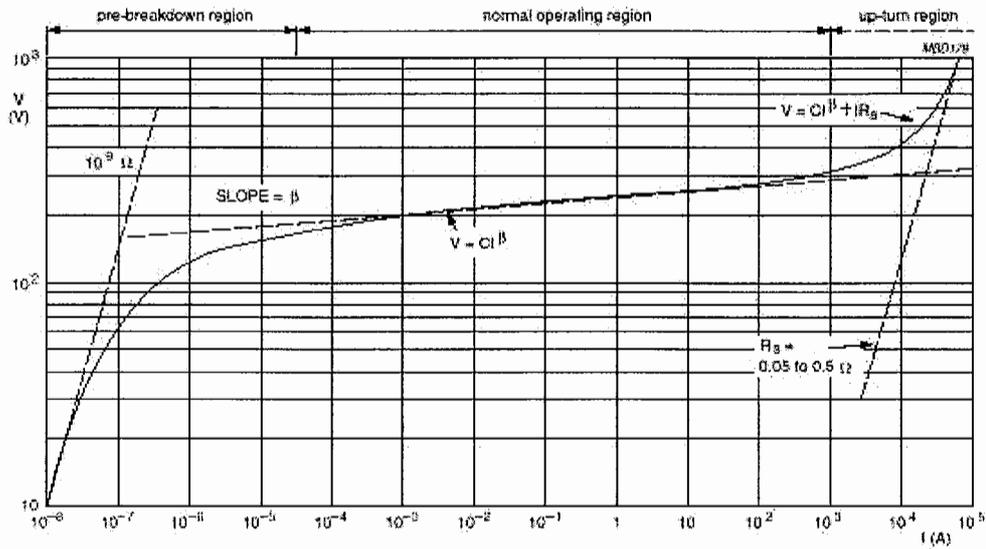
Se tiene un varistor con un valor de C = 230 V a 1 A, y b = 0.035 (ZnO)

Entonces: $V = C \times I^b$

Para una $I = 10^{-3}$ A $V = 230 \times (0.001)^{0.035} = 94.23$ V

Y para una $I = 10^2$ A $V = 230 \times (0.010)^{0.035} = 140.98$ V

Figura 14. Comportamiento de V con respecto a I en un varistor de ZnO

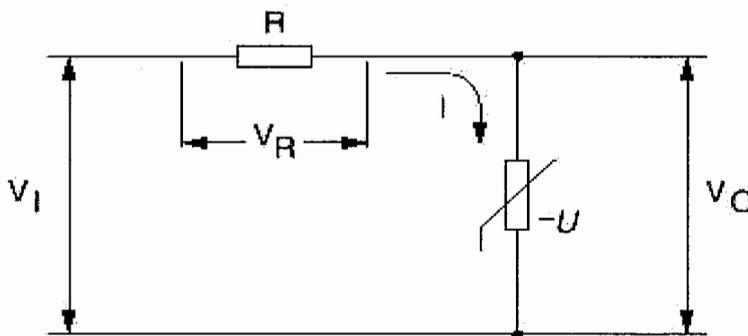


Fuente: <http://www.ifent.org/lecciones/varistores/>

3.6 Limitación de transientes de tensión con varistores de ZnO

En la Figura 15 el voltaje de alimentación V_i es derivado por la resistencia R (p. ej. la resistencia de línea) y el varistor ($-U$) seleccionado para la aplicación.

Figura 15. Circuito simplificado de la implementación de un varistor para eliminar transientes



Fuente: <http://www.ifent.org/lecciones/varistores/>

$$V_I = V_R + V_O$$

$$V_I = R \times I + C \times I^b$$

Si el voltaje de alimentación varía una cantidad dV_I la variación de corriente será de dI y la tensión de alimentación podrá expresarse como:

$$(V_I + dV_I) = R \times (I + dI) + C \times (I + dI)^b$$

Dado el valor pequeño de b (que estará por el orden de 0.03 a 0.05), es evidente que el valor de $(C \times I^b)$ será muy pequeño comparado a la variación de $(R \times I)$ cuando V_I aumente a $(V_I + DV_I)$.

Un aumento grande de V_I conduce a un aumento grande de V_R y un aumento pequeño de V_O .

4. SISTEMAS ELÉCTRICOS A PROTEGER

Al evaluar una instalación en baja tensión con respecto al uso de un SPD, se necesitan considerar dos factores:

- Las características del sistema de baja tensión, incluyendo posibles niveles que alcanzarán los sobrevoltajes y sobrecorrientes.
- Las características del equipo que protegerá.

4.1 Sistemas de distribución de energía en baja tensión

Los sistemas de distribución de energía en baja tensión son caracterizados básicamente por el tipo de aterrizaje del sistema (TNC, TNS, TNC-S, TT, IT) y el voltaje nominal. Independientemente de las características del sistema, pueden ocurrir varios tipos de sobrevoltajes y corrientes. En este trabajo de graduación los sobrevoltajes se clasifican en tres grupos:

- Rayos.
- Conmutaciones.
- Sobrevoltajes temporales.

4.2 Sobrevoltajes y corrientes del rayo

En la mayoría de los casos la tensión del rayo es el factor principal en la selección de un SPD. El conocimiento de la forma de onda y de la amplitud de la corriente (o del voltaje) de un rayo son necesarios para la selección apropiada de un SPD. Generalmente (por ejemplo, en el caso de un impacto directo a las líneas o sobrevoltajes inducidos en ellas), tensiones más altas ocurren fuera de instalaciones y decrecen desde las afueras de las instalaciones hacia las partes internas de la misma.

La necesidad de la protección contra sobrevoltajes de rayos depende de:

- El nivel cerámico $-N_g-$ del área (Nivel cerámico es el número de rayos ocurridos por kilómetro cuadrado por año). Algunos países han realizado estudios y tienen datos de los niveles cerámicos de todo su territorio.
- Lo expuesto que pueda estar una instalación eléctrica, incluyendo las entradas de energía (acometidas). Los sistemas subterráneos se consideran generalmente menos expuestos respecto a los sistemas instalados arriba del suelo.

En algunas situaciones particulares, aunque la entrega de energía sea proporcionada por un cable subterráneo, el uso de un SPD puede ser recomendado para proporcionar la protección de la instalación. Esto ocurre, por ejemplo, cuando:

- La instalación eléctrica tiene un sistema de la protección contra rayos instalado en la vecindad.
- La longitud del cable no es suficiente para proporcionar la separación adecuada (atenuación) de la instalación de la parte de arriba de la red.
- Cuando altos sobrevoltajes de origen atmosférico se pueden esperar impacten en la línea que provee energía en el lado del MV (mediana tensión) del transformador conectado con la instalación.
- Un cable subterráneo puede ser afectado por un impacto directo de rayo en un suelo con alta resistividad.
- El tamaño o la altura del edificio sea significativamente grande, para ser alcanzado por un rayo que afecte el cable subterráneo que le brinda energía

eléctrica. El riesgo de un impacto directo en otros servicios salientes o entrantes (líneas telefónicas, sistemas de antenas de radio o microondas, etc.) que pueda afectar el sistema eléctrico debe también ser considerado.

También existe el caso cuando los edificios tienen su propio transformador y no poseen SPD's, el edificio puede llegar a tener tensiones muy altas en sus instalaciones eléctricas a la hora de una falla.

4.2.1 Sobrevoltajes de conmutaciones

Estas tensiones, en términos de la corriente máxima y del voltaje, son generalmente más bajas que tensiones provocadas por un rayo pero pueden tener duración más larga. Sin embargo, en algunos casos, particularmente muy dentro de la estructura o cerca de las fuentes de conmutación, la tensión podría ser más alta que esas tensiones causadas por el rayo. Se necesita conocer la energía relacionada con esas sobretensiones de conmutación para poder escoger el SPD apropiado. El tiempo de la duración de las conmutaciones, incluyendo los transitorios debido a fallas y operaciones de fusibles, puede ser mucho más larga que la duración del relámpago.

4.2.2 Sobrevoltajes temporales U_{TOV}

Cualquier dispositivo se puede exponer a un sobrevoltaje temporal U_{TOV} durante su curso de la vida que exceda el voltaje de funcionamiento continuo máximo del sistema.

Un sobrevoltaje temporal tiene dos variables: magnitud y tiempo. El tiempo de la duración del sobrevoltaje es dependiente principalmente del aterrizaje de la fuente del sistema eléctrico (esto incluye el aterrizaje de la fuente de alto voltaje como también el aterrizaje del sistema eléctrico en donde está conectado el SPD). En la determinación de

los sobrevoltajes temporales, la consideración se debe dar al voltaje de funcionamiento continuo máximo del sistema de energía (U_{cs}).

4.2.3 Valores estandarizados

La *International Electrotechnical Commission* ha publicado un documento IEC 60364-4-44 que da los valores máximos esperados de los U_{TOV} para redes de baja tensión. Valores más bajos son posibles dependiendo de muchos factores tales como la localización del SPD, el tipo de red, etc. Los valores máximos (véase también la figura 16) dados en la tabla tres, están dados en la instalación de un consumidor respecto a la localización de su transformador (véase tabla III nota 2).

A continuación la tabla III que ayudará a comprender mejor estos valores.

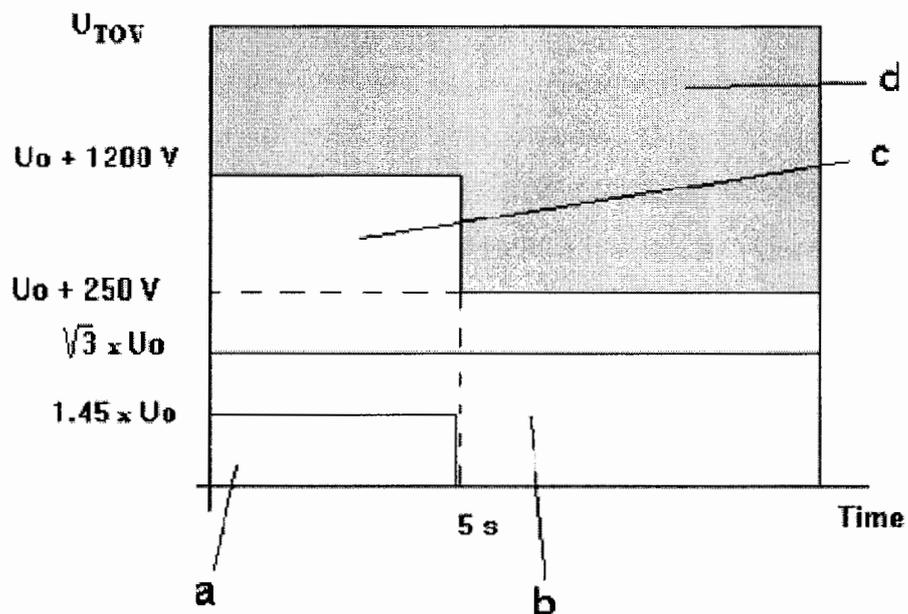
Tabla III. Valores máximos de TOV según es dado en IEC 60634-4-44

Localización de U_{TOV}	Sistema	Valores máximos para $U_{TOV, HV}$
Entre fase y tierra	TT, IT	$U_0 + 250 \text{ V}$ para una duración $> 5 \text{ s}$
		$U_0 + 1200 \text{ V}$ para una duración $< 5 \text{ s}$
Entre neutro y tierra	TT, IT	250 V para la duración $> 5 \text{ s}$
		1200 V para la duración $< 5 \text{ s}$
Estos valores son valores extremos relacionados con las fallas en la red de alto o mediano voltaje y se pueden calcular dependiendo del tipo de red existente.		
Localización de U_{TOV}	Sistema	Valores máximos para U_{TOV}
Entre fase y neutro	TT y TN	$\sqrt{3} \times U_0$
Este valor se relaciona con una pérdida del conductor neutral en el sistema de baja tensión.		
Entre fase y tierra	IT (sistema del TT: véase la Nota 1)	$\sqrt{3} \times U_0$
Este valor se relaciona con un aterrizaje accidental en el sistema de baja tensión.		
Entre fase y neutro	TT, IT y TN	$1.45 \times U_0$ para una duración hasta 5 s
Este valor se relaciona con el cortocircuito entre una fase y el neutro.		

Fuente: Norma IEC 61643-12

- Nota 1: se ha demostrado que tales TOV's altos puede ocurrir en sistemas TT también.
- Nota 2: los valores máximos de TOV respecto al transformador pueden ser diferentes de la tabla de arriba (más altos o más bajos, todo dependerá del tipo de transformador, ubicación, etc.).

Figura 16. Valores máximos de U_{TOV} según IEC 60634-4-442



Leyenda:

- Área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y neutro en sistemas del tipo TT, TN y IT, para una falla (corto circuito) en las instalaciones de bajo voltaje (LV).
- Área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y la tierra en sistemas del tipo IT (para sistemas TT véase Nota 1), para una falla en las instalaciones de bajo voltaje -LV- (aterrizaje accidental de una fase) y el área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y el neutro en los sistemas del tipo TT y TN para una falla en las instalaciones de bajo voltaje -LV- (pérdida del neutro).
- Valor máximo para $U_{TOV, HV}$ respecto a la localización del consumidor entre la fase y la tierra para sistemas del tipo TT y IT, en el caso de una falla que ocurre en sistemas de mediana tensión -HV-.
- Área sin definir.

