



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

**PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE  
TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS  
ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS  
GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

**Selvyn Donald Villatoro Hernández**

Asesorado por el Ing. Jorge Gilberto González Padilla

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE  
TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS  
ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS  
GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**SELVYN DONALD VILLATORO HERNÁNDEZ**  
ASESORADO POR EL ING. JORGE GILBERTO GONZÁLEZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE  
TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS  
ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS  
GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de septiembre de 2013.



**Selvyn Donald Villatoro Hernández**

Guatemala, septiembre 23 de 2014

Ingeniero  
Otto Fernando Andrino González  
Coordinador del Área de Ciencias Básicas y Electrotecnia.  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Andrino:

Reciba y cordial y respetuoso saludo, de acuerdo con la designación de mi persona en asesorar el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante, Selvyn Donald Villatoro Hernández, carnet No. 2008-18855, titulado **“PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPUBLICA DE GUATEMALA”** encontrándolo satisfactorio en su contenido y elaboración, y en función de los parámetros establecidos, por medio de la presente me permito dar la aprobación y recomendación del mismo, remitiéndolo a la Coordinación del Área de Ciencias Básicas y Electrotecnia de la Escuela de Mecánica Eléctrica, con la finalidad de darle el trámite correspondiente.

Agradeciendo su atención a la presente, me es grato suscribirme.

Sin otro particular,

Atentamente,

  
INGENIERO ELECTRICISTA  
No. DE COLEGIADO 9055  
Ing. Jorge Gilberto González Padilla  
Asesor



Ref. EIME 52.2014  
Guatemala, 27 de OCTUBRE 2014.


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: PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, del estudiante Selvyn Donald Villatoro Hernández, 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 Andriño González**  
Coordinador Área Electrotécnica



STO



REF. EIME 52. 2014.

**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; SELVYN DONALD VILLATORO HERNÁNDEZ titulado: PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 11 DE NOVIEMBRE 2,014.**



DTG. 034.2015

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: **PROPUESTA PARA LA COORDINACIÓN DE SUPRESORES DE TRANSITORIOS, SEGÚN IEEE STD C62.41.1-2002 PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN, EVALUANDO ASPECTOS GEOGRÁFICOS Y ELÉCTRICOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Selvyn Donald Villatoro Hernández**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 3 de febrero de 2015



/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser el Dios supremo que me guía cada día.
<b>Mis padres</b>	Por darme el apoyo incondicional y brindarme la oportunidad de seguir creciendo como persona.
<b>Mis hermanos</b>	Por el cariño incondicional y apoyo que recibo por parte de ellos para terminar este trabajo de graduación.
<b>Mis amigos</b>	Por ser parte fundamental de mi proceso de estudios.
<b>Mi asesor</b>	Por haberme guiado en este trabajo de graduación.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**USAC**

Por ser el ente rector de mi formación y así alcanzar la meta del éxito.

**Facultad de Ingeniería**

Por permitirme ser parte de ella y así ser el camino de mi formación y educación.





1.1.2.3.	Transitorios por fallas, despeje de fallas, energización de líneas .....	19
1.1.2.4.	Interrupción de corrientes capacitivas e inductivas .....	23
1.1.3.	Sistema de múltiple interacción .....	28
1.2.	Propagación de transitorio .....	30
1.2.1.	Propagación de sobrevoltaje .....	30
1.3.	Formas de mitigar los efectos de descargas atmosféricas .....	32
2.	TECNOLOGÍA DE SUPRESORES .....	41
2.1.	Funcionamiento de un supresor de transitorios .....	41
2.2.	Tecnología de los limitadores de sobretensiones .....	42
2.2.1.	Diodo supresor de silicio .....	43
2.2.1.1.	Diodo supresor de silicio unidireccional vs bidireccional .....	45
2.2.2.	Descargador de gas .....	47
2.2.3.	Varistor Óxido de Metal (MOV) .....	49
2.2.3.1.	Región de corriente de fuga .....	51
2.2.3.2.	Región óhmica .....	51
2.2.3.3.	Región de ruptura .....	52
2.2.3.4.	Curva característica I-V .....	52
2.2.3.5.	Tiempo de respuesta del varistor .....	53
2.2.3.6.	Absorción de descarga de corriente y energía .....	54
2.3.	Tipos de categorías de supresores de transitorios .....	56
2.4.	Tipos de ondas estandarizadas para supresores de transitorios .....	57
2.4.1.	La onda transitoria ( <i>ring wave</i> ) 100 khz .....	57
2.4.2.	Onda combinada 1,2/50-8/20 $\mu$ s .....	62

3.	REQUERIMIENTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPRESORES .....	71
3.1.	Conexión a tierra de los dispositivos de protección contra sobretensiones .....	71
3.2.	Requerimientos de instalación de un supresor de transitorios .....	76
3.3.	Mantenimiento de un supresor de transitorios.....	81
3.4.	Especificaciones técnicas de un supresor de transitorios.....	83
3.4.1.	Voltaje máximo continuo de operación (MCOV) .....	83
3.4.2.	Nivel de protección (VPR).....	84
3.4.3.	Corriente de cortocircuito.....	84
3.4.4.	Corriente nominal de descarga por fase .....	86
3.4.5.	Modos de protección de un supresor de transitorios .....	87
3.4.6.	Tiempo de respuesta de un supresor .....	88
3.4.7.	Seguidor de onda sinusoidal ( <i>sine wave tracking</i> )..	89
4.	SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS.....	93
4.1.	Nivel isocerámico .....	93
4.2.	Ubicación si es un espacio abierto o aislado respecto a otras construcciones.....	99
4.3.	Evaluar el tipo de acometida existente en la planta industrial o residencial .....	101
4.4.	Historial de disturbios .....	103
4.5.	Resumen de los criterios al seleccionar un supresor .....	104
4.6.	Propuesta para la coordinación de supresores con base en IEEE C62.41-2002.....	106
4.7.	Ejemplo de selección de una coordinación de supresores....	107

CONCLUSIONES .....	115
RECOMENDACIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA.....	119

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Acople directo e indirecto debido a un rayo.....	3
2.	Dispersión de un impacto de rayo al sistema de distribución .....	4
3.	Impacto directo del rayo a la estructura .....	5
4.	Impacto de rayo cercano a un edificio .....	7
5.	Inducción magnética por rayo a distancia .....	11
6.	Sobretensión por campo electrostático .....	13
7.	Mapa mundial de densidad de rayo .....	16
8.	Sobretensión común por maniobra .....	18
9.	Sobretensión por convertidores electrónicos.....	18
10.	Circuito LC.....	19
11.	A) capacitor en cortocircuito B) fuente equivalente .....	20
12.	Circuito LC.....	22
13.	Comportamiento del voltaje en el capacitor.....	23
14.	Representación de circuito LC .....	24
15.	Corriente de inserción del capacitor .....	27
16.	Voltaje en el banco de capacitores.....	27
17.	Representación de interacción entre sistemas.....	28
18.	Propagación de onda de rayo al sistema de distribución .....	31
19.	Protección primaria y secundaria en un edificio .....	33
20.	Tipos de limitadores de sobretensión .....	34
21.	Circuitos de protección secundaria .....	40
22.	Curva de un diodo de silicio bidireccional.....	44
23.	Comportamiento del diodo de silicio unidireccional .....	45



24.	Comportamiento del diodo de silicio bidireccional.....	46
25.	Comportamiento de un descargador de gas .....	48
26.	Modelo eléctrico de conducción de un varistor .....	50
27.	Curva característica del varistor .....	51
28.	Tiempo de respuesta de un varistor .....	53
29.	Curva característica I-V degradada tras un pulso de corriente .....	54
30.	Reducción del voltaje debido a una descarga atmosférica .....	55
31.	Niveles de protección de un supresor .....	57
32.	Onda transitoria ( <i>ring wave</i> ) 100 kHz.....	61
33.	Tiempo de subida de la onda transitoria ( <i>ring wave</i> ).....	62
34.	Onda combinada en circuito abierto 1.2/50 $\mu$ s .....	66
35.	Onda combinada en cortocircuito 8/20 $\mu$ s .....	67
36.	Comparación de onda combinada 8/20 $\mu$ s y 10/350 $\mu$ s .....	69
37.	Formas de protección para un sistema 4 hilos + tierra.....	73
38.	Protección para un sistema 3 hilos + tierra .....	74
39.	Formas de protección para un sistema delta 3 hilos .....	75
40.	Supresor instalado (a) fuera (b) dentro del panelboard.....	77
41.	Instalación de un supresor monofásico 3 hilos.....	78
42.	Instalación de un supresor 3 fases, 4 hilos .....	79
43.	Instalación de un supresor conexión delta con extremo alto 3 fases, 4 hilos.....	79
44.	Instalación de un supresor conexión delta 3 fases, 3 hilos .....	80
45.	Diagrama de flujo del funcionamiento e inspección de un supresor en específico .....	82
46.	Tensión máxima de operación continua MCOV .....	83
47.	<i>Clamping voltage</i> de un supresor.....	84
48.	Corriente de cortocircuito de un supresor .....	85
49.	10 formas de protección para un sistema en conexión estrella.....	87
50.	6 formas de protección para el sistema en conexión delta.....	88

51.	Circuito seguidor de onda sinusoidal.....	89
52.	Seguidor de onda sinusoidal .....	90
53.	Ventana de supresión del seguidor de onda .....	91
54.	Distribución de probabilidad de rayo .....	94
55.	Niveles isoceráunicos de Guatemala .....	95
56.	Niveles Isoceráunicos en Centroamérica .....	96
57.	Análisis de niveles isoceráunicos .....	97
58.	Impacto de rayo junio 2013 .....	98
59.	Rayo nube a tierra.....	99
60.	Configuración usada en la simulación y componentes eléctricos.....	101
61.	Resultados de la simulación.....	102
62.	Configuración radial de tres edificios.....	103
63.	Banco de Guatemala.....	107
64.	Nivel isoceráunico en el Banco de Guatemala 2013 .....	108
65.	Ubicación de planta industrial.....	111
66.	Nivel isoceráunico en planta industrial, Escuintla .....	112

## TABLAS

I.	Desarrollo de inducción magnética .....	6
II.	Diferencia de potencial al suelo con una resistividad de $1\text{ k } \Omega\cdot\text{m}$ con una intensidad de rayo de 42 KA .....	8
III.	Muestreo de datos del impacto de rayo a tierra física a diferente resistividad del terreno. ....	10
IV.	Datos para el análisis .....	12
V.	Resultados del análisis.....	12
VI.	Análisis del principio de la sobretensión electrostática.....	14
VII.	Análisis del voltaje del capacitor .....	21
VIII.	Ecuación de corriente de inserción y voltaje en un capacitor.....	25

IX.	Desarrollo de la reactancia capacitiva.....	26
X.	Características de los limitadores de sobretensión .....	35
XI.	Seguimiento tabla X características de los limitadores de sobretensión.....	36
XII.	Seguimiento tabla XI características de los limitadores de sobretensión.....	37
XIII.	Valores de tensión de ensayo según el nivel de exposición acorde a IEEE C62.41-1991 .....	58
XIV.	Iteración de valores para graficar la figura 32 .....	60
XV.	Valores sugeridos para ensayos según IEEE C62.41-1991 .....	63
XVI.	Valores de protección N-G propuestos por IEEE C62.41-1991 .....	64
XVII.	Iteración para graficar la figura 34.....	65
XVIII.	Los valores que recomienda IEC 61312-1, 1995 .....	68
XIX.	Desarrollo de comparación de ondas normalizadas .....	69
XX.	Explicación de tabla XIX .....	70
XXI.	Máximo voltaje continuo de operación (MCOV) para un sistema 480/277V.....	72
XXII.	Máximo voltaje continuo de operación MCOV en un sistema HRG .....	74
XXIII.	Valores de corriente de cortocircuito por UL 1449 tercera edición .....	86
XXIV.	Desarrollo de intensidad de campo eléctrico.....	100
XXV.	Procedimiento para seleccionar un supresor .....	105
XXVI.	Propuesta para la coordinación de supresores .....	106
XXVII.	Resultado numérico Banco de Guatemala.....	110
XXVIII.	Resultado de capacidad del supresor Banco de Guatemala.....	110
XXIX.	Resultado numérico de planta industrial .....	114
XXX.	Resultado de capacidad del supresor planta industrial .....	114

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>C</b>	Capacitancia
$\emptyset$	Densidad de flujo
<b>B</b>	Densidad de flujo magnético resultante
<b>Z<sub>t</sub></b>	Impedancia total
<b>L</b>	Inductancia
<b>H</b>	Intensidad de campo magnético
<b>KA</b>	Kilo amperios
<b>KV</b>	Kilo voltios
$\mu_0$	Permeabilidad del espacio libre
$\mu$	Permeabilidad magnética del material
$\mu_r$	Permeabilidad relativa
<b>X<sub>c</sub></b>	Reactancia capacitiva
<b>X<sub>l</sub></b>	Reactancia inductiva
$\rho$	Resistividad eléctrica



## GLOSARIO

<b>Corriente de corto circuito</b>	Es la corriente máxima que el supresor puede ser sometido y desconectado de forma segura.
<b>Corriente nominal de descarga</b>	Valor cresta de la corriente que atraviesa el supresor que tiene una forma de onda 8/20 $\mu$ s y que su valor depende según el nivel de categoría.
<b>Efecto corona</b>	Pérdidas eléctricas por ionización del aire que envuelve al conductor.
<b>EPP</b>	Equipo de protección personal.
<b>Filtro LC</b>	Circuito resonante formado por inductancia y un condensador eléctrico.
<b>HRG</b>	<i>High resistance ground.</i>
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
<b>LIS</b>	<i>Lightning Imaging Sensor.</i>
<b>Máximo voltaje continuo de operación</b>	Es la tensión máxima que el dispositivo de protección puede soportar sin que el equipo falle.

<b>MCOV</b>	<i>Maximum Continuous Operating Voltage.</i>
<b>NEC</b>	<i>National Electrical Code.</i>
<b>NEMA</b>	<i>National Electrical Manufacturers Association.</i>
<b>NFPA 70E</b>	<i>National Fire Protection Association.</i>
<b>Nivel de protección VPR</b>	Valor de tensión momentáneo más alto de tensión que llega al equipo protegido después de haber sido limitado por un dispositivo de protección.
<b>OTD</b>	Detector óptico transitorio.
<b>Resistividad eléctrica</b>	Resistencia eléctrica que se opone al paso de una corriente eléctrica.
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square.</i>
<b>Seguidor de onda sinusoidal</b>	Rastreo de la onda o la capacidad de un supresor para suprimir altas frecuencias.
<b>Sobretensión</b>	Impulso de tensión que se sobrepone a la onda de tensión nominal de la red.
<b>Tensión de paso</b>	Diferencia de potencial sobre la superficie entre dos puntos.
<b>UL</b>	<i>Underwriters Laboratories.</i>

## RESUMEN

Los problemas de transitorios en los sistemas eléctricos siempre han existido, la facilidad con la que estos fenómenos destruyen equipos electrónicos es alta, se han creado equipos que puedan proteger contra estos fenómenos.

El capítulo uno detalla los fenómenos eléctricos que provocan los transitorios y como estos se introducen a la red eléctrica con base en estudios y normativas.

El capítulo dos muestra las tecnologías existentes con la que son fabricados los equipos y sus ventajas de cada tecnología.

El capítulo tres explica los requerimientos mínimos que son necesarios al comparar dos supresores de diferentes fabricantes y el proceso de instalación del equipo.

El capítulo cuatro analiza los parámetros a tomar en cuenta al seleccionar un supresor en la República de Guatemala.

El trabajo de graduación crea una propuesta para la selección óptima del equipo contra transitorios de corta duración, tomando en consideración aspectos eléctricos y geográficos.





# OBJETIVOS

## General

Proponer una solución para la coordinación de supresores de transitorios, según IEEE STD C62.41.1-2002 para sistemas eléctricos en baja tensión, evaluando aspectos geográficos y eléctricos en la República de Guatemala.

## Específicos

1. Presentar la teoría de los efectos electromagnéticos en una red eléctrica en baja tensión.
2. Dar a conocer las características más importantes de las tecnologías de supresores.
3. Mostrar los requerimientos y características eléctricas que definen a un supresor de transitorios.
4. Presentar los criterios de selección de un supresor de transitorios en la República de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos eléctricos de corta duración son eventos que dañan parcial o totalmente un equipo eléctrico o electrónico en una industria, edificio o residencia.

La finalidad de este trabajo de graduación es establecer un criterio de coordinación de supresores, tomando en consideración aspectos geográficos como el nivel isoceráunico de la región que ayuda determinar la cantidad de relámpagos que caen en el sitio a evaluar, al igual que nivel isoceráunico se considera los parámetros eléctricos de la red y características propiamente del equipo, de manera que se desarrolla una guía para que cualquier lector establezca su propia coordinación de supresores.

El trabajo de graduación está basado en investigación y normativas internacionales, haciendo uso de estas herramientas, se crea esta propuesta para la selección de supresores en Guatemala.



# **1. TEORÍA DE LOS EFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS**

## **1.1. Origen de sobrevoltaje**

La distribución eléctrica y redes telefónicas analógicas y digitales, están sometidas continuamente a sobretensiones transitorias internas o externas.

Una sobretensión es un impulso de tensión que se sobrepone a la onda de tensión nominal de la red, produciendo un aumento del valor de tensión en la línea durante un período muy corto de tiempo en el orden de los microsegundos.

No se tiene la facilidad de determinar cuándo aparecerá una sobretensión, provocando que cualquier equipo deje de funcionar al no tener la protección óptima y adecuada para que de la confiabilidad necesaria al sistema eléctrico.

El aumento de la tensión al igual que una sobrecorriente tiene su origen en las descargas atmosféricas y la conmutación de los equipos dentro del sistema.

### **1.1.1. Sobrevoltaje por rayo**

Es el resultado de un relámpago directo al sistema de distribución, a la estructura o al suelo, los relámpagos distantes pueden provocar algún tipo de inducción, dependiendo la ubicación del rayo respecto de la estructura implica efectos asociados del rayo en amplitud y forma de onda.