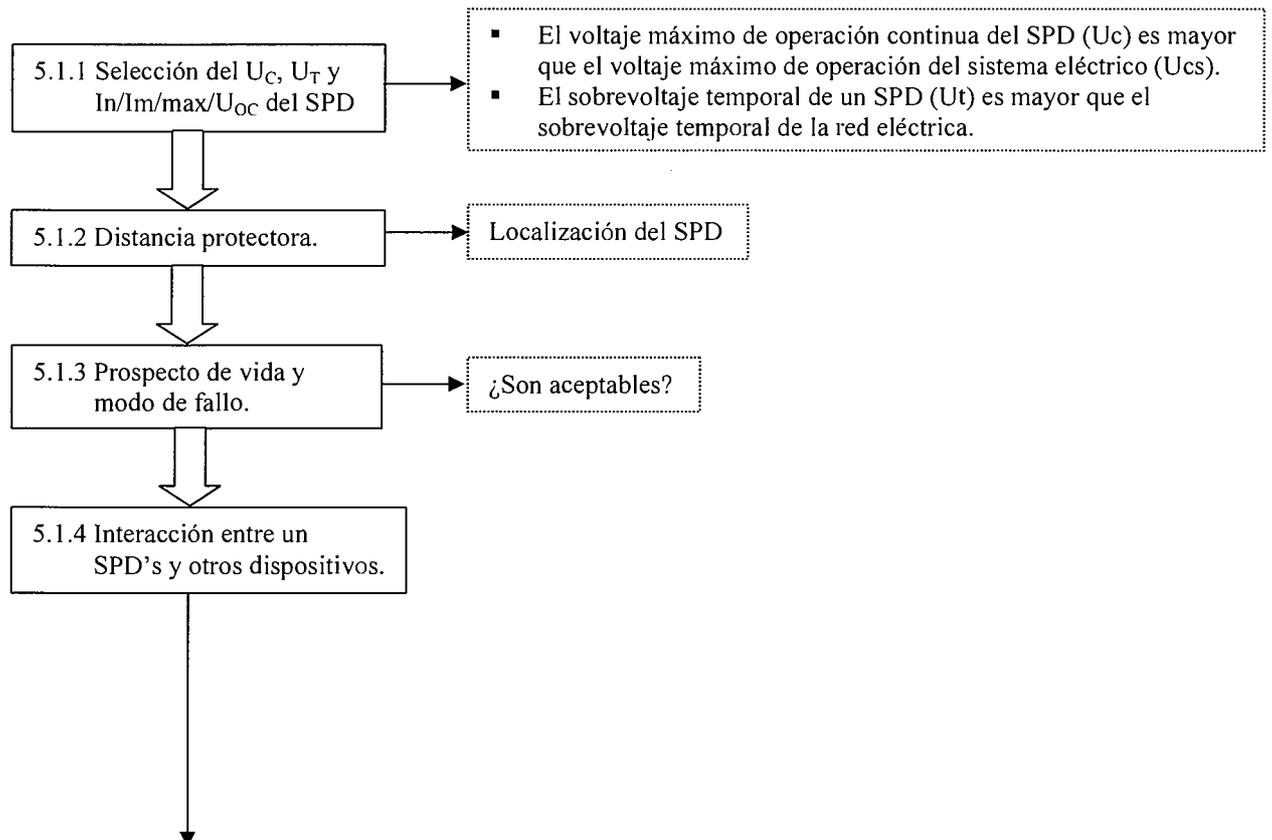
Fuente: Norma IEC 61643-12

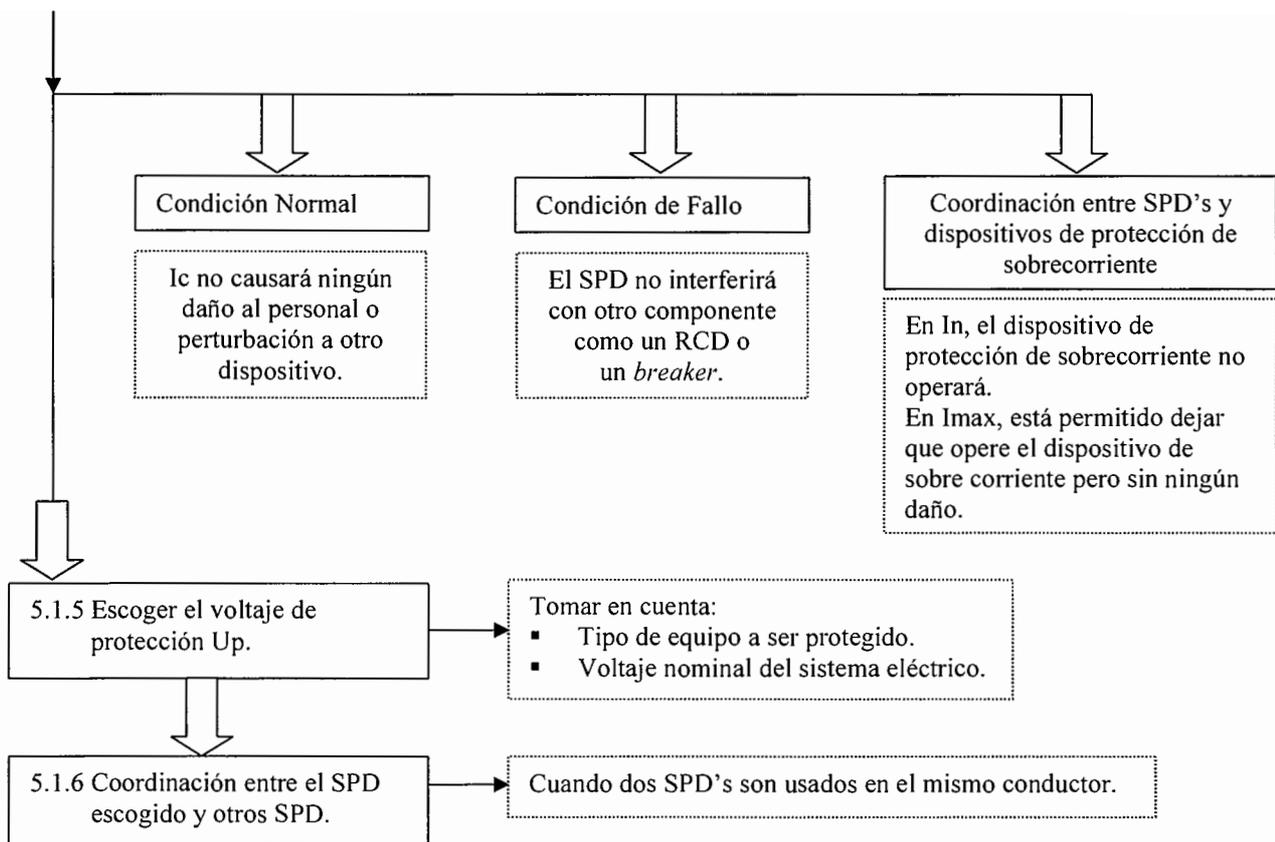
5. ¿CÓMO SELECCIONAR UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS MODULAR?

Para la selección del supresor, se debe tener un criterio de selección, conocer otros datos como la distancia protectora, el prospecto de vida y la interacción que tendrá con otros supresores en condiciones normales y en condiciones de falla.

5.1 Criterio de selección

Los supresores son seleccionados según el esquema siguiente en seis pasos dados en las cláusulas del 5.1.1 al 5.1.6.





5.1.1 Selección de U_c , de U_t y de $I_n/I_{imp}/I_{max}/U_{oc}$ del SPD

U_c y U_T deben cumplir con los siguientes requisitos:

- a) U_c , con excepción en el sistema IT, deberá ser más alto que el voltaje máximo continuo de operación U_{CS} ($= k \times U_0$) que puede aparecer en el sistema.

$$U_c > U_{CS}$$

La práctica conduce a los siguientes requisitos (puede verse también si se desea IEC 60364-5-534):

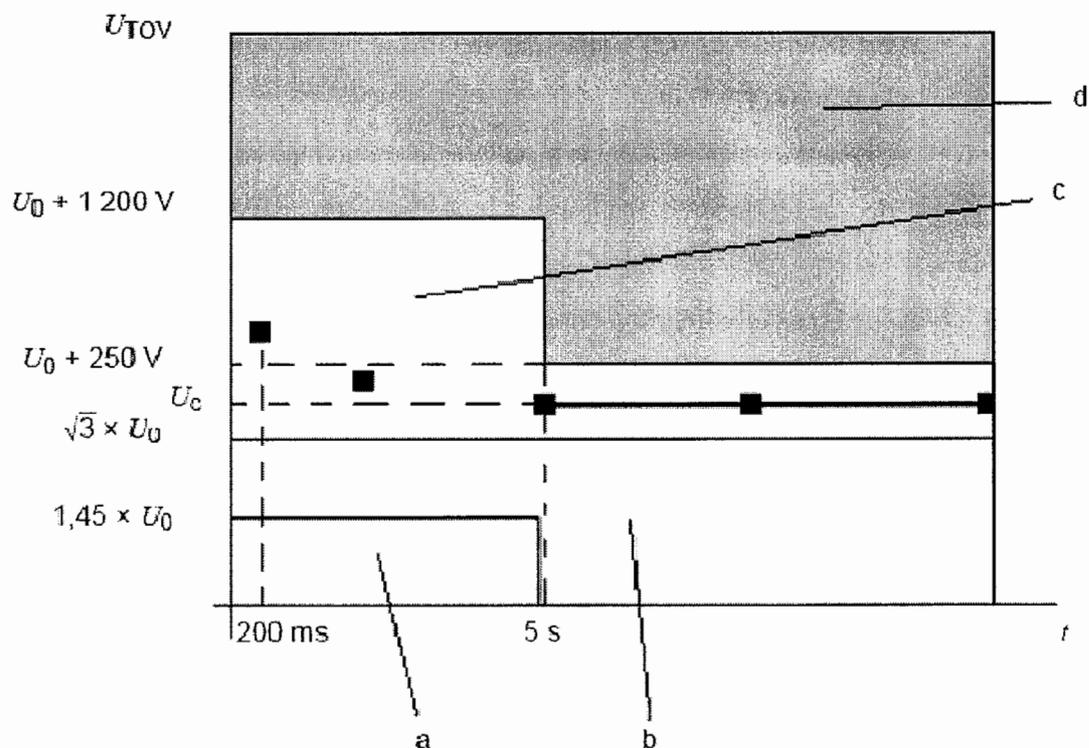
- En sistemas del TT según la figura 24, U_C debe ser por lo menos $(1.5 U_0)$.
 - En sistemas del TN y sistemas del TT según la figura 25, U_C será por lo menos $(1.1 U_0)$.
 - En sistemas IT, U_C deberá ser por lo menos tan alto como el voltaje de línea a línea U .
- Nota 1: U_0 es el voltaje de línea - neutro del sistema de la baja tensión.
 - Nota 2: En variaciones del sistema IT, valores más altos de U_C podrán ser necesarios.
- b) Los valores de U_T serán más altos que la sobretensión temporal (TOV) que se espera que ocurra en la instalación debido a las averías en el sistema de la baja tensión, según lo ilustrado en la figura número 17.

$$U_T > U_{TOV, LV}$$

- Nota 3: Un U_{TOV} con una duración mayor de cinco segundos se puede considerar como el máximo voltaje de operación continua (U_C). En el sistema IT, por ejemplo, el U_C de un SPD conectado entre la fase y la tierra será por lo menos igual al voltaje máximo entre fase y fase del sistema ($U_0 \times \sqrt{3}$) debido a las fallas a tierra que pueden ocurrir con una duración bastante larga, quizás algunas horas.

En algunos casos donde los TOV's tienen una magnitud demasiado alta, es bastante difícil encontrar un SPD que pueda proveer una protección bastante aceptable al equipo. Otra opción que se tiene es tener la posibilidad de desconectar el equipo durante períodos en los cuales no se esté usando para protegerlo.

Figura 17. U_T y U_{TOV}



Leyenda:

- Área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y neutro en sistemas del tipo TT, TN y IT, para una falla (corto circuito) en las instalaciones de bajo voltaje (LV).
 - Área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y la tierra en sistemas del tipo IT (para sistemas TT véase Nota 1), para una falla en las instalaciones de bajo voltaje -LV- (aterrizaje accidental de una fase) y el área de $U_{TOV, LV}$ entre la fase y el neutro en los sistemas del tipo TT y TN para una falla en las instalaciones de bajo voltaje -LV- (pérdida del neutral).
 - Valor máximo para $U_{TOV, HV}$ respecto a la localización del consumidor entre la fase y la tierra para sistemas del tipo TT y IT, en el caso de una falla que ocurre en sistemas de mediana tensión -HV-.
 - Área sin definir.
- = valores de U_T del SPD.

Fuente: Norma IEC 61643-12

- Nota 4: según lo demostrado en la figura 17, es posible elegir un SPD con las siguientes características:

$$U_T = U_C \geq U_{TOV, LV \max}$$

Este es el caso para los sistemas IT, en particular se tiene que: El escoger la capacidad de energía de un SPD (escoger ya sea I_{imp} , de I_{max} o de U_{0C} dependiendo de la clase de prueba) será basada en un análisis del riesgo, que compara la probabilidad de la ocurrencia de los transientes, el precio de los equipos a ser protegidos y el rango aceptable de falla, complementando con un análisis de coordinación cuando se piensa en más de un SPD.

5.1.2 Distancia protectora

Para determinar la localización del SPD (en la entrada, cerca del equipo, etc.) es necesario saber la distancia protectora, es decir la distancia aceptable entre el SPD y el equipo que se protegerá donde el SPD tiene una influencia protectora significativa.

Esta distancia depende de las características del SPD (U_p , etc.), la estructura del panel eléctrico, en las características del sistema (tipo y longitud de conductores, etc.) y en las características del equipo (si trae o no incluida una protección en contra de sobrevoltajes, etc.). Normalmente, todos los SPD traen un folleto que indicará la distancia a instalarse respecto a los equipos a protegerán, si no traen ninguna información, deberá respetarse las siguientes normas generales:

- **SPD Clase I o B (según IEC 61643-1:2005 y VDE 0675-6):** en la entrada de energía al inmueble, lo más cercano al breaker principal de la instalación.

- **SPD Clase II o C (según IEC 61643-1:2005 y VDE 0675-6):** lo más cercano posible a los paneles eléctricos de distribución de circuitos.
- **SPD Clase III o D (según IEC 61643-1:2005 y VDE 0675-6):** lo más cercano posible al equipo eléctrico o electrónico a proteger.

5.1.3 Prospecto de vida y modo de fallo

Dependiendo de los tipos de sobrevoltajes, sobrecorrientes y de su frecuencia de ocurrencia, la vida del SPD puede ser de largo o corto tiempo. Por ejemplo, si algunos segundos después de la instalación de un SPD que tiene una corriente máxima a derivar I_{\max} de 20 de kA 8/20 μ s, ocurre una sobrecorriente de rayo de 30 kA 8/20 μ s, es probable que el SPD sea destruido; su tiempo de vida será en este caso solamente de algunos segundos. Este caso extremo demuestra que cualquier prospecto de vida dado por el fabricante está basado en ciertas condiciones; si al instalarse el SPD estas condiciones no ocurren (es decir que se exija al SPD mucho más de la protección que puede brindar) éste puede durar mucho menos de lo esperado.

La única manera posible de calcular el tiempo de vida, es teniendo una idea de cuán a menudo ocurren sobrevoltajes en la instalación y viendo comparaciones en equipos anteriormente ya instalados.

Por ejemplo, si se tiene dos SPD, uno de 10 kA (I_{\max}) y otro de 20 kA (I_{\max}), ambos de 8/20 μ s, seguramente ambos serán destruidos si ocurre una descarga de 30 kA segundos después de haberse instalado. En condiciones generales, el tiempo de vida esperado de un SPD de 20 kA será mayor que el de uno de 10 kA.

Para resumir, es necesario elegir un SPD que:

- No envejece perceptiblemente bajo condiciones de prueba estandarizadas.
- Considera el U_{TOV} , esperando sobrevoltajes que aunque él por sí solo no pueda eliminar, si lo pueda hacer en coordinación con otros SPD.
- No causa un peligro tal como fuego, choque eléctrico o que explote cuando falla.

El modo de fallo por sí mismo es dependiente del tipo de sobrevoltajes. Como se ha visto, no es lo mismo un sobrevoltaje del tipo 10/50 μ s que uno del tipo 8/20 μ s. La coordinación ente SPD's es totalmente necesaria para tener una protección de reserva, esto si se desea evitar cualquier disturbio o interrupción del suministro del sistema eléctrico.

5.2 Interacción entre SPD's y otros dispositivos

A continuación se describe las condiciones normales y anormales en las cuales puede trabajar correctamente un SPD.

5.2.1 Condiciones normales

La corriente de funcionamiento continua (I_C) no causará ningún peligro de seguridad al personal (contacto indirecto, etc.) o disturbio a otro equipo (por ejemplo un RCD).

- Nota 1 - La I_C deberá ser menor a un tercio del valor de la corriente residual clasificada ($I_{\Delta n/3}$) en el caso de los RCD's. Los efectos acumulados de varios SPD's deberán ser tomados en cuenta.

- Nota 2 - Si el SPD está situado en el lado de la carga del RCD, fusible o interruptor termomagnético (*breaker*) no podrá proporcionar ninguna protección a ellos, deberá ser colocado antes.

5.2.2 Condiciones de falla

El SPD se puede instalar de tal manera que cuando falle no interrumpa el funcionamiento de otros dispositivos protectores, es decir, si se coloca en paralelo y no en serie. Con esto se tendrá que los demás dispositivos podrán seguir haciendo su función al circuito a proteger sin que sean sacados de línea.