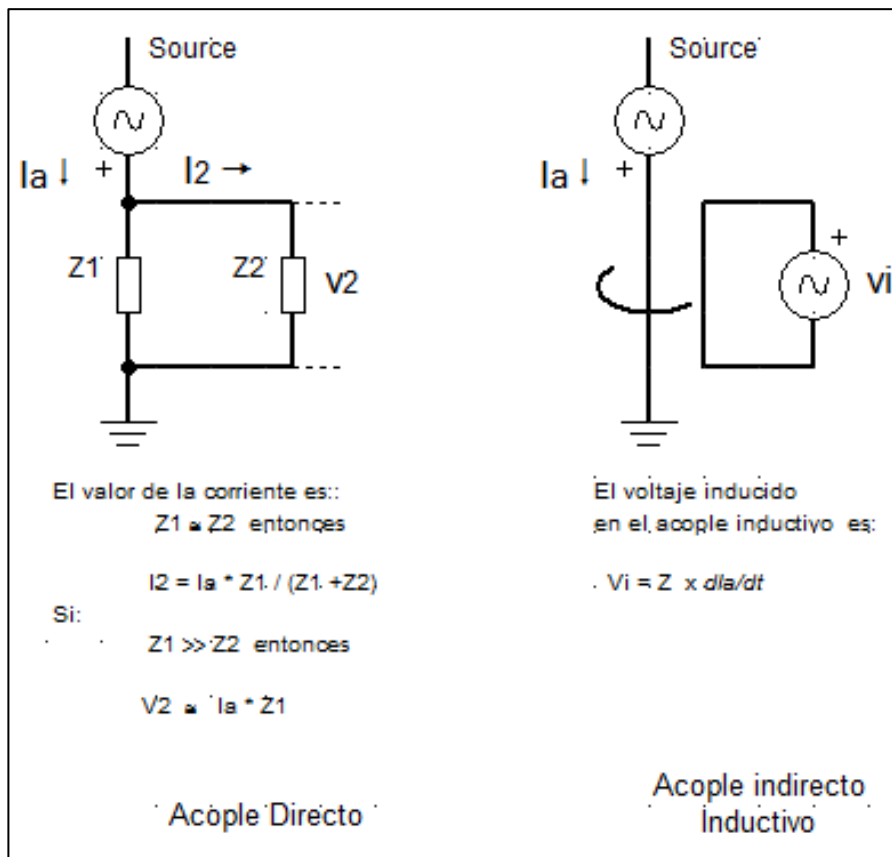
El rayo es un fenómeno natural e inevitable que afecta a los sistemas de energía en baja tensión, sistemas de señal o sistemas de comunicación, el impacto del relámpago directo es más severo en un sistema de energía que la inducción generada por un rayo a distancia.

Con base en las recomendaciones IEEE C62.41.1 del 2002 (p. 6) describe dos formas de inducirse un rayo:

- Un relámpago que no impacte directamente la estructura produce dos diferentes acoplamientos:
  - Picos de tensión que se acopla al sistema de energía, directamente e indirectamente, que incide en la entrada del servicio del edificio.
  - Los campos eléctricos y magnéticos que penetran en la estructura y el acoplamiento inductivo en el edificio.
- Un relámpago directo a la estructura del edificio o un relámpago a tierra cercano a la estructura produce tres diferentes acoplamientos:
  - Sobretensiones acopladas en los circuitos de corriente alterna por acoplamiento directo.
  - Sobretensiones acopladas en los circuitos de corriente alterna por medio de acoplamiento inductivo
  - Sobretensiones asociadas al incremento de potencial a tierra en la entrada del servicio de la acometida de un supresor.

En el caso de un relámpago directo en el sistema eléctrico, la amenaza es el flujo de corriente del rayo que se distribuye en la instalación. La impedancia efectiva del conductor del rayo es alta y la corriente de rayo que incide sobre la instalación prácticamente puede ser considerada como una fuente de corriente ideal.

Figura 1. Acople directo e indirecto debido a un rayo



Fuente: IEEE Std C62.41.1, 2002, p. 8.

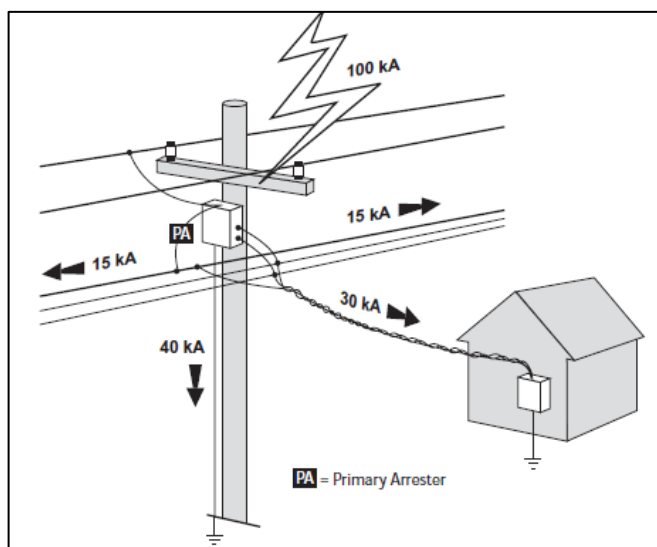


### 1.1.1.1. Impacto del rayo directo al sistema de distribución

La sobretensión puede provocar la destrucción total del tablero de distribución de energía dependiendo de la densidad de corriente que el rayo posea, la caída de un rayo provoca que la corriente tome diferentes direcciones antes de llegar a la acometida de un edificio.

La IEEE C62.41.1 del 2002 página 62, establece una distribución de energía en donde difícilmente un rayo de 100 kA, llega en su totalidad al tablero de distribución y se desvía antes de llegar a la acometida como se observa en la figura 2, esto comprueba que es poco probable que choques mayores entren en el equipo de la acometida, principal razón por la que la máxima corriente de descarga nominal de un supresor es de 20 kA.

Figura 2. **Dispersión de un impacto de rayo al sistema de distribución**



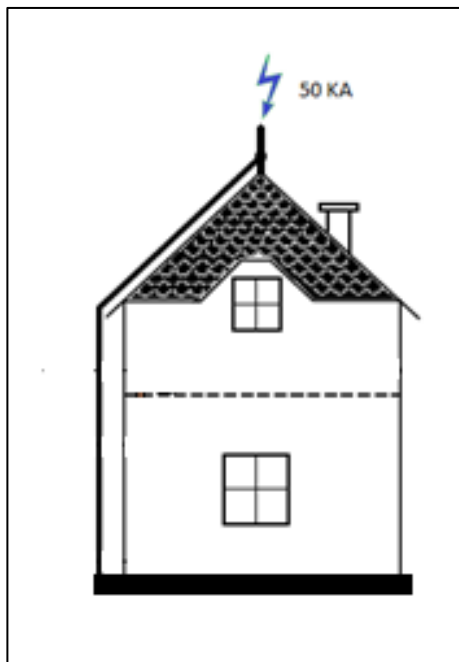
Fuente: IEEE Std C62.41.1, 2002. p. 62.

### 1.1.1.2. Impacto directo del rayo al edificio

En el impacto al edificio, la corriente que genera el rayo se debe de conducir al sistema de tierra física, el recorrido de la corriente hacia el suelo provoca una inducción magnética en los cables del equipo provocando sobretensiones que llegan a dañarlos.

La tabla I, muestra que la inducción magnética por la caída de un rayo puede llegar a generar sobretensiones peligrosas a los equipos, para tener la confiabilidad en el sistema eléctrico se requiere la protección adecuada.

Figura 3. Impacto directo del rayo a la estructura



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

Tabla I. **Desarrollo de inducción magnética**

No.	Ecuación	Explicación
1	$I = \oint H * dl$	La ley de Ampère establece que la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es igual a la corriente que lo recorre en ese contorno.
2	$B = \mu H$ $\mu = \mu_r * \mu_o$	La relación de la intensidad de campo magnético <b>H</b> y la densidad de flujo magnético resultante <b>B</b> producida dentro del material es el producto entre la permeabilidad relativa y la permeabilidad magnética de vacío.
3	$\Phi = \int_S \mathbf{B} * d\mathbf{s}$ $\Phi = B * S$	La densidad de flujo es la integral de superficie de la sumatoria de la densidad de flujo magnético, si el vector de la densidad de flujo es perpendicular a un plano de área y si la densidad de flujo es constante en toda el área, la ecuación se reduce.
4	$\frac{B}{\mu_o} = H = \frac{I}{2\pi r}$ $B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$ $\frac{\Phi}{S} = \frac{\mu_o I}{2\pi r}$ $\Phi = \frac{\mu_o I * S}{2\pi r}$ $\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_o * S}{2\pi r} * \frac{di}{dt}$	Al realizar una igualación entre el inciso 1 , 2 y resolver correctamente, se obtiene una densidad de flujo variable en el tiempo, y una variación del flujo respecto del tiempo ( $\frac{d\Phi}{dt}$ ) implica un voltaje, que depende de lo siguiente: $\mu_o = 4\pi * 10^{-7} H/m$ $I =$ Corriente de rayo $S =$ Área del conductor en donde se induce la sobretensión. $r =$ Distancia entre la interacción entre conductores.

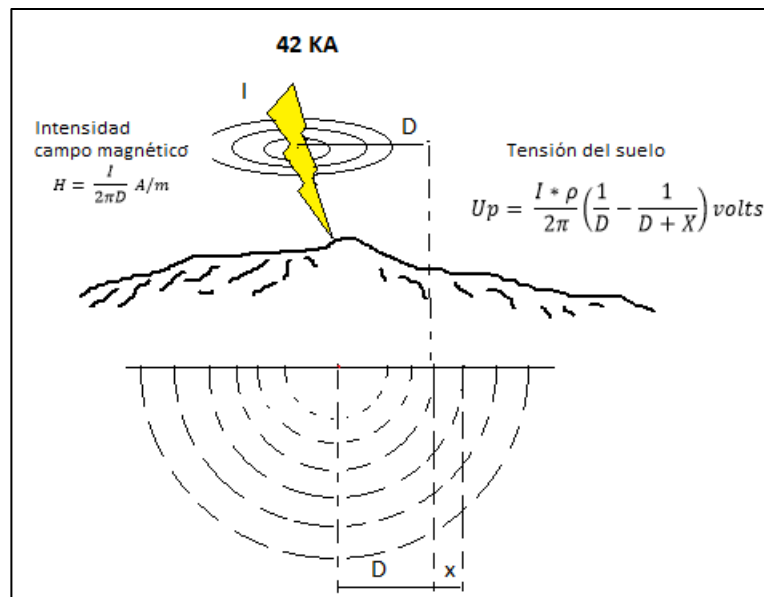
Fuente: elaboración propia.