5.2.3 Coordinación entre SPD's y RCD's u otros dispositivos de protección como fusibles o *breakers*

En la mayoría de ocasiones, las características de resistencia en contra de sobrevoltajes transitorios no vienen definidos para los dispositivos de protección en contra de sobrecorriente (fusibles y *breakers*) y en los dispositivos de protección en contra de corrientes residuales (RCD's -*residual current devices*-), a excepción del tipo S en los RCD, el cual según sus propios estándares (IEC 61008-1 y IEC 61009-1) deberán soportar hasta 3 kA 8/20 sin dispararse.

Al coordinar un SPD con un fusible, un *breaker* o un RCD, es recomendable que a la corriente nominal de descarga I_n , estos dispositivos de sobrecorrientes no operen, porque desconectarían (o sea que dejarían sin energía) al circuito eléctrico que están protegiendo. Sin embargo, a una corriente mayor que I_n , es normalmente aceptable para estos dispositivos el poder actuar. En el caso de un *breaker*, no debería ser dañado por el sobrevoltaje.

En este caso, debido al tiempo de respuesta de estos dispositivos de protección en contra de sobrecorrientes (que por cierto es muy lento), el sobrevoltaje completo fluirá a través del SPD aun cuando estos dispositivos operen. Así que se debe considerar un SPD que tenga suficiente energía para soportar todo el sobrevoltaje, porque como lo mencionamos anteriormente, el fusible, *breaker* o RCD quizás ni entren a funcionar.

La operación del RCD o de los fusibles y *breakers*, debido a este fenómeno no deberá considerarse como una falla del SPD. Hay que comprender que en algunos sobrevoltajes los dispositivos entrarán a funcionar y en otros no, dependiendo las características de cada uno de ellos.

- Nota 1: en situaciones con exposiciones a altas corrientes, como en el caso de impactos directos de rayo, la operación del RCD es aceptable abajo de I_n , si I_n está arriba de la resistencia del RCD usado en la instalación. En este caso, el escoger una corriente nominal de descarga es basado únicamente en la capacidad del transiente.
- Nota 2: si ocurre el voltaje de cebado del SPD, la calidad del servicio eléctrico puede ser afectada. En general, el que fluya una corriente causa la operación del RCD a menos que el SPD la absorba completamente. La coordinación entre el RCD aguas arriba con el SPD aguas abajo, es sumamente importante en estos casos.

5.2.4 Escoger el nivel de voltaje de protección U_p

La resistencia de transientes del equipo a ser protegido y el voltaje nominal del sistema deben ser considerados al escoger el voltaje de protección U_p del SPD. Mientras

más bajo sea este valor de U_p , mejor será la protección a brindar al equipo a proteger. Este valor será limitado por U_C y U_T .

- Nota 1: el nivel del voltaje de protección para los SPD's, está relacionado a un específico valor de I_{peak} para las pruebas de Clase I e I_n para las pruebas de Clase II. La selección del voltaje de protección para las pruebas de Clase III está definida por la prueba de la forma de onda U_{OC} .

Para la conmutación del voltaje de los SPD's simples o combinados, el voltaje de protección está también relacionado con el voltaje de cebado, como por ejemplo en el caso de un SPD que posea varistores y cápsulas de gas.

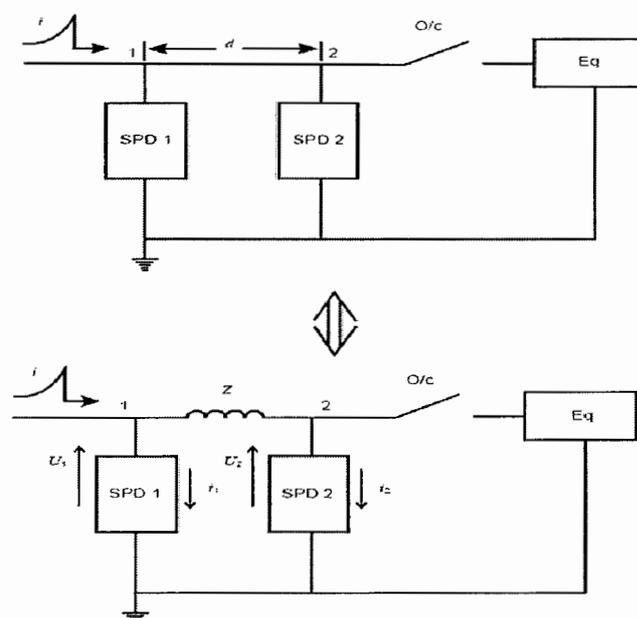
6. REGLAS Y PRINCIPIOS DE COORDINACIÓN

Aun cuando se haya escogido correctamente el supresor que protegerá al equipo eléctrico y al personal de la planta que lo usa, se debe coordinar correctamente el supresor con los otros elementos de protección de la planta, para que todos actúen de la manera correcta y en su debido tiempo, especialmente si se cuenta con más supresores dentro del inmueble.

6.1 Información general

Algunos usos pueden requerir la implementación de dos (o más) SPD's para reducir la tensión eléctrica en el equipo que se protegerá a un valor aceptable (nivel de la protección de una tensión más baja) y reducir la corriente transitoria dentro del equipo a proteger. La coordinación es totalmente necesaria si se desea que entre los dos SPD's puedan eliminar correctamente el sobrevoltaje, de lo contrario, uno de los dos será seriamente dañado, quizás hasta el punto de su destrucción. La figura 18 muestra un pequeño ejemplo.

Figura 18. Uso típico de dos SPD's



Leyenda:

eq. = equipo que se protegerá en operación normal.

o/c = circuito abierto (equipo desconectado de la fuente)

i = sobrevoltaje entrando.

Fuente: Norma IEC 61643-12

La impedancia Z entre los dos SPD's (normalmente una inductancia) puede ser física (un componente específico inserto en la línea para facilitar el compartir de la energía entre los dos SPD's) o representar la inductancia de cierta distancia entre los dos SPD's (en general consideramos $1 \mu\text{H/m}$). Cuando Z representa una impedancia física la inductancia de la línea puede ser despreciada debido a su valor bajo comparado a Z , entonces Z se representa de una manera esquemática como en la figura 18 para ambos casos.

- Nota 1: la figura 18 muestra el caso en donde el equipo a proteger está totalmente desconectado de la fuente de alimentación. Ninguna parte de la corriente entonces está atravesando al equipo y la tensión total es tomada por los dos SPD's. Otro caso podría ser si la falla se origina entre los terminales del último SPD y el equipo.
- Nota 2: para este ejemplo, no se toman en cuenta las uniones de los cables. En la práctica, estos influyen en la manera en que se comportan los SPD's ante el sobrevoltaje.

6.2 Problemas de coordinación

El problema de coordinación se puede resumir en un primer acercamiento a través de la siguiente pregunta: en el caso de un transiente entrante i , ¿qué parte de su sobrecorriente atravesará al SPD 1 y que parte al SPD 2?. Además, ¿serán capaces de soportar los dos SPD's estas sobretensiones?

Si la distancia entre los dos SPD's es corta en lo referente a la duración del transitorio, el efecto de la inductancia será insignificante y el SPD 2 puede ser sobrepasado de acuerdo a su capacidad.

Una buena coordinación es alcanzada seleccionando los SPD's que reducen el valor de i_2 a un nivel aceptable, considerando la impedancia entre los dos SPD's. Esta acción, por supuesto, también reducirá el voltaje residual del segundo SPD por abajo del valor deseado.

Esta coordinación es requerida para evitar:

- Un diseño sobredimensionado del SPD 2.
- Algunas perturbaciones EMC que podrían causar apuro en el edificio si i_2 fuera muy alta.

Sin embargo, tratar el tema de coordinación en términos de corrientes no es suficiente. Es necesario tratar de coordinar en términos de la energía.

Para estar seguros que los dos SPD's están bien coordinados es necesario llenar el siguiente requerimiento, llamado: Criterio de energía.

Se alcanza la coordinación de energía, si para todos los valores de sobrecorriente entre 0 y I_{\max} ($I_{\text{peak}1}$) la porción de energía disipada a través del SPD 2 es más baja o igual al máximo de energía soportada ($E_{\max2}$).

Según lo descrito anteriormente, la coordinación entre SPD's se hace para alcanzar el criterio de energía que se basa en la resistencia máxima de la energía del segundo SPD. No obstante, esta energía es a veces dependiente de la forma de onda y las

pruebas, según lo descrito en IEC 61643-1. Generalmente, se realizan con una sola forma de onda (8/20 μ s por ejemplo para la clase II prueba). Por esta razón, es mejor y más fácil obtener este valor E_{\max} directamente de el fabricante del SPD (la mayoría de las veces viene impresa en la información técnica del SPD).

Dos valores son necesarios para definir satisfactoriamente la resistencia a la energía de un SPD:

1. $E_{\max S}$ para las formas de onda de corta duración, como por ejemplo 8/20 μ s (la clase II prueba);
2. $E_{\max L}$ para las formas de onda de larga duración, como por ejemplo formas de onda de la prueba de la clase I (10/350 μ s).

Estos dos valores $E_{\max S}$ y $E_{\max L}$ pueden ser iguales para algunas tecnologías.

El SPD es entonces caracterizado por dos corrientes I_{\max} para las ondas cortas (como la utilizada para la prueba clase II) e I_{imp} para las ondas largas (según lo utilizado para la prueba clase I), asociado a la resistencia de energía $E_{\max S}$ y $E_{\max L}$. Un SPD simple se puede entonces probar según prueba de la clase I y prueba de la clase II.

Es necesario coordinar SPD 1 y 2 usando su resistencia máxima de energía E_{\max} para las formas de onda relevantes de un sobrevoltaje. Eso significa que es necesario tratar con dos casos:

1. Coordinación con formas de onda de larga duración.
2. Coordinación con formas de onda de corta duración.

En general, la coordinación es más fácil de alcanzar con formas de onda corta.

6.3 Caso simple de coordinación de dos varistores de ZNO

Las consideraciones siguientes se aplican solamente a SPD's de un puerto Clase 1 y 2, cuando la curva $U_{res}(I)$ es conocida. Estas curvas han sido medidas usando una forma de onda del tipo 8/20 y han sido dadas por el fabricante del SPD.

El ejemplo de abajo es para ayudar a entender el tema de coordinación. Trata en primer lugar del caso del SPD 1 y 2 fabricado con varistores de ZnO en donde un estudio analítico es posible. Debe de notarse que este estudio analítico está basado solamente en la corriente compartida. Para estar seguros que el criterio de energía sea cumplido también, se necesitan de otros cálculos adicionales, que en general son bastante complicados de hacer.

- a) Si los dos varistores tienen el mismo diámetro (y por consiguiente tengan la misma corriente de descarga nominal I_n y la misma energía de resistencia: El mismo I_{max} y la misma I_{imp}) pero diferentes niveles de voltajes de protección U_{p1} y U_{p2} , tenemos entonces las siguientes ecuaciones:

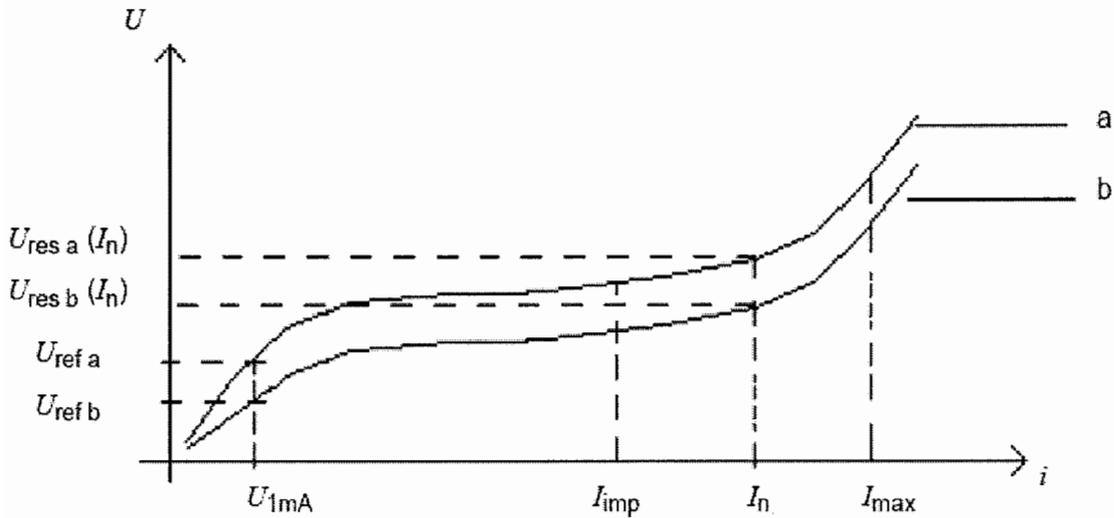
$$I_{n1} = I_{n2}$$

$$I_{max1} = I_{max2}$$

$$I_{imp1} = I_{imp2}$$

Entonces las posibles curvas $U_{res}(I)$ se ilustran en la figura 19.

Figura 19. Dos varistores de ZnO con la misma corriente de descarga nominal



Fuente: Norma IEC 61643-12

Si $U_{p1} > U_{p2}$: en este caso, la curva a) corresponde al SPD 1 y b) al SPD 2.

Esta coordinación será generalmente aceptable con formas de onda corta si $l > a$ unos pocos metros, (típicamente entre cinco y 10 metros).

Con formas de onda larga el efecto de desacoplo es reducido, por lo tanto, el SPD 2 quizás podrá resistir el transitorio total. El SPD 2 podrá resistir todo el transitorio también si tiene las mismas características técnicas que el SPD 1.

Si $U_{p1} < U_{p2}$: en este caso, la curva a corresponde al SPD 2 y b al SPD 1 y la mayoría de la corriente fluirá a través del SPD 1. En este caso la corriente que fluirá a través del segundo SPD será menos que la corriente total.

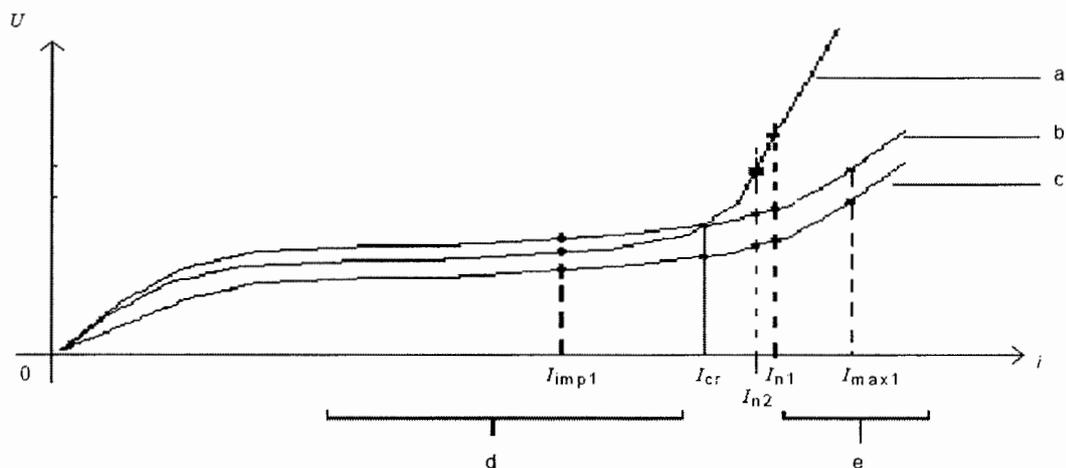
El criterio de la energía se satisface en ambos casos pues ambos SPD's tienen la misma capacidad de corriente.

Este primer caso fue discutido para explicar el mecanismo, pues hay poco que se ganará teniendo dos SPD's con la misma capacidad de resistencia de energía.

b) Si los dos varistores tienen diferente corriente nominal de descarga:

Para esta aplicación un caso práctico puede ser: $I_{n1} > I_{n2}$ y $E_{max1} > E_{max2}$. Además, el SPD 1 y el SPD 2 pueden tener características tales como $U_{res1}(I_{n1}) < U_{res2}(I_{n2})$. Esto se puede observar en la figura 20. No existe impedancia presente en esta figura debido a que no es fácil tomarla en cuenta en un estudio analítico. En este caso, puede verse en la figura 20 que en una forma de onda corta la coordinación será buena si la mayoría de la corriente atravesara a través del primer SPD. Pero con una forma de onda larga la coordinación será difícil de conseguir. La coordinación no podrá darse si se tiene el caso en una forma de onda larga y con una corriente entrante de magnitud más pequeña que la corriente en el punto de intersección de las dos curvas. Una gran parte de la corriente entrante atraviesa al SPD 2 pues la curva U_{res2} es más baja que U_{res1} a este nivel de la corriente. Una inductancia de desacoplo será completamente necesaria entre estos dos SPD's.

Figura 20. Dos varistores de ZnO con diferentes corrientes de descarga nominal



Leyenda:

- a) Curva correspondiente al SPD 2.
- b) Curva correspondiente al SPD1 (curva que cruza la curva del SPD 2).
- c) Curva conservadora correspondiente al SPD 1 (curva que no cruza la curva de SPD 2).
- d) Curva de sobrecorriente para formas de onda de larga duración.
- e) Curva de sobrecorriente para formas de onda de corta duración.

Por lo tanto, es necesario comparar las curvas U_{res} (i) con I de $0.1xI_{n2}$ hasta I_{MAX1} para verificar si se cruzan, en vez de simplemente comparar U_{res1} (I_{n1}) y U_{res2} (I_{n2}) (U_{p1} y U_{p2} respectivamente) los cuales son dados en la información técnica del fabricante. El valor de corriente en este punto de intersección I_{cr} (si existiera), necesita ser tan bajo como sea posible.

En este caso, el criterio de energía tiene una alta probabilidad de cumplirse, mientras más baja sea I_{cr} más alta será la probabilidad de cumplirse.

Si no es posible conseguir estas curvas debido a la falta de información, entonces es necesario comparar las curvas U_{res1} y U_{res2} en el mismo nivel. En tal caso, la condición para una coordinación fácil y buena es $U_{res1} (I_{n1}) < U_{res2} (I_{n2})$.

En cada caso en donde se tenga dos varistores de ZnO que necesiten ser coordinados, deberá seguirse el siguiente procedimiento que cuenta con cinco pasos:

1. Identifique los sobrevoltajes que puedan ocurrir en ausencia de cualquier tipo de SPD y hacer una distinción si son de formas onda corta o larga.
2. Escoja un SPD 1 para poder soportar esta sobretensión. Si no es posible conseguir la información del paso número uno, utilice un SPD suficientemente dimensionado, y obtenga del fabricante los valores I_{max} e I_{imp1} . Luego considere estos valores a lo largo de los datos conseguidos en el paso número uno.

3. SPD 2 debe ser entonces seleccionado de acuerdo a las características de protección deseadas.

4. Compare las curvas $U_{res} \cdot (I)$ con I desde $0.1 \cdot I_{n2}$ hasta I_{max1} . Luego, determine el punto de intersección I_{cr} . Si esta corriente I_{cr} es suficientemente baja (normalmente $0.1 \cdot I_{n2}$) entonces no es necesario calcular el valor de energía en el SPD 2. El criterio de energía será lleno sin importar la distancia entre los SPD's. Si hay alguna duda, calcule la energía que atraviesa el SPD 2 tomando en consideración la impedancia entre los SPD's y verificando el criterio de energía. Si tales curvas no están disponibles entonces escoja un SPD 2 con los siguientes requerimientos simplificados:
 - a. Si SPD 2 tiene la misma corriente de descarga nominal: $U_{res1} \cdot (I_n) < U_{res2} \cdot (I_n)$.
 - b. Si SPD 2 tiene una menor corriente de descarga nominal: $U_{res1} \cdot (I_n) < U_{res2} \cdot (I_{n2})$.

Es siempre conveniente calcular la energía en el SPD 2 para verificar el criterio de energía y verificar que ese nivel de protección es todavía obtenido.

5. Repetir el paso tres hasta que dé resultados satisfactorios.
 - Nota 1: el valor del voltaje en cada corriente pequeña (generalmente llamado voltaje de referencia) no es aplicable para la coordinación.
 - Nota 2: en cualquier caso (con o sin varistores de ZnO) EMC (la compatibilidad electromagnética) requiere consideraciones de tal manera que la corriente que atraviese el SPD 2 sea tan pequeña como sea posible.

- Nota 3: la curva $U_{res}-(I)$ son valores máximos. Es necesario tomar en consideración la variación de las características debido a las tolerancias del fabricante.

6.4 Caso simple de coordinación entre un SPD basado en una cápsula y un SPD vasado en un varistor ZnO

6.4.1 Generales

Otro caso comúnmente usado es el de una cápsula como SPD 1 y un varistor de ZnO como SPD 2. Vea la figura 21. En este caso la coordinación es alcanzada cuando ocurre un cebado de la cápsula antes de que se sobrepase la capacidad del SPD 2.

Antes del cebado de la cápsula, tenemos:

$$U_1 = U_{res2}(i) + L \cdot di/dt$$

Como este valor $U_{res2}(i)$ no se conoce normalmente, se utiliza la siguiente fórmula que da un resultado aproximado:

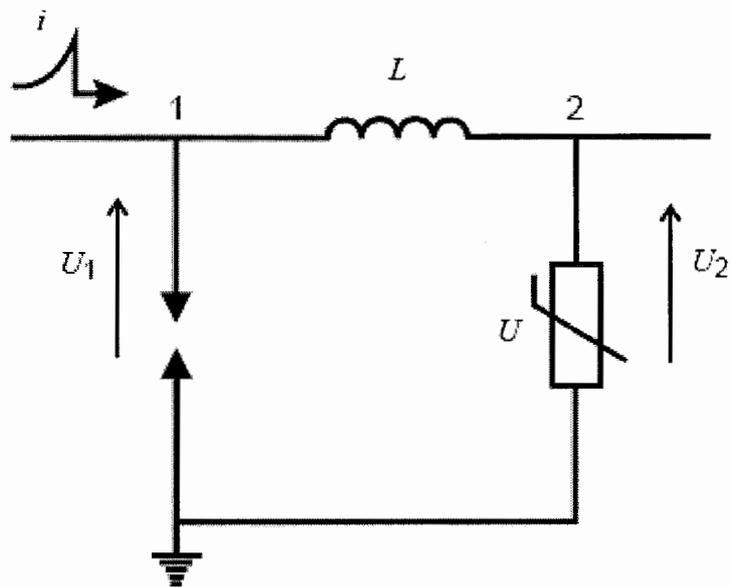
$$U_1 = U_{ref2}(i) + L \cdot di/dt$$

Donde U_{ref2} es el voltaje de referencia del varistor ZnO número dos. Este voltaje de referencia es un parámetro característico del varistor, el cual es bastante cercano al punto más alto de la curva característica U respecto de i .

Tan pronto como U_1 exceda el voltaje dinámico de cebado de la cápsula (U_{dyn}) se alcanza la coordinación y tan solo una pequeña parte de la corriente fluye a través del SPD 2. Todo esto depende de las características del varistor de ZnO (SPD 2), el voltaje

dinámico de cebado de la cápsula (el SPD 1), de la magnitud y forma de onda del transitorio (i), y de la distancia de separación d entre los SPD's.

Figura 21. Coordinación entre una cápsula y un varistor de ZnO



Leyenda:

L = Inductancia

Fuente: Norma IEC 61643-12

6.4.2 Ejemplo del cálculo de los valores estimados requeridos para una inductancia de desacoplo entre una cápsula y un varistor

La limitación de espacio, por ejemplo dentro de una estación moderna de control de señal para celulares, es tal que aguas abajo los SPD's basados en varistor de óxido metálico (MOV- *Metal Oxide Varistor*) pueden limitar transientes a un voltaje bien bajo respecto al voltaje de encendido de un SPD basado en cápsulas instalado aguas arriba. Esto prevendrá la operación de la cápsula y permitirá que toda la energía entrante sea

absorbida por el SPD basado en varistores de óxido metálico. En un gran espacio, la distancia del cableado entre los SPD's será tan larga, que podrá proveer la suficiente inductancia para encender la operación de la cápsula.

Siempre existirá la posibilidad de que el transiente entrante sea disperso a través de las rutas paralelas, de tal manera que no exista un voltaje adecuado que encienda la cápsula (como en el caso descrito arriba, en el cual hay muy poca distancia entre el SPD instalado aguas arriba y el instalado aguas abajo). En este caso, el SPD aguas abajo deberá tener suficiente capacidad por sí mismo para absorber la energía total del transiente.

En los niveles más altos de energía, el que no entre a funcionar la cápsula dará como resultado que el exceso de energía alcance el SPD aguas abajo y cause su destrucción.

La coordinación se logra asegurando de que haya suficiente impedancia de desacoplo en serie para garantizar la operación de la cápsula de gas en todos los niveles de energía por encima del límite del SPD instalado aguas abajo.

El valor de la inductancia requerido para asegurar coordinación puede ser calculada de una manera sencilla. En primer lugar, los parámetros de la cápsula deben ser conocidos. Normalmente, las cápsulas son encendidas por debajo de los 4 KV y en un lapso de 200 ns (nanosegundos). En segundo lugar, los parámetros del SPD instalado aguas abajo deben ser conocidos. Un SPD de 275 VAC empezaría limitando en aproximadamente los 430 V. También deberían tener una $I_n = 5$ KA, basándonos en pruebas estandarizadas para la clase 2 usando de 8 μ s a 20 μ s.

Sin embargo, se debe de recordar que la cápsula es clasificada para pruebas de clase 1 asumiendo un impulso de 10 μ s a 350 μ s, o un impulso de similares magnitudes.

El SPD instalado aguas abajo debe ser capaz para absorber la energía adicional en este tipo de impulso. El factor de reducción (o factor de la derivada) es normalmente de 4:1. Por lo tanto, el pico de corriente es reducido de 5 kA a 1.25 kA. 10 μ s produce un di/dt de 125 A/ μ s.

La inductancia requerida para asegurar la operación confiable de la cápsula se puede calcular de la ecuación:

$$U = L \times di/dt + I \times R$$

Donde: V = voltaje de cebado de la cápsula.
 di/dt = factor de la derivada de la corriente respecto al tiempo.
 $I.R$ = caída de voltaje a través del SPD aguas abajo (note que R es un valor no lineal).

En el caso:

$$L = \frac{U - I \times R}{di/dt}$$

Asumiendo que la cápsula será encendida dentro de los 200 ns, la corriente que fluirá dentro del SPD aguas abajo será:

$$I = 0.2/10 \times 1250 \text{ A} = 25 \text{ A}$$

El voltaje $I \times R$ estaría en la orden de 600 V, por lo tanto:

$$L = \frac{4000 - 600}{125 \times 10^{-6}}$$

$$L = 27,2 \mu\text{H}$$

Este valor de inductancia puede ser asociado a un cable de 27.2 metros de longitud si se asume una inductancia de 1 μH por metro para este cable, o puede ser una combinación de un cable de menor longitud más una inductancia de un valor complementario.

Cuando se ha elegido un SPD basado en una cápsula para ser el SPD 1, es necesario seleccionar un SPD 2 que cumpla con los siguientes requisitos:

- a) Para un transiente entrante correspondiente a una forma de onda de prueba Clase I:

$$U_{\text{dyn}} < U_{\text{ref2}} + L \times I_{\text{peak2}}/10$$

- b) Para un transiente entrante correspondiente a una forma de onda de prueba Clase II:

$$U_{\text{dyn}} < U_{\text{ref2}} + L \times I_{\text{max2}}/8$$

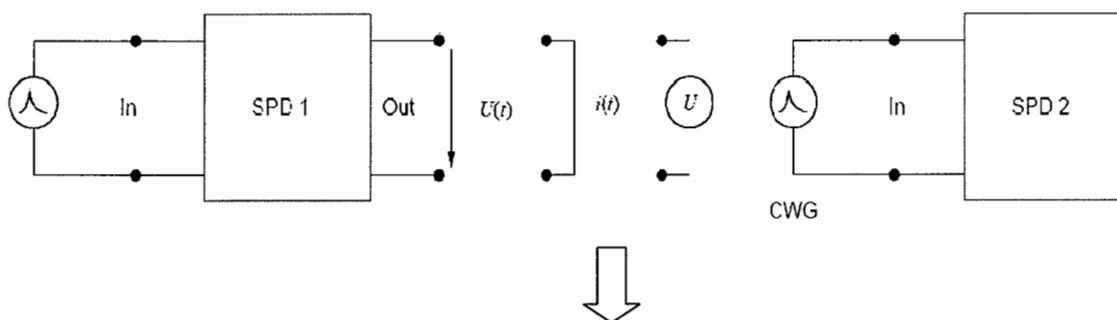
Estas reglas dan resultados muy aproximados. Cuando se tiene inevitablemente un valor de L muy pequeño, entonces se necesitará de una simulación a través de una computadora para verificar si se alcanza la coordinación.

6.5 Coordinación a través del método de energía (*LTE Let-through Energy Method*)

6.5.1 General

La coordinación con parámetros estándares de impulso (tal y como se describe también en la norma IEC 61312-4) es un procedimiento para seleccionar y para coordinar SPD's. La ventaja principal de este método es la posibilidad de considerar un SPD como una caja negra (véase la figura 22). Aquí, para un transiente dado en el puerto de entrada no solamente el voltaje del circuito abierto, sino también una corriente de salida (por ejemplo en un cortocircuito) se puede determinar a través de este método. Estas características de salida se convierten en un equivalente (voltaje del circuito abierto 1.2/50 μ s, corriente del cortocircuito 8/20 μ s). La ventaja es que no hay necesidad del conocimiento especial del diseño interno de los SPD's.

Figura 22. *LTE* - Método de coordinación con parámetros estándares de impulso



Conversión en un impulso estándar comparable – 1.2/50 μ s, 8/20 μ s con $Z_i = 2 \Omega$

$$U_{oc} \text{ SPD1/out} \leq U_{oc} \text{ SPD2/in}$$

Leyenda:

U = voltaje de la carga

Fuente: Norma IEC 61643-12

El intento de este método de coordinación es hacer los valores de entrada del SPD 2 (por ejemplo una corriente de descarga) comparable a los valores de la salida de un SPD 1 (por ejemplo, el nivel de protección del voltaje).

Con la protección caminada, debe ser considerado que el impulso híbrido equivalente de entrada, el cual puede ser descargado por el siguiente SPD (sin que sufra daño) es igual o mayor a el impulso híbrido equivalente de la salida del SPD precedente.

Para una coordinación confiable, el impulso híbrido equivalente se debe determinar para el peor caso de impacto (I_{\max} , U_{\max}).

El caso peor para el diseño del elemento de desacoplo es dado por un cortocircuito. Pero para propósitos de coordinación esto es demasiado impactante. Es más realista incluir un "voltaje del lado de la carga" (llamado de aquí en adelante "voltaje contrario").

El SPD aguas abajo de una cápsula de chispas consiste normalmente de un varistor de ZnO. El voltaje residual de tal SPD es en cualquier caso más alto que el valor máximo del voltaje nominal de la fuente de alimentación (por ejemplo en un sistema A.C. con un voltaje nominal de 240 V el voltaje máximo es $\sqrt{2} \times 240 = 340$ V, el cual está debajo del voltaje de referencia de los SPD's instalados). Este voltaje nominal máximo de la fuente de alimentación corresponde al voltaje residual más bajo posible de los SPD's. Por lo tanto, este voltaje máximo se puede tomar como el voltaje contrario posible mínimo.