### 1.1.1.3. Impacto cercano del rayo al edificio por incremento del potencial de tierra física

Se produce a inmediaciones de un edificio por el incremento de potencial del suelo. La corriente de descarga por rayo conducida a tierra mediante un conductor produce una elevación de tensión que dependerá de la resistencia del conductor según la ley de Ohm, el mismo efecto sucede al impactar un rayo a tierra, los efectos de una elevación de tensión del potencial eléctrico en el punto de impacto se propagaran por la tierra creando una distribución de potencial de tipo hiperbólico, la diferencia de potencial en el suelo (tierra) se puede expresar de la siguiente manera.

$$U_p = \frac{I * \rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D} - \frac{1}{D + X} \right)$$

Figura 4. Impacto de rayo cercano a un edificio



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

La tabla II muestra la diferencia de potencial en el suelo (tierra) debido a un rayo de 42 kA con una resistividad del suelo 1 kΩ.m a diferente distancia del punto de caída, dado que la conductividad del suelo tiene valores finitos la corriente de descarga se distribuye por debajo de la superficie de la tierra en todas las direcciones, esto incluye conductores metálicos que atraen la mayor cantidad de corriente inducida y la transportan a largas distancias hasta que se establece el equilibrio de potencial final, este efecto provoca que no existan sobretensiones, de manera que a mayor conductividad, menor sobretensión en el suelo.

Tabla II. **Diferencia de potencial al suelo con una resistividad de 1kΩ.m con una intensidad de rayo de 42 KA**

<b>Diferencia de potencial kV</b>						
<b>Distancia</b>	<b>X en metros ( Distancia Axial)</b>					
<b>D (m)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>
10	334	446	501	535	557	573
15	178	255	297	324	343	357
20	111	167	201	223	239	251
25	76	119	146	165	178	189
30	56	89	111	127	139	149
35	42	69	88	102	112	121
40	33	56	72	84	93	100
45	27	46	59	70	78	85
50	22	38	50	59	67	73
55	19	32	43	51	58	63
60	16	28	37	45	51	56
65	14	24	32	39	45	49
70	12	21	29	35	40	44
75	10	19	25	31	36	40
500	0,3	1	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia.

En la tabla II se determina la importancia de la protección a tierra que depende en gran parte de la conductividad del suelo.

Con el resultado obtenido, la tensión de paso se define como la diferencia de potencial sobre la superficie entre dos puntos distantes, se puede expresar la ecuación de tensión de la siguiente manera:

$$\Delta U_p = U_{p1} - U_{p2} = \frac{(I * \rho)}{(2\pi x^2 + 2\pi x)}$$

Donde:

$\rho$  = resistividad eléctrica del terreno ( $\Omega.m$ )

$I$  = corriente de impacto de rayo (A)

$x$  = distancia donde se requiere determinar la tensión de paso y el punto de ubicación del electrodo de captación (m)

Un análisis con una resistividad eléctrica del orden de los 200  $\Omega.m$ , 400  $\Omega.m$  y 600  $\Omega.m$  con un impacto de rayo de 42 kA, y sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene el siguiente resultado.

En la tabla III establece la importancia que los equipos estén conectados a la misma referencia a tierra, caso contrario tendrán el riesgo de que fallen por arcos eléctricos que saltarán entre masas de diferente potencial al momento de existir una descarga atmosférica, se debe considerar que la descarga de un rayo genera una evaporación del agua que contiene la tierra a su alrededor provocando que el valor de resistividad propia de la tierra pierda sus propiedades.

Tabla III. **Muestreo de datos del impacto de rayo a tierra física a diferente resistividad del terreno**

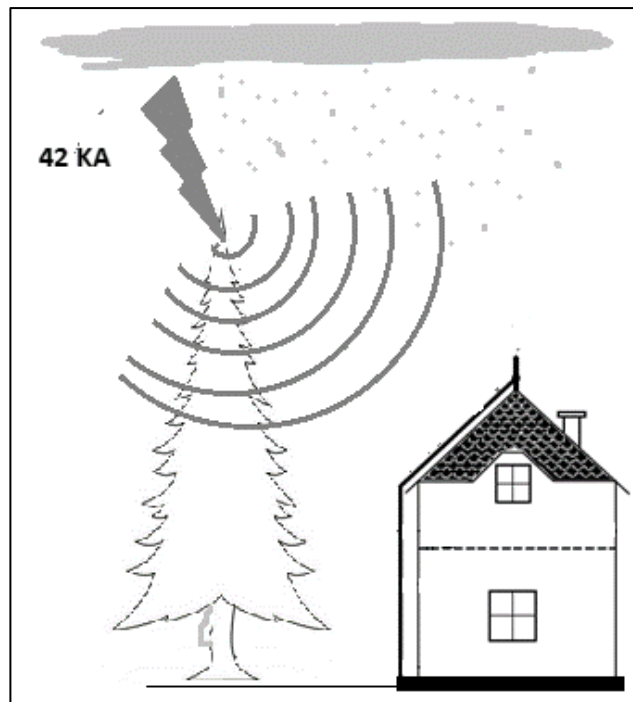
Distancia X(m)	Tensión (kV) de paso	Tensión (kV) de paso	Tensión (kV) de paso
	$\rho = 200 \Omega.m$	$\rho = 400 \Omega.m$	$\rho = 600 \Omega.m$
1	668,45	1 336,90	2 005,35
5	44,56	89,13	133,69
10	12,15	24,31	36,46
15	5,57	11,14	16,71
20	3,18	6,37	9,55
25	2,06	4,11	6,17
30	1,44	2,88	4,31
40	0,82	1,63	2,45
50	0,52	1,05	1,57
60	0,37	0,73	1,10
70	0,27	0,54	0,81
80	0,21	0,41	0,62
90	0,16	0,33	0,49
100	0,13	0,26	0,40
125	0,08	0,17	0,25
150	0,06	0,12	0,18
175	0,04	0,09	0,13
200	0,03	0,07	0,10
250	0,02	0,04	0,06

Fuente: elaboración propia.

#### 1.1.1.4. Inducción magnética por rayo a distancia

La inducción magnética por rayo a distancia tiene el mismo principio que la inducción magnética a una estructura, aunque su efecto de sobretensión esta asociado a la distancia.

Figura 5. Inducción magnética por rayo a distancia



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

Este efecto de inducción magnética puede verse en la tabla I, si se analiza el paso 4 de la tabla I con una corriente de rayo de 42 kA a distancias de 20 m, 50 m y 100 m de un conductor se obtiene el resultado de la tabla V.



Tabla IV. **Datos para el análisis**

Voltaje Inducido	Parámetros del Análisis
$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_o * S}{2\pi r} * \frac{di}{dt}$	$\mu_o = 4\pi * 10^{-7} H/m$ $di = 42 \text{ KA}$ $dt = \text{velocidad de la luz}$ $S = 1,072^{-04} m^2$ $r = 20m, 50m \text{ y } 100m$

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Resultados del análisis**

<p>Para r = 20 m</p> $\frac{d\phi}{dt} = V = \frac{4\pi * 10^{-7} * 1,072^{-04}}{2 * 3,14 * 20} * \frac{42\ 000}{8 * 10^{-6}}$	<p>V = 39 V</p>
<p>Para r = 50 m</p> $\frac{d\phi}{dt} = V = \frac{4\pi * 10^{-7} * 1,072^{-04}}{2 * 3,14 * 50} * \frac{42\ 000}{8 * 10^{-6}}$	<p>V=15,90 V</p>
<p>Para r = 100 m</p> $\frac{d\phi}{dt} = V = \frac{4\pi * 10^{-7} * 1,072^{-04}}{2 * 3,14 * 100} * \frac{42\ 000}{8 * 10^{-6}}$	<p>V= 7,95 V</p>

Fuente: elaboración propia.

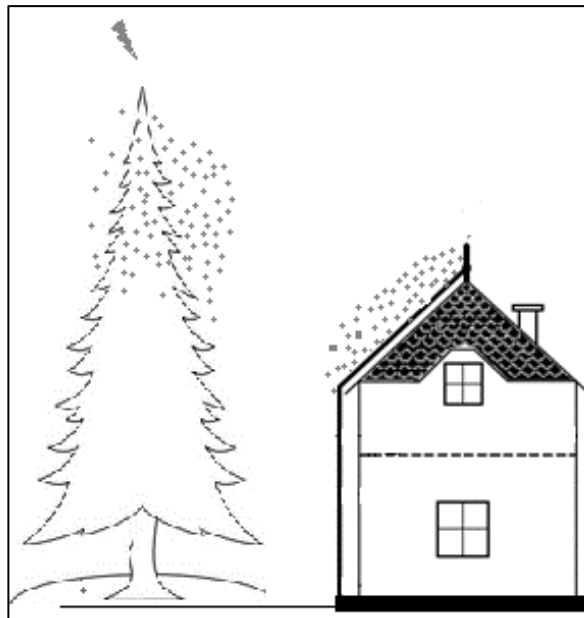
El resultado de la tabla V muestra que la inducción magnética por rayo es variable y que la sobretensión depende de la distancia y que a mayor distancia menor será el efecto del rayo.

#### 1.1.1.5. Sobretensión por campo electrostático

La sobretensión se produce en un entorno completamente seco, la acumulación de cargas crean un campo electrostático que genera una descarga eléctrica que dependerá de las características óhmicas de los cuerpos.

Este fenómeno es peligroso especialmente para equipos electrónicos, la presencia de este tipo de sobretensión puede dejar fuera de servicio un proceso crítico en la industria, por la existencia de equipo electrónico utilizado en diferentes procesos.