Usando la corriente en un cortocircuito en vez de si se asume que un voltaje contrario daría lugar a un sobre-dimensionamiento del elemento de desacoplo.

- Nota 1: este método proporciona buenos resultados cuando las características del SPD 1 son muy diferentes a las del SPD 2 que las condiciones del transiente en el SPD 2, por ejemplo en el caso de coordinación entre un cápsula de chispas y un varistor de óxido metálico.

- Nota 2: Las restricciones en el uso de este método son:
 1. Para obtener resultados conservadores, el elemento de desacoplo debe ser incluido en el método como parte del segundo SPD.
 2. Para asegurarnos de obtener resultados conservadores, el "voltaje contrario" propuesto deberá ser igual a cero "0" cuando el SPD 2 contiene un componente de switcheo o conmutación.
 3. Cuando el SPD 2 contiene un componente de conmutación hay una posibilidad que el resultado está debajo de lo estimado, debido a este método no es verdaderamente realista al modelar un componente de este tipo. Si existe un componente de computación, el método debe ser utilizado con cuidado y verificando muy bien los resultados.
 4. La forma de onda del transiente inyectado en la entrada de una instalación deberá ser considerado como uno que tenga una forma de corriente y una forma de voltaje que sean iguales (10/350 μ s o 8/20 μ s). La magnitud de la sobrecorriente i es normalmente conocida. La magnitud del sobrevoltaje U depende de la impedancia del sistema.
 5. El análisis deberá tomar en cuenta las tolerancias en las características de los SPD.

6.5.2 El método

El método descrito a continuación generalmente da un valor conservador para el elemento de desacoplo (impedancia) entre los dos SPD's. Esto significa que, si tal impedancia es instalada entre los dos SPD's, la coordinación generalmente actuará mejor que lo predicho por el cálculo.

La base de este método es representar la salida de cada SPD como generador combinado de onda equivalente (*CWG – combination wave generator*), definida por un voltaje de carga U_{oc} 1.2/50 μs y una corriente de cortocircuito I_{sc} 8/20 μs , la impedancia del generador siendo 2Ω ($U_{oc} = 2 \times I_{sc}$).

Los SPD's probados de acuerdo con la Clase III son ya probados como un CWG. En el caso de los SPD's probados según la Clase II es necesario considerar que $I_{sc} = I_{max}$.

El SPD en el frente se puede ser probado de acuerdo a la Clase I en el caso de un impacto de rayo directo sobre la estructura o de acuerdo a la prueba de Clase II.

El voltaje en la salida de cada SPD tendrá en general una forma de onda que no esté directamente conectada con las formas de onda 1.2/50 μs y 8/20 μs . Es entonces necesario normalizar las formas de onda para convertirlas en una forma de onda del tipo 1.2/50 μs y 8/20 μs .

Esto se realiza calculando los valores siguientes:

$$\text{Valor de cresta de } u = \hat{u}, \int u \, dt \text{ and } \int u^2 \, dt$$

$$\text{Valor de cresta de } i = \hat{i}, \int i \, dt \text{ and } \int i^2 \, dt$$

Estos valores entonces se utilizan en la siguiente tabla:

Tabla IV. Ecuaciones de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía *LTE*

Voltaje	\hat{u}	$\int u dt$	$\sqrt{\int u^2 dt}$
Corriente	\hat{i}	$\int i dt$	$\sqrt{\int i^2 dt}$

Fuente: Norma IEC 61643-12

La misma tabla para un *CWG* con una amplitud de 1 V es:

Tabla V. Valores de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía *LTE*

Voltaje	1	70×10^{-6}	6×10^{-3}
Corriente	0.5	12×10^{-6}	2×10^{-3}

Fuente: Norma IEC 61643-12

Entonces, dividiendo cada celda de la tabla IV entre la celda equivalente de la tabla V, se obtiene una nueva tabla:

Tabla VI. Ecuaciones con valores incluidos de voltaje y corriente para la coordinación de SPD's a través del método de energía LTE

Voltaje	\hat{u}	$\int u dt / (70 \times 10^{-6})$	$\sqrt{\int u^2 dt / (6 \times 10^{-3})}$
Corriente	$\hat{i} \times 2$	$\int i dt / (12 \times 10^{-6})$	$\sqrt{\int i^2 dt / (2 \times 10^{-3})}$

Fuente: Norma IEC 61643-12

El valor máximo en esta tabla VI, da el valor $U_{oc (CWG)}$, el valor equivalente de U_{oc} de *CWG* correspondiendo a la salida del SPD. Tan pronto como el SPD aguas abajo haya sido probado de acuerdo con la prueba de Clase III con un *CWG* teniendo un voltaje de carga $U_{oc \text{ test}}$ (o un equivalente *CWG* en el caso de las pruebas de la Clase II) es posible decir inmediatamente si la coordinación es satisfactoria. Es suficiente verificando o comprobando que:

$$U_{oc \text{ test}} > U_{oc (CWG)}$$

El valor en la salida del SPD, para una sobretensión dada en la entrada, tiene que ser calculado usando un programa de simulación. No necesita ser calculado cada vez tal y como puede ser calculado por el fabricante. Para cada producto, el fabricante puede calcular el impulso equivalente en la salida *CWG* para una sobretensión dada (I_{imp} para las pruebas de Clase I o I_{max} para las pruebas de clase II o $U_{oc \text{ max}}$ del *CWG* para las pruebas de la clase III) tomando en cuenta las tolerancias en las características del SPD y cualquier punto oculto (algunas veces los más importantes sobrevoltajes en la salida de un SPD no son dados por los valores máximos de I_{imp} , I_{max} y $U_{oc \text{ max}}$ sino por los valores más bajos).

7. APLICACIONES DE LOS SUPRESORES DE TRANSITORIOS MODULARES

Los supresores de transitorios modulares tienen una amplia gama de aplicación dentro de todo el mercado eléctrico, que van desde aplicaciones domiciliarias hasta aplicaciones industriales. Los eventos que producen las perturbaciones transitorias (los rayos, las conmutaciones en sistemas eléctricos de potencia, etc.) son de índole mundial. En los últimos años la aplicación también se ha volcado hacia el mercado de la electrónica y las telecomunicaciones, debido a lo sensible que suelen ser estos equipos a las perturbaciones.

7.1 Posibles modos de protección e instalación

De la Figura 23 a la figura 27 muestro las instalaciones típicas de SPD's para diversos tipos de aterrizaje. Lo mejor siempre será utilizar opciones que den como resultado un nivel bajo en el valor de U_p así como evitar los impactos directos en las instalaciones. Se debe también mantener lo más cerca que sea posible el punto de conexión de tierra de los SPD's y la barra de tierra física.

Una instalación se considera aceptable si se siguen los siguientes cinco pasos:

- Nota 1: los pasos siguientes son válidos para los SPD's conectados entre línea-neutro o línea-tierra. Para otro tipo de SPD's seguramente se necesitará otro tipo de reglas.
- 1) Determine la trayectoria de la corriente a derivar.
 - 2) Identifique los cables que causan una caída de voltaje adicional en las terminales del equipo (figuras 28a y 28b).

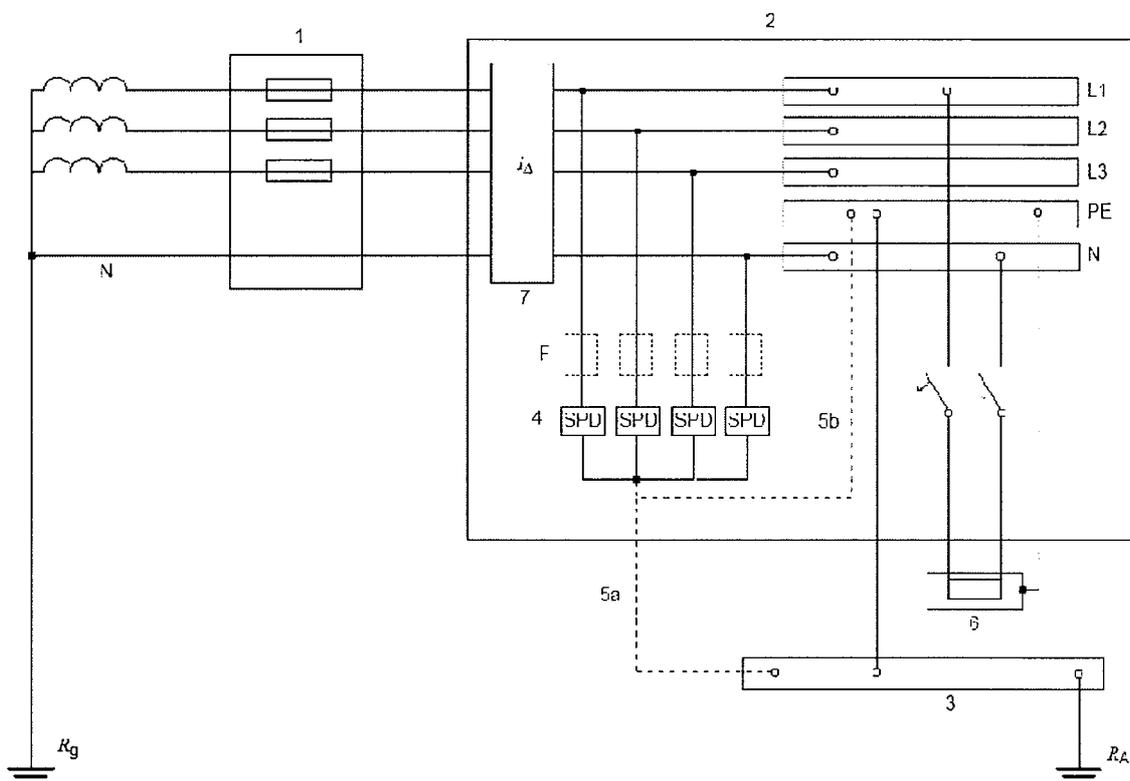
- Nota 2: en la figura 28, U_{res} es el voltaje residual para los SPD's probados según Clase I y II o más generalmente llamado voltaje de limitación.
- 3) Arregle la ruta de los conductores de alimentación del equipo para evitar lazos innecesarios de inducción, vea figura 28c, 28d y la figura 29.
 - Nota 3: si no es posible tener un solo punto de aterrizaje, entonces será necesario tener dos SPD's, tal y como muestra la figura 28d.
 - 4) Establezca el lazo equipotencial entre el equipo y el o los SPD's.
 - 5) Seleccione el SPD de acuerdo con los requisitos de coordinación.

Los resultados deben llevarse hasta el límite del desacoplo inductivo entre las partes protegidas y las no protegidas de la instalación. La inductancia mutua puede ser reducida separando la fuente inductora y los circuitos afectados, limitando las áreas de inducción y seleccionando mejores ángulos para las vueltas (ver figura 29).

En términos generales, es mejor separar los cables protegidos de los que no lo están. Se deben tomar medidas para evitar la inducción debido al cruce de cables de poder con cables de señal (ver figura 29 b).

Ver la figura 29 que nos muestra algunos ejemplos de la instalación correcta de los SPD's.

**Figura 24. Instalación de supresores de transitorios en sistemas TT
(SPD's aguas debajo de un RCD)**

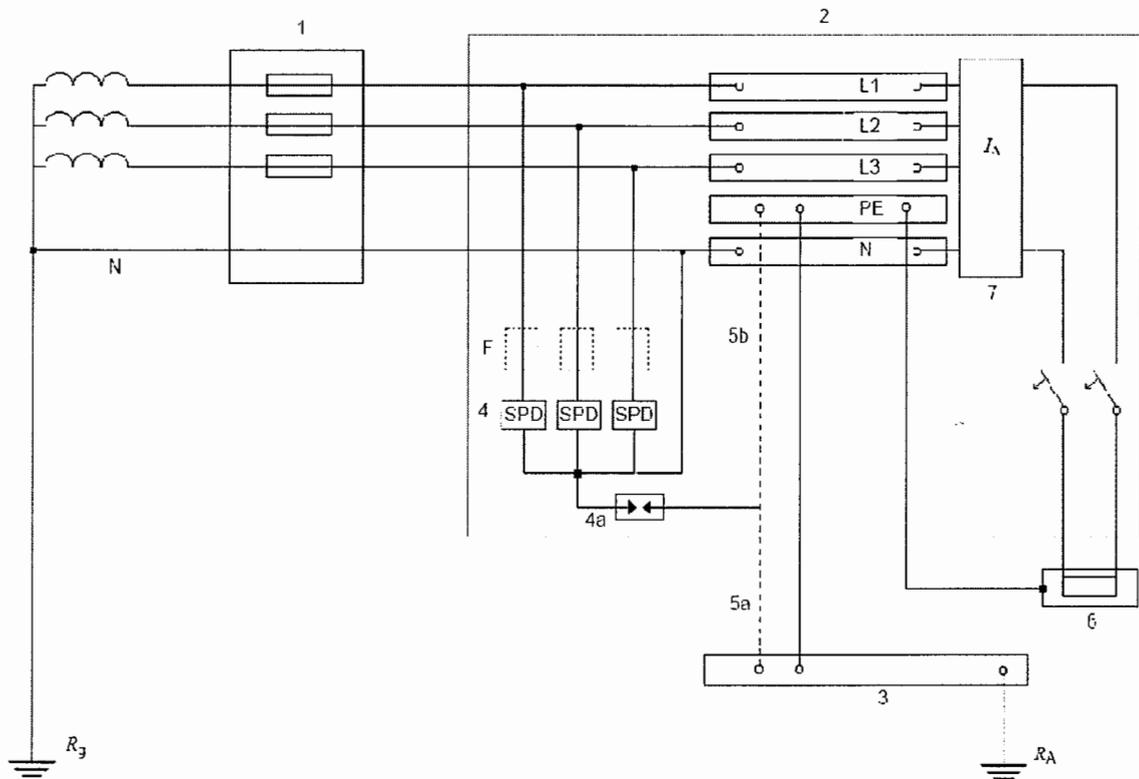


Legenda:

1. Inicio de la instalación.
2. Tablero de distribución.
3. Barra principal de tierra.
4. Supresores de transientes.
5. Aterrizaje de los supresores, tanto 5a ó 5b.
6. Equipo a proteger.
7. Dispositivo protector de corriente residual.
- F Dispositivos de protección indicados por el fabricante del supresor (por ejemplo, fusibles, *breakers*, RCD).
- R_A Electrodo del sistema de puesta a tierra de la instalación.
- R_g Electrodo del sistema de puesta a tierra del sistema eléctrico que provee energía.

Fuente: Norma IEC 61643-12

**Figura 25. Instalación de supresores de transitorios en sistemas TT
(SPD's aguas arriba de un RCD)**

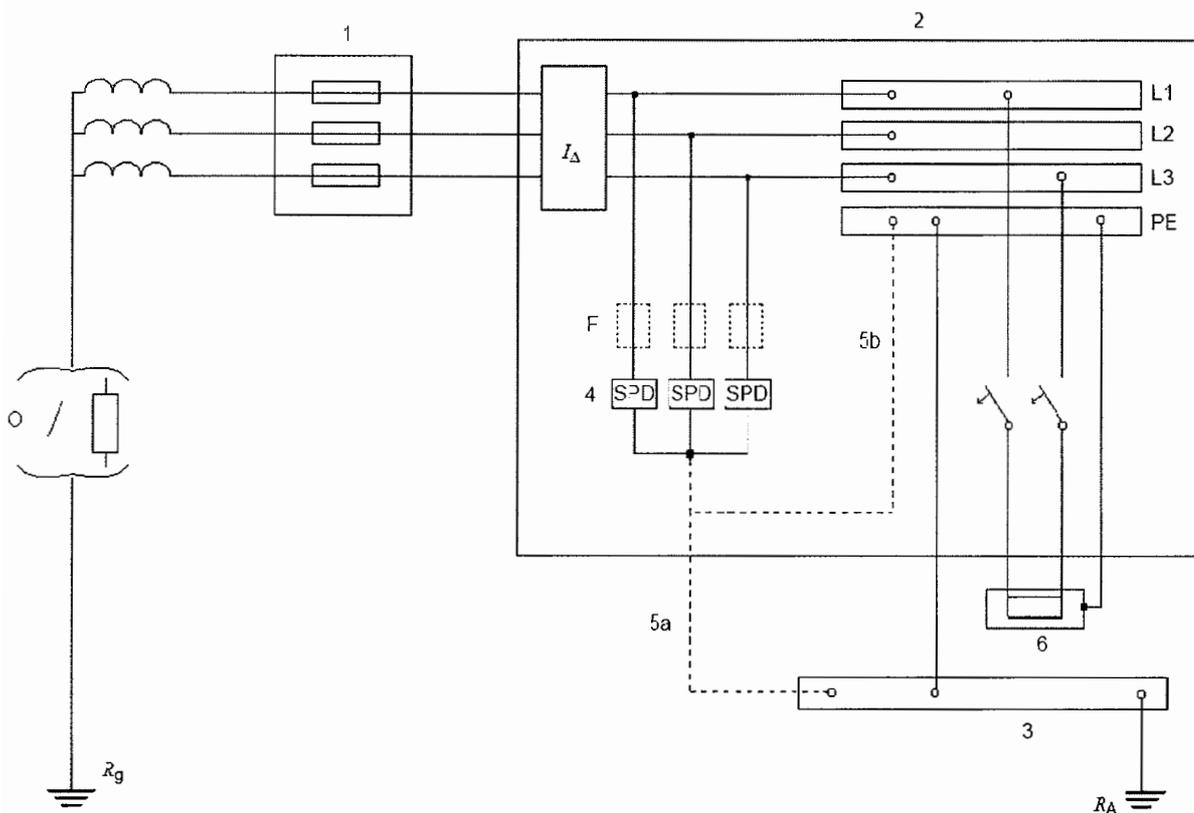


Leyenda:

1. Inicio de la instalación.
2. Tablero de distribución.
3. Barra principal de tierra.
4. Supresores de transientes.
- 4a. Supresores de transientes de acuerdo a IEC 60364-5-534 ó cápsulas de gas.
5. Aterrizaje de los supresores, tanto 5a ó 5b.
6. Equipo a proteger.
7. Dispositivo protector de corriente residual.
- F Dispositivos de protección indicados por el fabricante del supresor (por ejemplo, fusibles, *breakers*, RCD).
- R_A Electrodo del sistema de puesta a tierra de la instalación.
- R_g Electrodo del sistema de puesta a tierra del sistema eléctrico que provee energía.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Figura 26. Instalación de supresores de transitorios en sistemas IT sin neutro distribuido

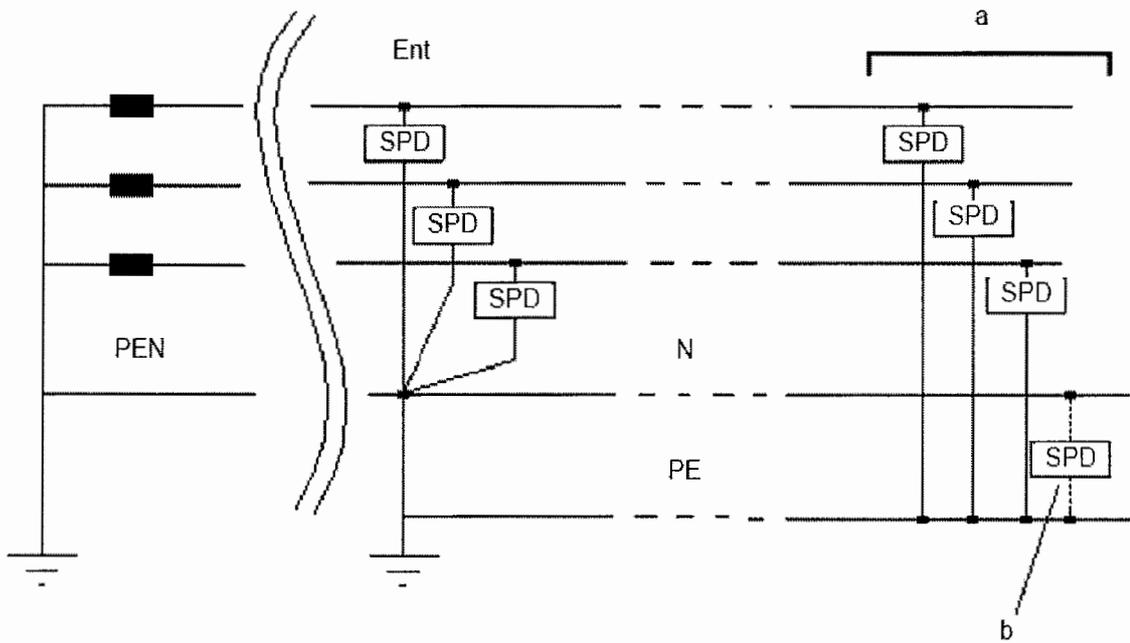


Leyenda:

1. Inicio de la instalación.
 2. Tablero de distribución.
 3. Barra principal de tierra.
 4. Supresores de transientes.
 5. Aterrizaje de los supresores, tanto 5a ó 5b.
 6. Equipo a proteger.
 7. Dispositivo protector de corriente residual.
- F Dispositivos de protección indicados por el fabricante del supresor (por ejemplo, fusibles, *breakers*, RCD).
- R_A Electrodo del sistema de puesta a tierra de la instalación.
- R_g Electrodo del sistema de puesta a tierra del sistema eléctrico que provee energía.
- O Circuito abierto.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Figura 27. Instalación típica de supresores de transitorios en la entrada en el caso de que tengamos un sistema TN C-S



Leyenda:

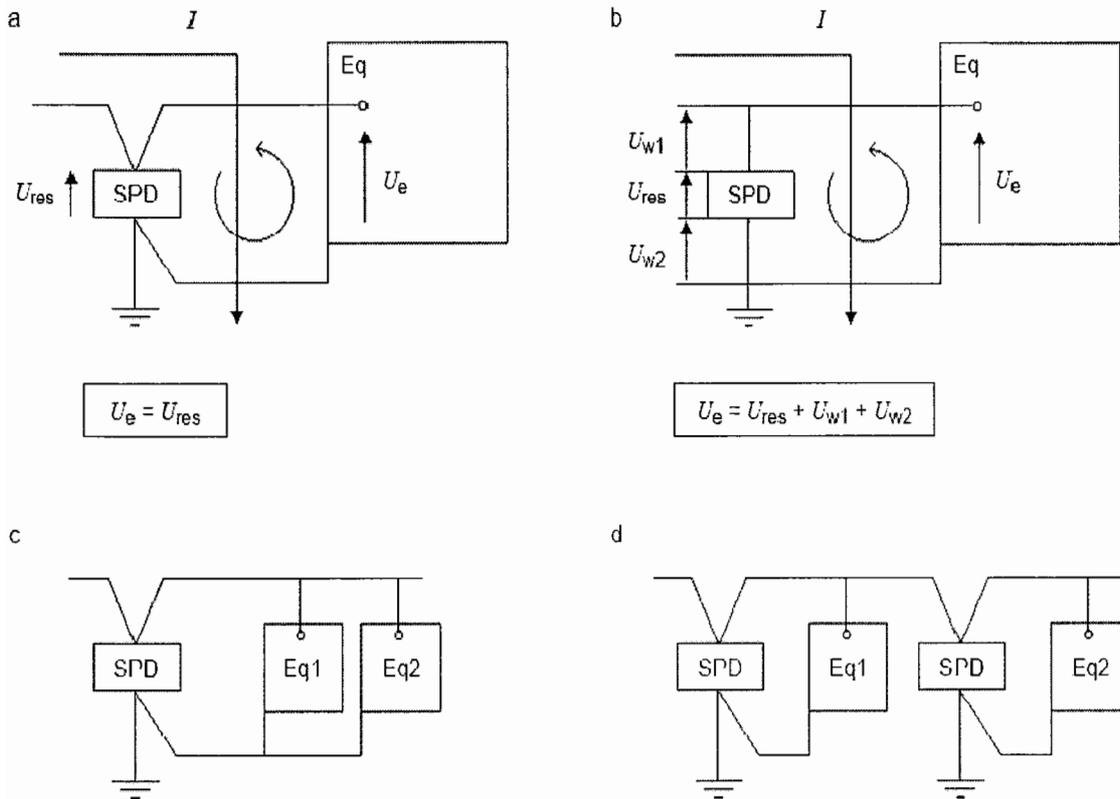
Ent = La entrada de energía al inmueble.

a = SPD's adicionales internos instalados si fuese necesario.

b = Este SPD puede ser requerido para evitar que el potencial del neutro se eleve.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Figura 28. Forma general de instalar un supresor de transientes de un puerto



Leyenda:

eq = equipo

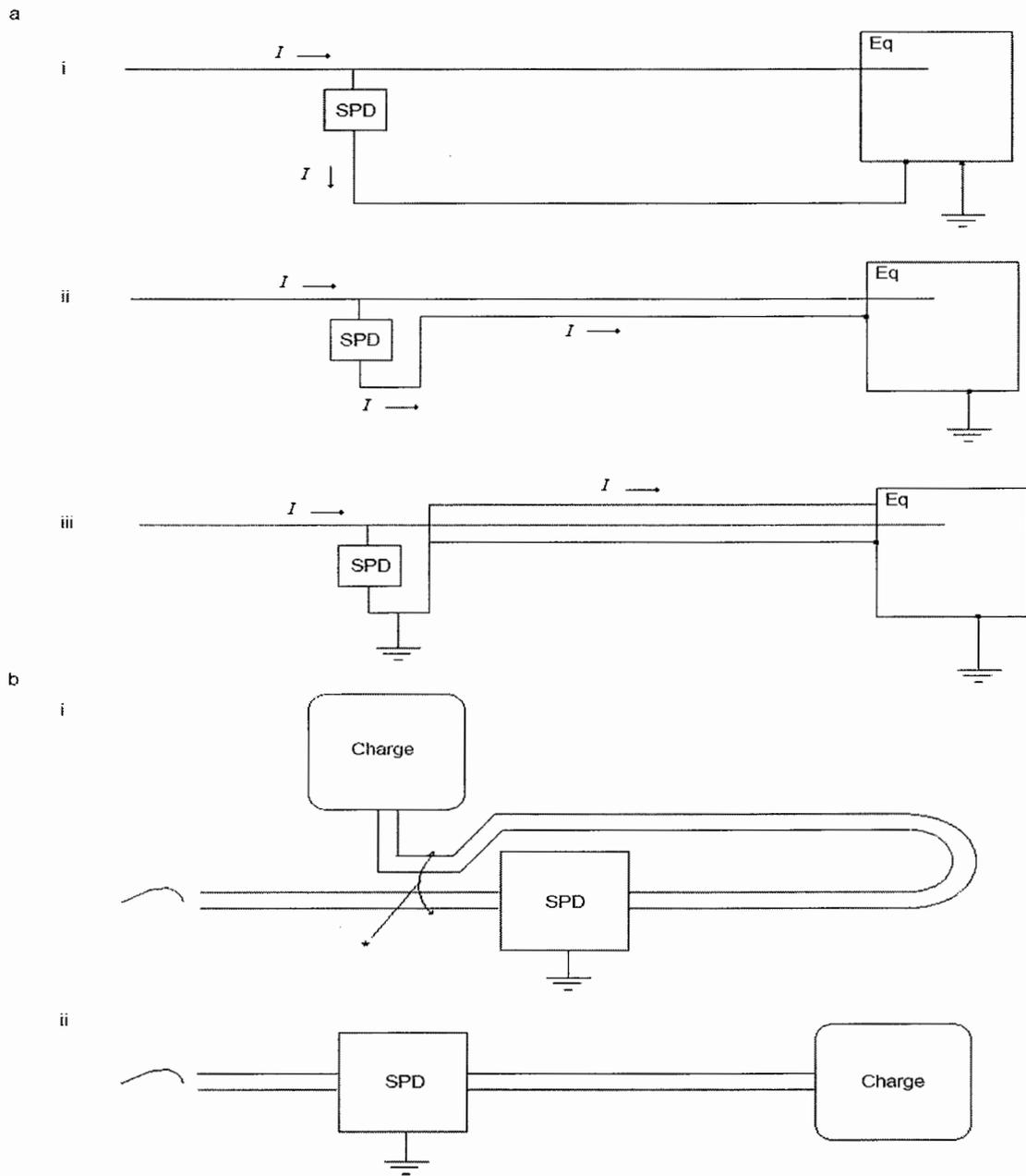
Configuraciones a) c) y d) son aceptables.

La configuración b) es aceptable si son U_{w1} y U_{w2} son lo suficientemente bajos.

Fuente: Norma IEC 61643-12

- Nota: la corriente I fluyendo a través del SPD y el campo magnético resultante debido al flujo de esta corriente entran a un circuito cerrado formado por el SPD y las terminales del equipo a proteger. Esto tiene el efecto de añadir un voltaje inducido al voltaje residual de los SPD's. El voltaje combinado aparecerá en las terminales del equipo.

Figura 29. Ejemplos de instalaciones aceptables e inaceptables de un SPD con respecto a los efectos electromagnéticos



Leyenda:

a) Acoplamiento electromagnético:

- i. Mala práctica: una gran área de circuito cerrado da como resultado un alto $d\Phi/dt$ causado por dI/dt .

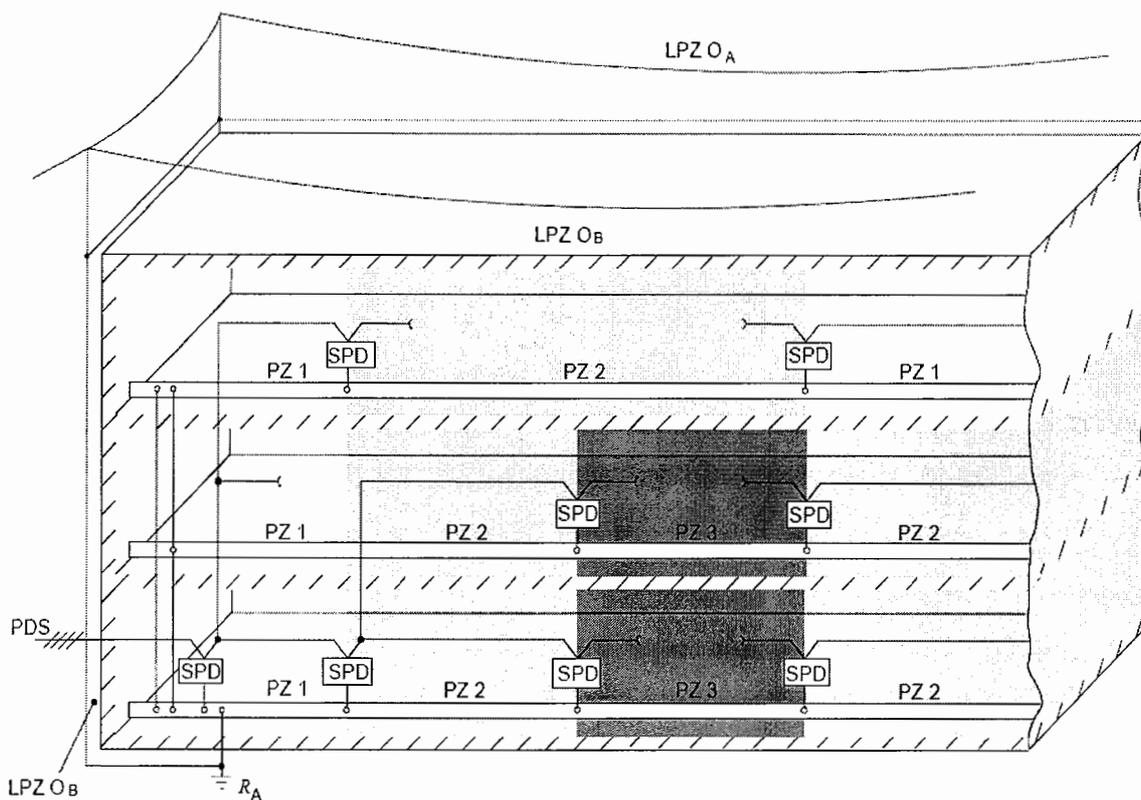
- ii. Una mejor práctica: pequeñas áreas de circuitos cerrados da como resultado pequeños $d\Phi/dt$.
 - iii. La mejor práctica: cable blindado da como resultado $d\Phi/dt \approx 0$ dentro del blindaje.
- b) Acoplador inductivo:
- i. Mala instalación: el acoplamiento inductivo en el punto marcado *.
 - ii. Buena Instalación: cables aguas arriba y aguas abajo están bien separados.