Figura 6. **Sobretensión por campo electrostático**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

Tabla VI. **Análisis del principio de la sobretensión electrostática**

No.	Ecuación	Descripción
1	$\vec{F} = k \frac{q1 * q2}{r^2} \vec{r}$	Se basa en la ley de Coulomb que establece que la fuerza electrostática entre dos cargas eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que a ellas las separa.
2	$w = \oint \vec{F} * \vec{dl} = 0$	Por ser una energía conservativa.
3	$w = -\Delta U$	El trabajo es igual al cambio de energía potencial.
4	$\vec{F} = q * \vec{E}$	Fuerza es igual al campo eléctrico por unidad de carga.
5	$w = \int_c \vec{F} * dl$ $w = \int_c q \vec{E} * dl$ $\frac{w}{q} = \int_c \vec{E} * dl$ $\frac{-\Delta U}{q} = \int_c \vec{E} * dl$ $\frac{\Delta U}{q} = - \int_c \vec{E} * dl$ $\frac{\Delta U}{q} = -\Delta V$	Con las ecuaciones No. 2 al No. 4, se puede ver cuál es el principio y determinar la diferencia de potencial entre dos puntos distantes.

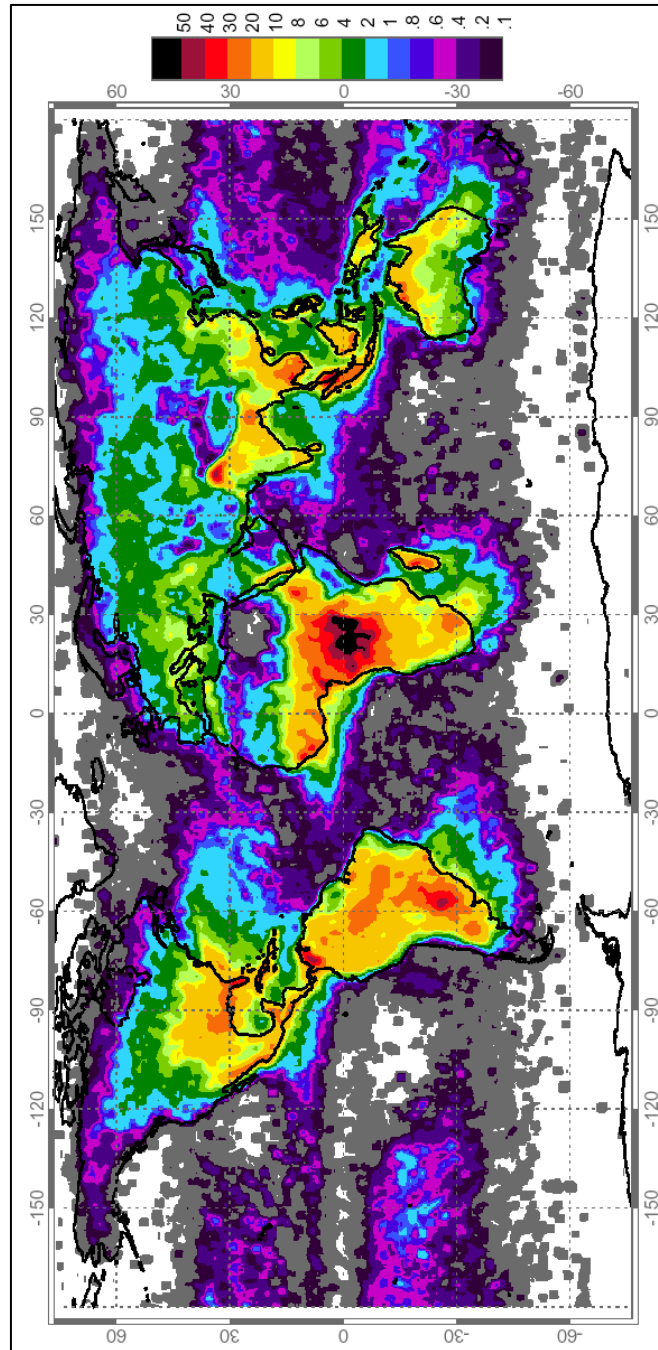
Fuente: elaboración propia.

El resultado establece que las sobretensiones electrostáticas pueden ser muy peligrosas si no se tiene la protección adecuada y óptima para los equipos especialmente electrónicos.

En el sitio oficial de la nasa, da a conocer un nuevo sistema del rayo gracias a dos detectores basados en satélites, el Detector Óptico Transitorio (OTD) y el Sensor de Imágenes de Relámpagos (LIS). Estos sensores ópticos utilizan cámaras de alta velocidad para buscar cambios en las cimas de las nubes, mediante el análisis de una banda de longitud de onda estrecha, se pueden detectar relámpagos breves. El desarrollo de detectores ópticos espaciales fue un gran avance, dando a los científicos la primera imagen completa de la actividad de rayos y de allí que nuevos sistemas mundiales de detección de rayos está reemplazando los tradicionales mapas isoceráunicos por los mapas de densidad de rayo, estos cambios dan un mayor análisis del rayo y una mejor forma de predecir el lugar donde caerá el relámpago. En lugar de limitarse al número de tormentas por día, estos nuevos mapas describen la densidad de rayos o destellos de tierra sobre una base mensual o anual.

La figura 7, muestra los datos de los sensores ópticos espaciales y revelan la desigualdad de distribución de la caída de rayos en todo el mundo. Unidades flashes/km<sup>2</sup>/año. Puede observarse que la región de Centro América, especialmente Guatemala tiene un alto índice de densidad de rayos en el mundo.

Figura 7. Mapa mundial de densidad de rayo



Fuente: [http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast05dec\\_1/](http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast05dec_1/).

Consulta: 10 de marzo de 2014.

### **1.1.2. Sobrevoltaje por maniobra**

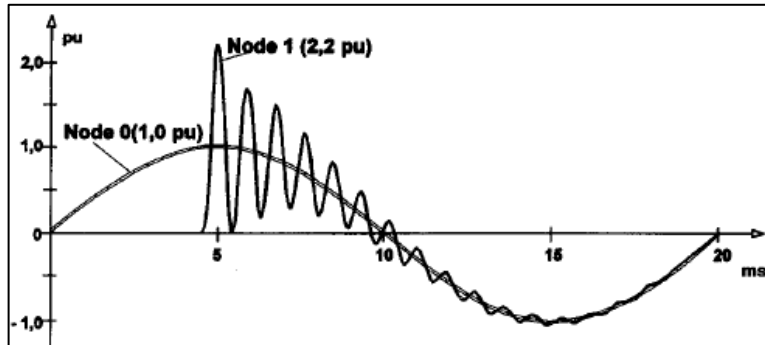
Toda conmutación en una instalación eléctrica es seguida por un fenómeno transitorio, este fenómeno produce sobretensiones. Una operación de conmutación, el inicio de un fallo o la interrupción producen voltajes elevados.

Las sobretensiones por maniobra, tiene tiempos cortos de duración que oscilan entre en el orden de los microsegundos y nanosegundos, los medios por donde se generan las sobretensiones por maniobra son:

#### **1.1.2.1. Sobretensiones menores y múltiples**

- Sobretensiones menores, ocurre cerca del punto de interés, como el apagado de luces o equipos de un hogar.
- Sobretensiones múltiples, ocurre cerca del punto de interés, y son provocadas por la conmutación de contactores de aire o relevadores de mercurio que producen transitorios de voltaje con forma de ondas complejas y amplitudes mayores a las nominales.

Figura 8. **Sobretensión común por maniobra**

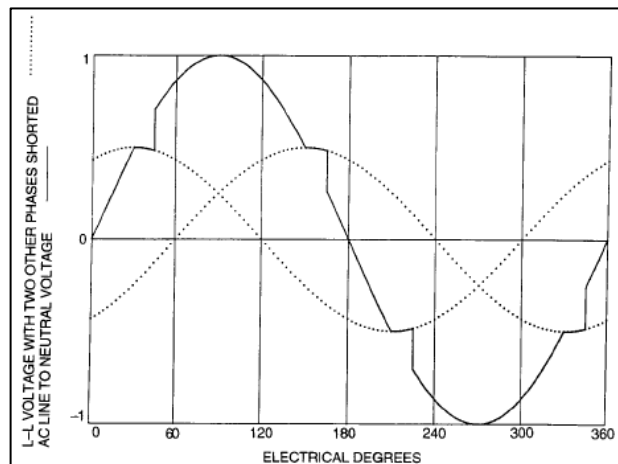


Fuente: IEEE Std C62.41.1, 2002. p. 9.

### 1.1.2.2. **Transitorios periódicos**

Sobretensión que ocurre cada ciclo durante la operación de convertidores electrónicos de potencia, debido al corto circuito momentáneo entre fases con una duración aproximada de 100  $\mu$ s.

Figura 9. **Sobretensión por convertidores electrónicos**



Fuente: IEEE Std 519, 1992.

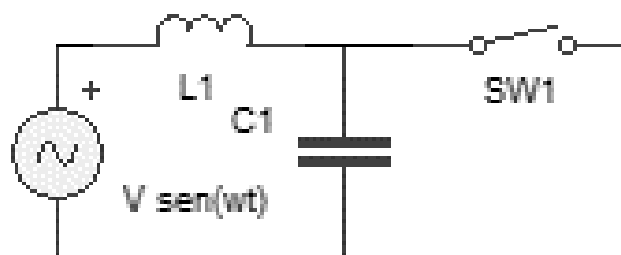
### 1.1.2.3. Transitorios por fallas, despeje de fallas, energización de líneas

Sobretensión causada en el inicio y en el despeje de la falla por el cambio de la tensión de operación a sobretensión temporal en las fases que funcionan correctamente y el retorno de un valor cercano a cero de la tensión de operación de la fase fallada, al igual que las fallas la energización trifásica de una línea produce sobretensiones de maniobra en las tres fases de la línea.

De manera que cada operación de maniobra produce tres sobretensiones fase a tierra y tres sobretensiones fase a fase.

El análisis que se realizará es obtener la expresión matemática que modele la liberación de falla de un circuito LC, tal y como se observa en la figura 10, utilizando el método de inyección de corriente para la apertura del circuito para calcular el voltaje a través del capacitor.

Figura 10. Circuito LC

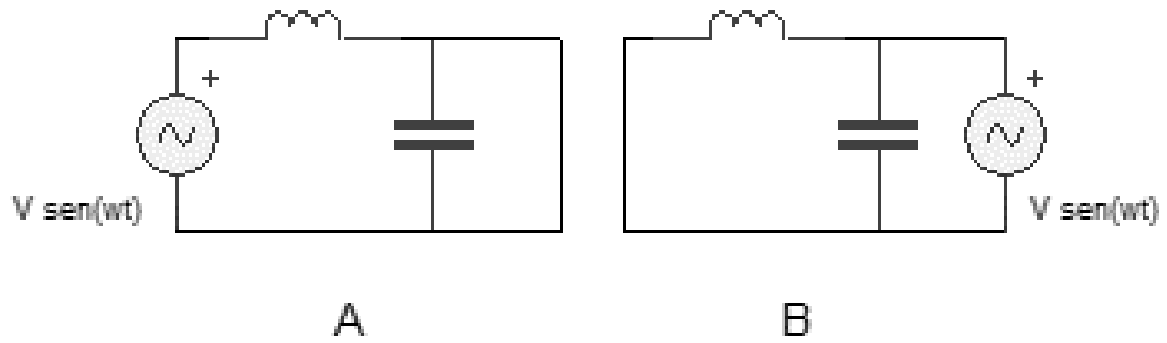


Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

Tomando en consideración el método de superposición para inyección de corrientes se tienen los siguientes circuitos.

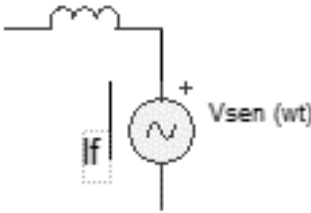


Figura 11 **A) capacitor en cortocircuito B) fuente equivalente**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

Tabla VII. Análisis del voltaje del capacitor

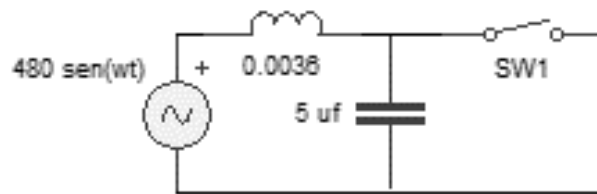
No.	Ecuación
1	<div style="text-align: center;">  </div> $I_f = \frac{V}{X_l} = \frac{V}{\omega L} \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right)$ $Z_t = \frac{L * C}{L + C} = \frac{\frac{1}{sC} * sL}{\frac{1}{sC} + sL} = \left( \frac{sL}{s^2 LC + 1} \right)$ $Z_t = \left( \frac{sL}{s^2 LC + 1} \right) = L\omega_o^2 \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) = \frac{1}{C} \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right)$ $V_c = Z(s)t * I_f(s) = \frac{V}{\omega L} \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \right) * \frac{1}{C} \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right)$ $V_c = \frac{V}{\omega LC} * \left( \frac{\omega}{s^2 + \omega_o^2} \right) * \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right)$ $V_c = \frac{V}{LC} * \left( \frac{1}{s^2 + \omega_o^2} \right) * \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right)$ $V_c = \frac{V}{LC} * \left( \frac{s}{(s^2 + \omega_o^2) * (s^2 + \omega^2)} \right)$ $V_c = \frac{V}{LC} * \left( \frac{1}{\omega_o^2 - \omega^2} \right) \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_o^2} \right)$ $V_c = \frac{V}{LC} * \left( \frac{1}{\frac{1}{LC} - \omega^2} \right) \left( \frac{s}{s^2 + \omega^2} - \frac{s}{s^2 + \omega_o^2} \right)$ $V_c = \left( \frac{V}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}} \right) (\cos \omega t - \cos \omega_o t)$

Fuente: elaboracion propia.

En tabla VII, determina la expresión del capacitor del despeje de la falla, primero se obtiene la fuente equivalente para el circuito B y se determina la impedancia equivalente, tomando en consideración que  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , el circuito A, el voltaje del capacitor  $V_c = 0$ , con el resultado de la corriente e impedancia equivalente se determina el voltaje del capacitor.

Al analizar el circuito 12, con una inductancia de 0,0036 H y una capacitancia de 5  $\mu\text{f}$  en un sistema 480V, el resultado del gráfico 12, donde el valor del voltaje pico en una fase es de 392,3 V.

Figura 12 **Circuito LC**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

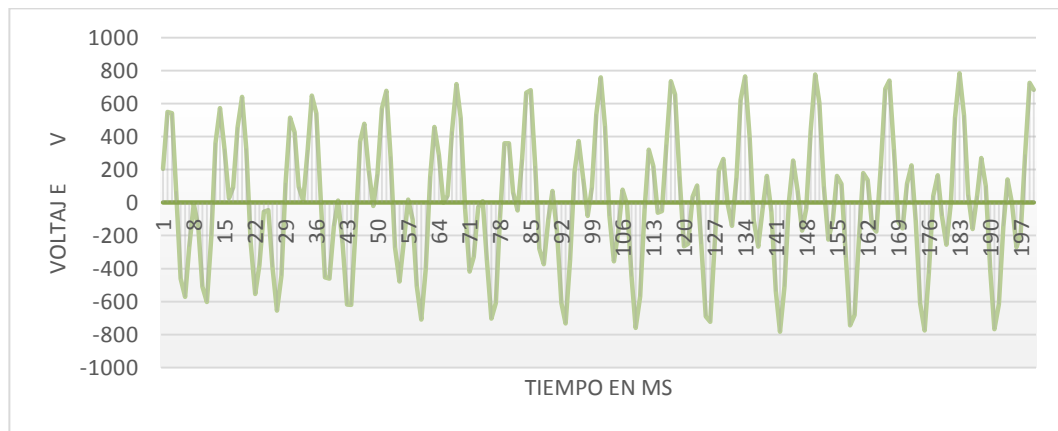
$$V_c = \left( \frac{392,3}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_o^2}} \right) (\cos \omega t - \cos \omega_o t) = \frac{392,3}{1 - \frac{377^2}{\left( \frac{1}{0,0036 * 0,00005} \right)^2}} (\cos 377t - \cos 7433,56t)$$

$$V_c = 393,306 * (\cos 377t - \cos 7433,56t)$$

Al conocer los valores de inductancia y capacitancia de la red, se puede determinar gráficamente el comportamiento de la liberación de la falla utilizando el programa Excel de Microsoft y el resultado es la figura 13, en donde se

observa el voltaje en el capacitor en función del tiempo y la corriente de inserción en función del tiempo.

Figura 13. **Comportamiento del voltaje en el capacitor**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

#### 1.1.2.4. **Interrupción de corrientes capacitivas e inductivas**

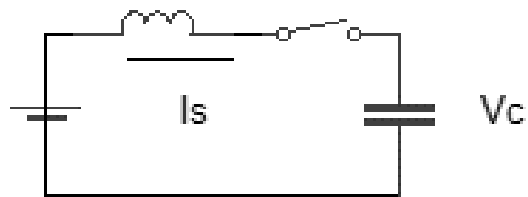
La maniobra de corriente capacitiva e inductiva genera sobretensiones peligrosas al sistema, las maniobras que requieren análisis antes de hacerlas están, interrupción de corriente de arranque de motores, la desconexión de un reactor, operación de hornos eléctricos y sus transformadores, maniobra de banco de capacitores.

La sobretensión que se deriva por la desconexión de un banco de capacitores es similar a la una línea de transmisión, se debe de determinar primero la fuente de la inductancia y la diferencia radica en el cálculo de la capacitancia, la cual se obtiene a partir de la potencia del banco de capacitores

representada por fase. Al energizar se presenta un transitorio por corriente de inserción que hace que se presente una sobretensión en el banco.

Si se analiza el circuito de la figura 14, se obtendrá las ecuaciones de la corriente de inserción y el voltaje que aparece al cerrar el banco de capacitores.

Figura 14. **Representación de circuito LC**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

Tabla VIII. Ecuación de corriente de inserción y voltaje en un capacitor

No.	Ecuación
1	$Vc(t) = \frac{1}{C} \int i * dt = I(s) * \frac{1}{sC}$ $I(s) = \frac{V}{Z_o} = \left( \frac{\omega_o}{s^2 + \omega_o^2} \right), \text{ donde } \omega_o^2 = \frac{1}{LC} \text{ y } Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}}$ $Vc(s) = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{\omega_o}{s^2 + \omega_o^2} \right) * \frac{1}{sC} = \frac{V\omega_o}{C\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{s}{s(s^2 + \omega_o^2)} \right)$ $Vc(s) = \frac{1}{\sqrt{LC}} * \frac{V}{C\sqrt{\frac{L}{C}}} \left( \frac{s}{s(s^2 + \omega_o^2)} \right) = \frac{V}{LC} * \left( \frac{s}{s(s^2 + \omega_o^2)} \right)$ $Vc(s) = V\omega_o^2 * \left( \frac{s}{s(s^2 + \omega_o^2)} \right) = Vc(t) = V(1 - \cos\omega_o t)$ <p>La corriente de inserción, está dada por:</p> $I(t) = \frac{V}{Z_o} \text{sen}\omega_o t$

Fuente: elaboración propia.