Fuente: Norma IEC 61643-12

7.2 Concepto de protección por zonas

Un ejemplo de la división del sistema de energía de un edificio en zonas protegidas con la instalación de 'SPD's, es mostrada en la figura 30, de acuerdo con la norma IEC 61312- 1 para impactos directos de rayo:

Figura 30. Subdivisión de un edificio en zonas de protección



Leyenda:

LPZ: Zona de protección del rayo.

PDS: Sistema de distribución de energía en el edificio.

PZ: Zona de protección.

SPD: Supresor de transitorios.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Las zonas de protección se definen como sigue:

- Zona de protección del rayo O_A (IEC 61312-1):

Zona en donde los elementos están expuestos a un impacto directo de rayo y por lo tanto pueden llegar a experimentar una corriente completa de rayo. Los campos electromagnéticos no atenuados ocurren en esta zona.

- Zona de protección del rayo O_B (IEC 61312-1):

La zona donde los elementos no están sujetos a impactos directos de rayos, pero sí expuestos a la influencia de campos electromagnéticos.

- Zona de protección 1:

Zona en donde los elementos están sujetos a impactos parciales de rayo. Las corrientes de impulso y los sobrevoltajes son un poco menores comparados con las zonas O_A y O_B .

- Zona de protección 2:

Zona en donde existen remanentes de las sobrecorrientes y sobrevoltajes, aunque un poco menores comparado con la zona uno.

- Zona de protección 3:

Zona en donde ocurren sobrevoltajes causados por efectos oscilatorios, acoplamiento de campos magnéticos y por conmutaciones internas, aunque son un poco menores respecto a la zona dos.

Los parámetros amenazadores conducidos son reducidos instalando SPD's en los límites de la zona de la protección. Se debe efectuar una completa coordinación (como ha sido mostrado en el capítulo seis entre todos los SPD's. Cada uno de ellos debe ser escogido de acuerdo con los parámetros actuales del sistema eléctrico, y también de acuerdo con el tipo de equipo que protegerán.

- Nota 1: si se instalaran SPD's clase I, de acuerdo a la norma IEC 61312-1 éstos deben ser instalados entre el límite de la zona LPZ O_B y la zona 1.

7.3 Ejemplo de un uso doméstico

- Longitud de la red de mediana tensión: arriba de los 10 kilómetros.
- Longitud de la red de bajo voltaje (120 V): arriba de 1,000 m; cable subterráneo 200 m.
- N_g: 2 impactos/km²/año.
- Localización de la estructura que se protegerá: en un área plana.
- Estructura de la instalación eléctrica: instalación protegida por un Equipo de Protección de Corriente Residual (RCD – *Residual Current Device*) en la entrada con una resistencia de 3 kA 8/20 µs). La capacidad de cortocircuito en la entrada de la instalación es de 3 kA.
- Hay un tablero eléctrico principal en la entrada de la casa (sótano) y un tablero eléctrico de distribución de circuitos en el primer nivel.

- Valor del aterrizaje de la estructura (casa) que se protegerá: 50Ω . Sistema de aterrizaje de la red de baja tensión: Del tipo TT. Dos conductores vivos y un neutral.
- Naturaleza de los dispositivos a ser protegidos: lavadora electrónica, computadora, sistema de alarma, televisión y teatro en casa (sistemas de audio y video).

Tomando en cuenta que se tiene un $N_g = 2$, y que las líneas de mediana y baja tensión son aéreas, entonces el uso de un SPD se transforma ya en una necesidad.

Debido a la probabilidad de impacto de rayo en las líneas de mediano voltaje, podríamos decir que esperamos corrientes I_n del orden de los $5\text{kA } 8/20 \mu\text{s}$ o mayores por línea.

En la entrada, la capacidad de corriente de cortocircuito es de 3 kA r.m.s. , por lo tanto, la capacidad de corriente de cortocircuito del SPD debe ser $\geq 3 \text{ kA r.m.s.}$ Normalmente, el fabricante recomienda el uso de un fusible o de un *breaker* con estas características como medio de desconexión.

En la entrada se encuentra el primer equipo a proteger, un Sistema de Alarmas, el cual es un equipo sensible, que normalmente anda por el orden de $U_p \leq 1.5$ kilovoltios. Para protegerlo podemos hacerlo con un SPD de dos puertos (si el sistema es monofásico 120V , es decir, que está alimentado con un conductor vivo, un neutro y una tierra) clase II con un $U_p = 1.5 \text{ kV}$.

Debido a que se tiene un sistema del tipo TT, para evitar una tensión demasiado alta entre el conductor vivo y el neutro, se recomienda para utilizar un SPD que tenga tres modos de la protección: de fase a neutro, de fase a tierra y de neutro a tierra.

Los otros dispositivos a ser protegidos necesitan únicamente protección entre fase y neutro debido a que la tierra no está conectada a ellos, excepto por la lavadora, la cual sí tiene conexión a tierra. En este caso, la protección entre fase y tierra y neutro y tierra es necesaria.

- Nota: protección adicional es necesaria si se conecta la antena de TV a tierra.

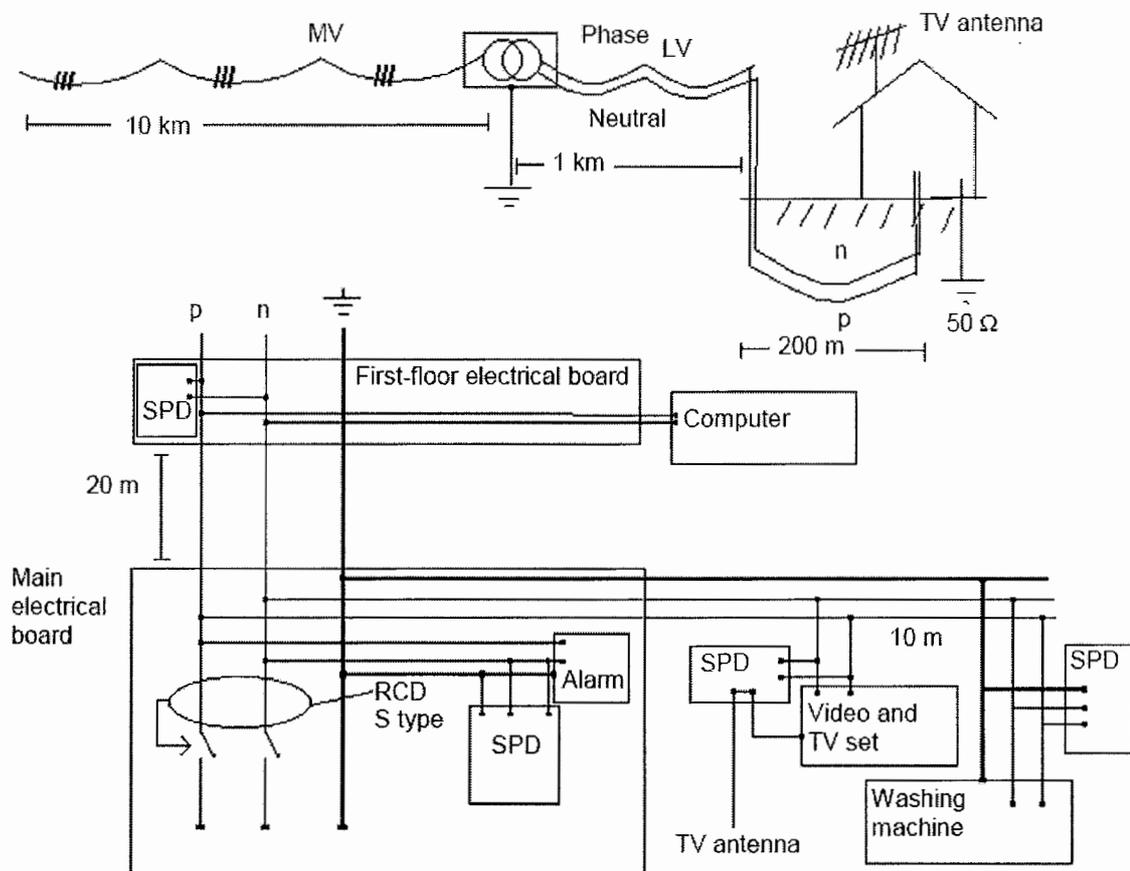
Como la distancia entre el SPD en la entrada y los otros dispositivos, especialmente en el primer nivel, es grande (10 y 20 m respectivamente), otro SPD es necesario cerca de los dispositivos a ser protegidos en el primer nivel. Uno se debe situar cerca de la lavadora y otro cerca del TV y teatro en casa. Otro debería estar conectado en el tablero eléctrico del primer nivel o si se desea, en el tomacorriente que alimenta directamente a la computadora. Si se conecta al tablero de distribución, todos los circuitos quedarían protegidos, y si se conecta al tomacorriente de la computadora, únicamente ese circuito eléctrico (al cual pertenece la computadora) quedaría protegido.

Para los tres casos, lavadora, TV, teatro en casa y computadora, el SPD podría seguir siendo de Clase II sólo que de capacidad de corriente un poco más baja que el instalado en la entrada con el sistema de alarma, es decir, alrededor de $I_n = 2$ kA (este tipo trae de fábrica por lo general un $U_p = 0.8$ kV). Podría bien instalarse uno con $I_n = 5$ kA, pero el costo sería más elevado.

En cuanto a las distancias para proporcionar el desacoplo necesario entre todo el sistema de protección, existe una dificultad: La distancia de 20 m es suficiente para proporcionar el desacoplo necesario entre el SPD situado en la entrada y el SPD del primer nivel, pero los 10 m entre el SPD de la entrada y los otros dos SPD's del mismo nivel (sótano) no son suficientes para poder proporcionar el desacoplo adecuado debido al valor bajo del $U_p = 0.8$ kV que seguramente traerán los dos SPD's por ser del tipo de $I_n = 2$ kA, por lo tanto, existen dos opciones a elegir:

1. Que para los dos SPD's de la lavadora y de la TV se escojan también con un $U_p = 1.5 \text{ kV}$, para que fueran iguales en este valor con respecto al de la entrada, pero se debe verificar que los aparatos puedan resistir un sobrevoltaje que esté alrededor de los 1.5 kV .

Figura 31. Ejemplo del uso de SPD's en una instalación domiciliar



Fuente: Norma IEC 61643-12

2. Si no se tiene información sobre el nivel de sobrevoltaje que pueden resistir estos dos aparatos eléctricos y se desea mejor instalar un SPD con el UP más bajo (es decir, con valor de $U_p = 0.8 \text{ kV}$) para brindarles mayor protección, entonces se debe instalar una bobina de desacoplo entre el SPD de la entrada y estos dos SPD's. Con esto se logra mantener un U_p bajo (del orden de los 0.8 kV) y coordinado todo el sistema para que no resulten dañados los tres SPD instalados aguas abajo y por sobre todo, los equipos eléctricos protegidos adecuadamente.

7.4 Ejemplo de un uso industrial

Este ejemplo se basa en la figura número 32. Para este caso se tiene que la entrada de energía es en el edificio MB, el cual a su vez distribuye la energía para los edificios B1 y B2.

Se supone que el voltaje para la línea de mediana tensión es de 13.2 kV , y que luego de recorrer varios kilómetros aéreos ingresa al edificio MB, en donde se tiene un transformador, el cual baja el voltaje a $240/120 \text{ V}$.

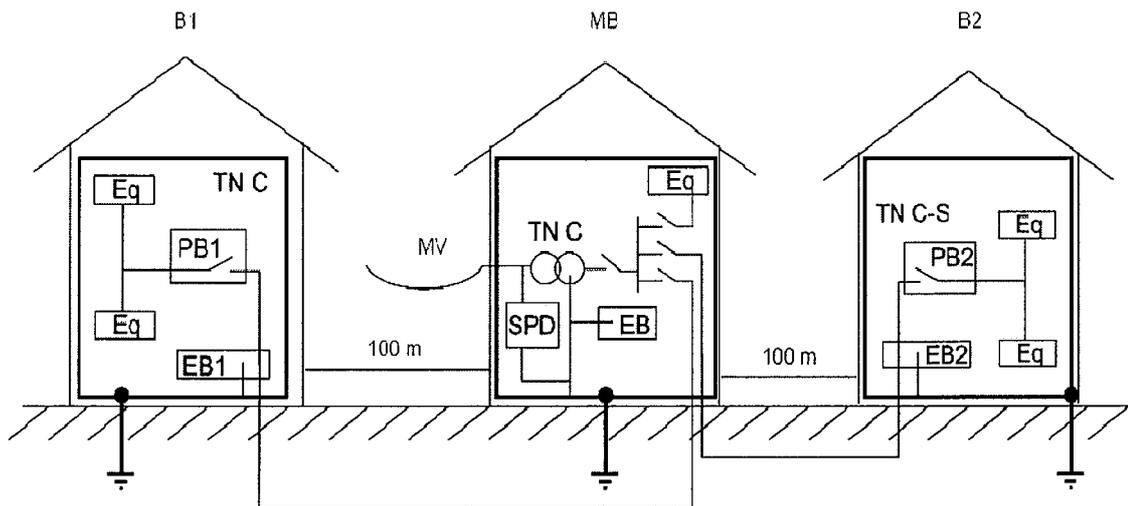
Luego de que el transformador brinda el voltaje ya en baja tensión, se conduce toda la energía a un panel principal, el cual estará compuesto por un *breaker* principal y diferentes circuitos de salida, uno que se queda allí mismo en el edificio MB, otro circuito para el B1 y un circuito para el B2.

El circuito eléctrico que se queda en el MB, alimenta una carga trifásica $240/120 \text{ V}$, que en este caso será un sistema de aire acondicionado para las oficinas administrativas. El cableado será a través de tres conductores vivos y un conductor para tierra.

El circuito eléctrico, que se dirige al B1, luego de recorrer una distancia aproximada de 100 metros a través del suelo, luego llega e ingresa a un panel de distribución No. 1 (PB 1), del cual se alimenta una carga trifásica, que en este caso será una selladora plástica al vacío. El cableado será a través de tres conductores vivos y un conductor para tierra.