Con las ecuaciones de la tabla XI, se puede determinar la corriente de inserción de un banco de capacitores de 300 KVAR en un sistema 480 V, tomando en consideración una inductancia de 0,0004 H, se calcula el valor de capacitancia a partir del valor de la potencia del banco.

Tabla IX. **Desarrollo de la reactancia capacitiva**

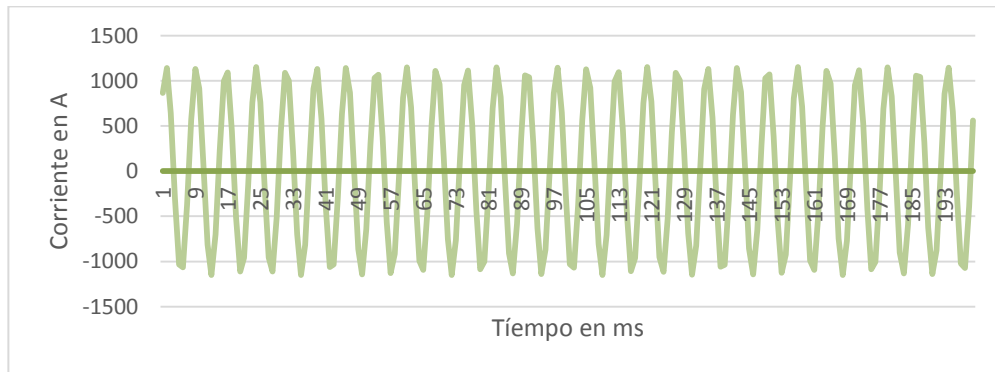
No.	Ecuación
1	$I(t) = \frac{V}{Z_o} \text{sen}\omega_o t$ <p>La capacitancia</p> $Q = \frac{V^2}{X_c} \quad X_c = \frac{V^2}{Q} = \frac{480^2}{300\,000} = 0,768 \, \Omega$ $X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{377 * 0,768} = 0,003454$ $Z_o = \sqrt{\frac{0,0004}{0,003454}} = 0,3403 \, \Omega$ $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,0004 * 0,003454}} = 850,765$ <p>La corriente de inserción, está dada por:</p> $I(t) = \frac{480 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{0,3403} \text{sen}(850,765t)$ <p>El voltaje en el capacitor está dado por:</p> $V_c(t) = 480 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (1 - \cos(850,765t))$

Fuente: elaboración propia.

Con el resultado de la tabla IX, donde se obtuvo la ecuación que describe el comportamiento de la corriente de inserción del banco y el voltaje del capacitor en función del tiempo, ambas ecuaciones son graficadas en función

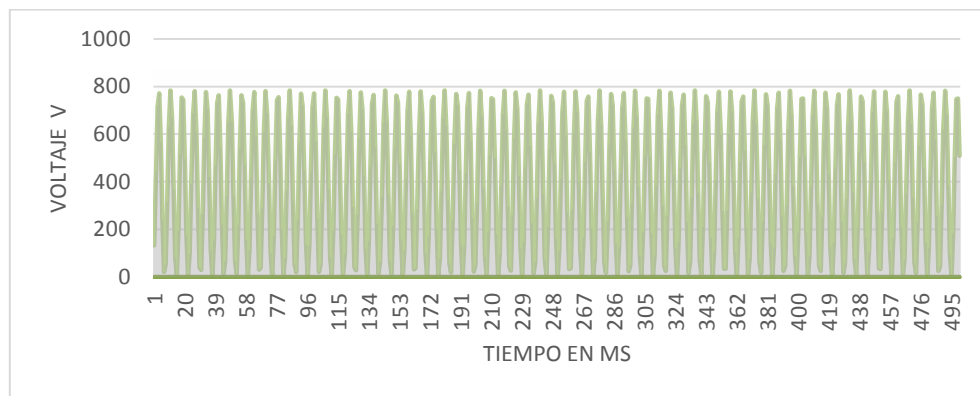
del tiempo utilizando el programa de Excel de Microsoft y el resultado es la figura 15 y 16.

**Figura 15 Corriente de inserción del capacitor**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

**Figura 16 Voltaje en el banco de capacitores**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

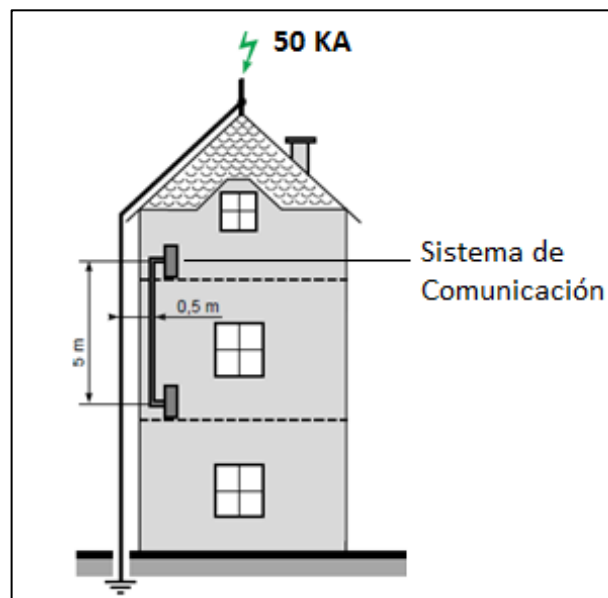


### 1.1.3. Sistema de múltiple interacción

Se generan por la interacción de múltiples sistemas son consecuencia de la mala instalación y estudio del cableado de potencia o control, dando lugar a que se provoque una sobretensión en el sistema de control producto de la inducción magnética del sistema de potencia. Este sistema de control puede ser el de una planta telefónica, un sistema de comunicación en red entre equipos, sistema de alarma contra incendios, etc.

La mayoría de veces es atribuida a una subida de tensión en la línea de alimentación del sistema, sin considerar que la inducción la está inyectando el sistema de potencia al sistema de control, ver figura 17.

Figura 17. Representación de interacción entre sistemas



Fuente: Cuaderno técnico No. 177, perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra. p.13.

Para determinar cuál sería el voltaje inducido en una instalación, se analiza el impacto de un rayo en la figura 17, este impacto de rayo se conduce a través de un conductor a tierra y el cable de conducción está cerca de una línea de señal de 5 metros instalada a 50 cm de distancia de dicho cable.

Los pasos a seguir son los de la tabla I, este caso toma como referencia el calibre del conductor de sistema de control, la superficie del cable de señal, será:  $S = l * l_o = 5 * 0,005 = 0,025 m^2$ .

Donde:

$l$  = longitud de cable

$l_o$  = separación entre los dos conductores de la línea de señal.

$di = 50KA$  corriente de rayo que impacta al edificio

$dt = 8 * 10^{-6}s$  velocidad de la luz

Sustituyendo valores:

$$V = \frac{\mu_o * S}{2\pi r} * \frac{di}{dt}$$

$$V = \frac{4\pi * 10^{-7} * 0,025}{2\pi * 0,5} * \frac{50ka}{8 * 10^{-6}} = 60V$$

El voltaje inducido en la línea de señal es 60 V, esta tensión se sobrepone al voltaje de alimentación de la carga, lo cual interfiere en la línea de alimentación y llega a causar daños en equipos electrónicos.

La solución es evitar los recorridos cercanos entre una línea de distribución de energía eléctrica y un sistema de comunicación, si no hay espacio físico y es necesario que circule cerca, colocar todas las protecciones en el sistema que se desea proteger.

## **1.2. Propagación de transitorio**

Provocada por un rayo que aparece en un circuito, ya sea por acoplamiento directo o por acoplamiento inductivo, ambos mecanismos producen una tensión que para fines prácticos puede considerarse como el voltaje de fuentes.

La propagación de un transitorio por rayo es más severo en un acoplamiento directo que en un inductivo, las operaciones por maniobra en el sistema de distribución o las maniobras en el circuito de la industria, provoca que los transitorios se propaguen en el sistema llegando a diferentes puntos críticos donde dañan equipos electrónicos.

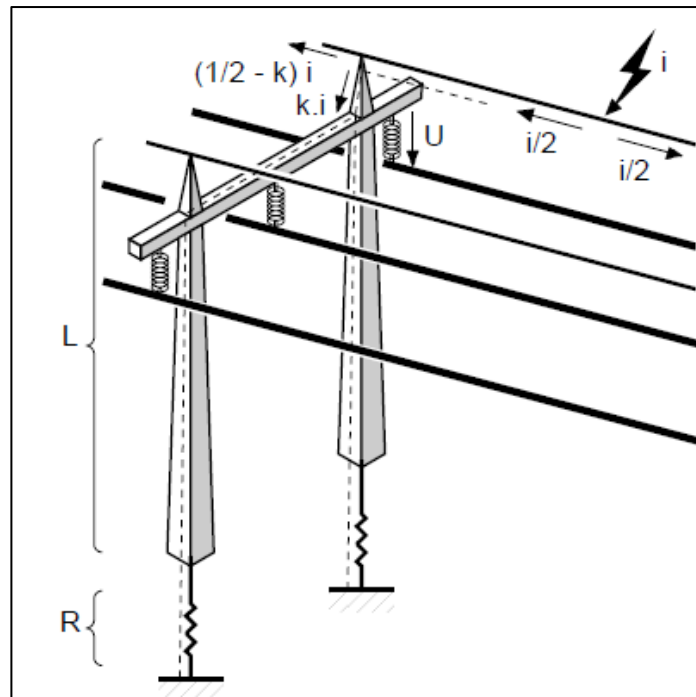
### **1.2.1. Propagación de sobrevoltaje**

Para comprender como se propaga un impacto de rayo sobre el hilo de guarda de un sistema de distribución, se analiza la figura 10, la circulación de la corriente de rayo hacia tierra provoca una elevación del potencial de las estructuras metálicas, la principal causa de la deformación de las sobretensiones transitorias en las líneas de trasmisión es por efecto corona, que son las perdidas por ionización del aire que envuelve al conductor.