El circuito eléctrico, que se dirige al B2, recorre unos 100 metros aproximadamente, y luego de eso ingresa a un panel de distribución No. 2 (PB 2), éste a su vez a través de un circuito eléctrico que recorre 50 metros alimenta a una carga trifásica muy sensible, un sistema de control distribuido en donde tarjetas electrónicas y PLC's son los componentes principales de esta carga.

Figura 32. Ejemplo del uso de SPd's en una instalación industrial



Leyenda:

MB = Edificio principal.

EB = Barra equipotencial.

B1, B2 = Edificio 1, 2.

PB = Tablero de distribución.

Eq = Carga eléctrica.

Fuente: Norma IEC 61643-12

Se observa a través de la figura 33 que se puede colocar en el panel principal MPB, un juego de SPD. Estos pueden ser de tres clases:

- a) Clase I: si se considera que el área en donde está ubicado el edificio MB es un área propensa a recibir descargas electroatmosféricas, o si la línea de mediana tensión recorre una gran distancia en este mismo tipo de terreno propenso a descargas, entonces, lo más oportuno sería colocar en la entrada en el panel MBP este tipo de SPD. Hay que recordar que los Clase I están capacitados para soportar corrientes del tipo de onda 10/350 μs que son los que traen los impactos directos (rayos).
- b) Clase II: si el área en donde está el edificio no posee un alto N_g , y si la línea de alimentación de mediana tensión no recorre mucha distancia en forma aérea, entonces, este tipo sería el indicado. Se debe recordar que estos están capacitados únicamente para soportar corrientes del tipo de onda 8/20 μs .
- c) Clase I + Clase II: estos brindarán una protección contra los dos tipos de onda mencionados en los dos ítems anteriores. La única desventaja es que su costo es bastante elevado.

Para este caso, se escogerá una protección combinada en la entrada en el MPB, es decir, Clase I + Clase II. Esto ayudará a estar protegidos contra sobretensiones de impacto directo del tipo de onda 10/350 μs y también contra sobretensiones del tipo 8/20 μs . La I_{imp} (10/350 μs) para el primer tipo de onda deberá estar por el orden de los 25 kA, con lo cual se obtendrá una protección de hasta 75 kA en los tres SPD's. En cuanto al valor U_p , contrario al valor I_{imp} , se debe escoger el valor más pequeño que se pueda, en este caso se puede encontrar en el mercado rangos que van desde los 1.5 kV hasta los 3.2 kV, por lo que se escogerá un SPD's con $U_p \leq 1.5$ kV. Se debe recordar que la distancia entre los SPD's y la EB (Equipotencial Bar) debe ser lo más pequeña posible.

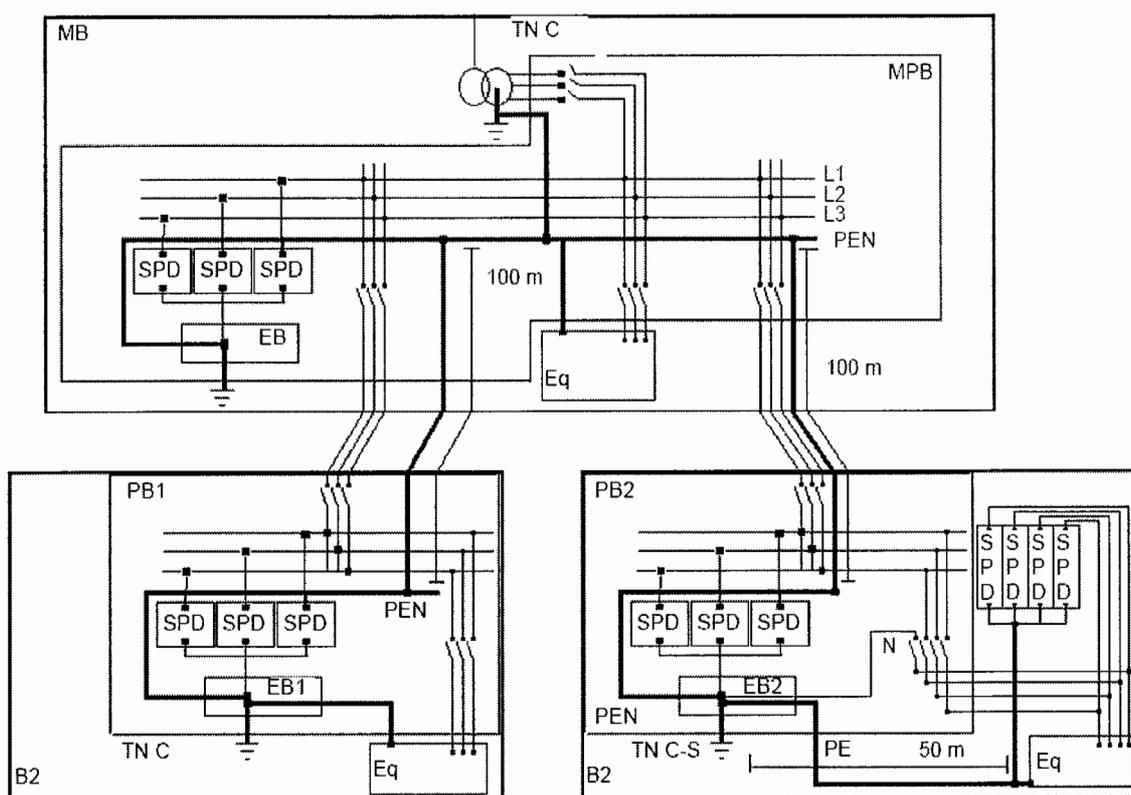
Si se va al edificio B2, se encontrará que el cableado eléctrico entra a un tablero de distribución de circuitos PB1, luego de recorrer una distancia aproximada de 100 metros lineales. Debido a la longitud del cable, no se tiene problemas con el desacoplo de los SPD's que se desea instalar. Si la distancia fuera pequeña, menor a los 15 metros, se debe hacer el cálculo de inductancias y determinar el valor de la inductancia de desacoplo necesaria para este caso. Debido a que ya se tiene en la entrada una protección Clase I, se podría bien instalar en este PB1 una protección Clase II, solamente que con un valor de U_p menor al instalado en la entrada en el Panel Principal PB. Como siempre, se escogerán los SPD's que cumplan con este valor de U_p y que brinden la mayor capacidad de corriente. Se debe recordar que en clase II, se está tratando con transientes con formas de onda del tipo 8/20 μ s. La corriente nominal para esta clase II está por el orden de los 3 kA hasta los 40 kA, por lo que para este caso entonces se escogerá un $U_p \leq 0.8$ kV y una $I_{max} = 40$ kA.

El caso del edificio B3 es un poco similar, solamente que se necesita instalar dos tipos de SPD's, porque además de proteger todas las cargas instaladas en ese edificio, se tiene una carga muy sensible a muchos metros de distancia. El cableado recorre unos 100 metros hasta llegar al tablero de distribución PB2, luego de lo cual recorre otros 50 metros hasta alimentar una carga compuesta en su mayoría por tarjetas electrónicas, PLC's, sistemas de transmisión y recepción de datos, etc.

A la entrada del PB2 se escogerá entonces un juego de SPD's de Clase II, de similares características a los instalados en el PB1, es decir, con $U_p \leq 0.8$ kV y una $I_{max} = 40$ kA. En cuanto a la carga sensible que está a 50 metros de distancia del PB2, al ver el tipo de carga que es, se puede deducir que se necesita una protección más fina que las anteriormente instaladas, es decir, una Clase III. En esta clase los U_p van desde los 0.55 kV hasta los 1.1 kV, y tomando en cuenta que toda la carga es electrónica, se escogerá el U_p más bajo que se pueda encontrar, en este caso 0.55 kV. Los rangos de I_{max} están por

el orden de los 2 kA hasta los 5 kA, por lo que para brindar una mayor protección se escogerá SPD's de 5 kA. Se debe recordar que mientras más bajo sea el U_p , los SPD's serán de costo más elevado. Y en cuanto a la I_{max} , mientras más alta sea la capacidad del SPD, más alto será su valor económico.

Figura 33. Detalle interno en una instalación industrial



Leyenda:

MB = Edificio principal.

B1, B2 = Edificio 1, 2.

Eq = Carga eléctrica.

EB = Barra equipotencial.

MPB = Panel principal.

PB = Tablero de distribución.

Fuente: Norma IEC 61643-12

El principio de coordinación también deberá tomarse en cuenta, debido a que si la distancia entre los SPD's aguas arriba (que en este caso son de Clase II) y los SPD's aguas abajo (en este caso Clase III) es demasiado corta (por el orden de los 10 metros), se necesitará como siempre de bobinas (inductancias) de desacoplo, a excepción que los SPD cuenten con tecnología que no necesiten este tipo de bobinas. Para este caso no serán necesarias, porque la distancia entre los SPD's es de 50 metros aproximadamente.

CONCLUSIONES

1. En la medida en que se tenga equipo eléctrico o electrónico más sensible, así crece la necesidad de tener un sistema de protección contra perturbaciones transitorias.
2. Existen dos causas por las cuales se originan las sobretensiones transitorias en las instalaciones eléctricas:
 - a. Impulsos electromagnéticos de rayo (LEMP = *Lightning Electromagnetic Impulse*).
 - b. Impulsos de conmutaciones electromagnéticas (SEMP = *Switching Electromagnetic Impulse*).
3. Para el diseño de un sistema de protección contra sobretensiones transitorias en una instalación eléctrica, se debe aplicar el concepto de protección de zonas contra el rayo.
4. El voltaje residual aplicado al equipo a proteger es la suma del voltaje residual del SPD y la caída de tensión inducida a lo largo de los cables de conexión.
5. Es necesaria la instalación de una protección adicional a los equipos eléctricos, aún cuando se haya instalado SPD's Clase I y II si:
 - a. Están presentes equipos muy sensibles (equipos electrónicos, computadoras, PLS's, etc.).
 - b. La distancia entre el SPD ubicado en la entrada y el equipo a proteger es muy larga.

- c. Dentro de la edificación existan campos electromagnéticos creados por descargas de rayos y fuentes de interferencia internas.
6. Cuando se instala un SPD cercano a un equipo, debe tener un U_p de al menos un 20% menor que la tensión soportada por el equipo a proteger.
 7. Para asegurar una buena coordinación entre dos SPD's es necesario cumplir con el criterio de energía, que establece que se debe lograr una distribución adecuada de la corriente para limitar la magnitud de energía disipada en cada SPD hasta un valor menor o igual a su máxima energía soportable.
 8. Cuando se desea instalar dos SPD's, el desacoplo energético que se necesita tener se puede obtener de dos maneras:
 - a. Mediante la impedancia de los cables de la línea como elemento de desacoplo de por lo menos de 15 metros de longitud.
 - b. Instalar una bobina de desacoplo.
 9. Cuando se coordinan dos SPD's, siendo el primero de cápsula de gas y el segundo de varistores, se necesita que el segundo cumpla con los siguientes requisitos:
 - a. Si el transiente entrante es según la forma de onda de prueba Clase I:

$$U_{dyn} < U_{ref2} + L \times I_{peak2}/10$$

- b. Si el transiente entrante es según la forma de onda de prueba Clase II:

$$U_{dyn} < U_{ref2} + L \times I_{max2}/8$$

10. Para la coordinación de SPD's Clase III, se dice que ésta es satisfactoria si $U_{OC\ test} > U_{OC\ (CWG)}$.
11. Dependiendo de la capacidad de corriente del medio de desconexión de los SPD's (fusibles o *breakers*), el tamaño del conductor de aterrizaje de los SPD's instalados sean clase I, II o III, irá desde $16\ mm^2$ (\approx AWG # 14) hasta $50\ mm^2$ (\approx AWG 1/0).

RECOMENDACIONES

1. Consultar normas IEEE y NEC para el estudio y análisis de otros sistemas de protección con supresores de transitorios modulares, debido a que muestran modelos diferentes respecto a la norma IEC.
2. Se debe instalar SPD's Clase I en la entrada de instalaciones eléctricas en regiones con nivel cerámico medio-alto, con el fin de eliminar de perturbaciones transitorias con forma de onda 10/350 μ s.
3. En los tableros de distribución de circuitos se debe instalar SPD's clase II independientemente si la región posee niveles cerámicos bajo, mediano o alto, con el fin de eliminar transitorios con forma de onda 8/20 μ s.
4. Instalar SPD's Clase I + Clase II en la entrada de las acometidas eléctricas si las instalaciones eléctricas no son demasiado extensas (mayores de 100 metros), lo cual permitirá tener protegidos todos los equipos desde la entrada de la energía al inmueble. De lo contrario, si las instalaciones eléctricas son de mayor longitud, es mejor instalar en la entrada únicamente SPD's Clase I y en los demás tableros de distribución SPD's clase II.
5. Se debe instalar SPD's Clase III en equipos eléctricos-electrónicos muy sensibles como PLS's, tarjetas electrónicas, computadoras, sistema de transmisión de datos, etc.
6. No exceder los 0.50 metros de longitud en los conductores de conexión entre los SPD's y el equipo a proteger. Mientras más cortos, mejor.

7. Se debe instalar un medio de desconexión del SPD con respecto al equipo que está protegiendo, como por ejemplo fusibles o *breakers*, esto con el fin de que se pueda realizar con un nivel adecuado de seguridad el mantenimiento del SPD. Así mismo, este sistema de desconexión ayudará a romper la corriente de sobrecarga que en algún momento pueda presentarse en las líneas y que pase dañando al SPD.
8. Evitar en el momento de la instalación de los SPD's que el cableado protegido vaya en la misma tubería que el cableado no protegido, debido a que allí se originarán inducciones electromagnéticas.
9. Mantener una distancia mínima de cinco metros lineales entre un SPD Clase II y un SPD Clase III. Esto con el fin de que exista una correcta coordinación entre los dos supresores.
10. Tener un valor no mayor de ocho ohmios en el sistema de puesta a tierra al cual se conectarán los SPD's. De lo contrario se estará mermando la vida útil del supresor.

BIBLIOGRAFÍA

1. A., Rousseau; P., Auriol; A., Rakotomalla. *Lightning distribution through earthing systems. Hobart Lightning Protection Workshop*, 1992.
2. A., Rousseau and T., Perche. *Coordination of surge arresters in low voltage field*. INTELEC, 1995.
3. DIN EN 62305-1, *Protection against lightning, Part 1: General principles*. (IEC 81/216/CDV:2003) *German Version EN 62305-1:2003*.
4. DIN EN 62305-4: *Protection against lightning, Part 4: Electrical and electronic systems within structures*. (IEC 81/238/CDV:2003). *German Version EN 62305-4:2003*.
5. F. Martzloff, L.S. LAI. *Coordinating cascaded surge protective devices: high-low versus low-high*. IEEE IAS, 1991.
6. H., Altmaier; D., Pelz; K., Scheibe. *Computer simulation of surge voltage protection in low voltage systems*. ICLP, 1992.
7. IEC 61643-11: *Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems, Part 1: Performance requirements and testing methods. First edition 1998*.

8. IEC 61643-12: *Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems, Part 12: Selection and application principles. First edition 2002.*
9. J., Schonau; F., Noack; R., Brocke. *Coordination of fuses and overvoltages protection devices in low voltage mains. Fifth International Conference on Electrical Fuses and their Applications, 1995.*
10. M., Clement and J., Michaud. *Overvoltages on the low distribution networks. CIRED, 1993.*
11. P., Hasse; P., Zahlmann; J., Wiesinger; W., Zischank. *Principle for an advanced coordination of surge protective devices in low voltage systems. ICLP 1994.*