Los extremos de la torre alcanza un potencial que depende de su inductancia propia  $L$  y de la resistencia de tierra  $R$  al pie de la torre y parte de la corriente se propaga sobre las fases, la velocidad de propagación dependerá del estado dieléctrico que envuelve al conductor y la frecuencia del sistema, alrededor de 300 000 km/s, este valor por ser la velocidad de la luz.

$$V(t) = R * i(t) + L * \frac{di(t)}{dt}$$

Figura 18. **Propagación de onda de rayo al sistema de distribución**



Fuente: Cuaderno técnico No. 168. El rayo y las instalaciones eléctricas en AT. p. 11.

El impacto de un rayo genera alta frecuencia, algunas decenas de kHz o MHz en comparación a la frecuencia industrial de 60 Hz, la propagación en un edificio es similar a la propagación en una línea de transmisión, los sobrevoltajes siguen siendo eventos de muy corta duración.

### **1.3. Formas de mitigar los efectos de descargas atmosféricas**

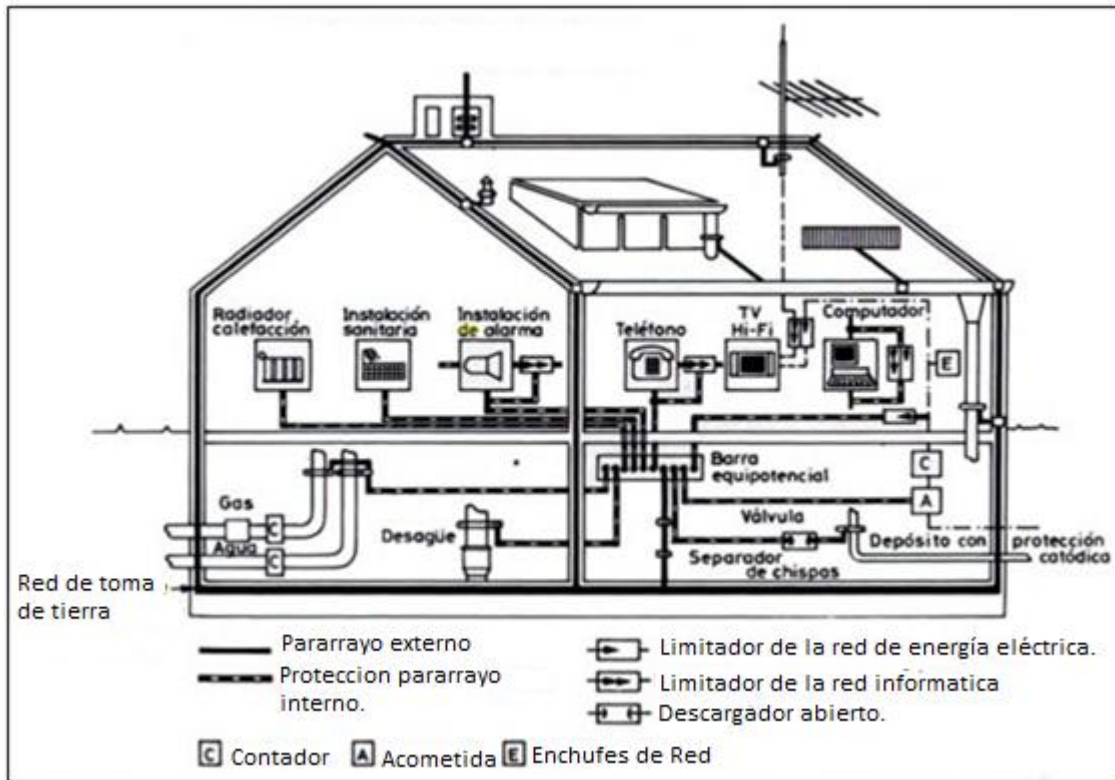
La mitigación de los efectos de rayo requiere responder a altas exigencia en cuanto a las instalaciones eléctricas de edificios, facilitando de la mejor manera posible la derivación de la corriente a tierra. Una protección contra rayo es más compleja de lo que al parecer se cree y va más allá de una simple instalación de un pararrayos, este problema no se puede resolver con una única protección al edificio, hay que tomar medidas que requieren una mayor inversión en equipos.

Se puede establecer una clasificación de tres niveles de protección contra efectos de sobretensiones, ya sea por descargas atmosféricas, sobretensiones por maniobra o múltiples interacciones entre sistemas.

- Primer nivel está compuesto por los sistemas de pararrayos, estructuras metálicas, tomas de tierra física.
- Segundo nivel está compuesto por la protección al sistema de alimentación del equipo y al equipo propiamente.
- Tercer nivel está compuesto por los sistemas de líneas de datos, comunicación, tarjetas electrónicas y equipos electrónicos.

La figura 19, detalla la protección primaria y secundaria que requiere un edificio para evitar la sobretensión por rayo, maniobra o interacción entre sistema.

Figura 19. **Protección primaria y secundaria en un edificio**

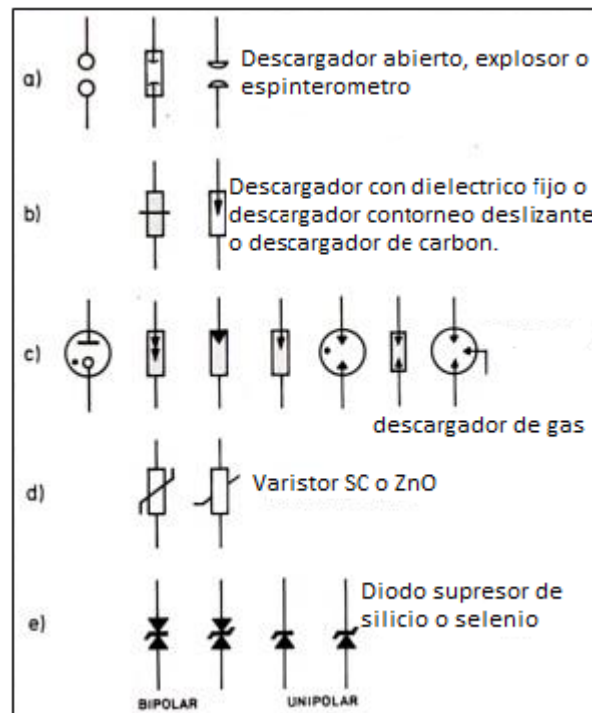


Fuente: BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. 1992. p. 214.

La protección contra efectos de sobretensión ha provocado la investigación de nuevas tecnologías que den la protección necesaria para reducir los efectos de la sobretensión, cada limitador tiene sus propias características internas que lo hacen especial para determinadas aplicaciones, ver figura 20, los limitadores se instalan donde se espera que pueda llegar un

impulso perturbador, de manera que la salida del limitador exista esa tensión máxima y no interfiera con el circuito.

Figura 20. Tipos de limitadores de sobretensión



Fuente: BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. 1992. p. 215.

Cuando se desea la protección secundaria y terciaria, implica alimentación del sistema, tarjetas electrónicas, equipo electrónico. En una protección secundaria, el limitador está expuesto a niveles altos de energía o niveles altos de intensidad de transitorios que están después del pararrayos y culminado con la protección terciaria.

Tabla X. **Características de los limitadores de sobretensión**

Tipo	Ventajas	Desventajas
Descargador Abierto, Explosor o chispero	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nula intensidad de fuga</li> <li>- Baja capacidad</li> <li>- Alta capacidad de disipación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tiempo de respuesta.</li> <li>- Su tensión de encendido depende de la presión atmosférica, la humedad y las impurezas del aire.</li> </ul>
Descargador de gas de contorno deslizante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nula intensidad de fuga</li> <li>- Baja capacidad</li> <li>- Alta capacidad de disipación.</li> <li>- Baja capacidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensión de encendido aprox. 2 kV</li> <li>- Tensión residual elevada</li> <li>- Riesgo de fuego.</li> </ul>
Descargador de carbón	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta corto</li> <li>- Alta capacidad de descarga</li> <li>- Bajo costo por Joule.</li> <li>- Baja capacidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensión residual elevada</li> <li>- Alto costo de mantenimiento</li> <li>- Riesgo de fuego</li> <li>- Tensión nominal (300 a 900) con amplia dispersión al valor nominal.</li> </ul>
Varistor de óxido de zinc	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta rápido</li> <li>- Mejor costo por Joule.</li> <li>- Buena fiabilidad</li> <li>- Baja intensidad de fuga.</li> <li>- Disponibilidad de tensiones de limitación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala disipación de energía.</li> <li>- Envejecimiento rápido.</li> <li>- Alta capacidad.</li> <li>- Mala resistencia al calentamiento</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.



Tabla XI. **Seguimiento tabla X características de los limitadores de sobretensión**

<b>Tipo</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Varistor de carburo de silicio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta lento</li> <li>- Alta capacidad de disipación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta capacidad de fuga.</li> <li>- Alta capacidad.</li> <li>- Alta tensión de limitación.</li> </ul>
Diodo supresor de silicio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta rápido</li> <li>- Alta fiabilidad.</li> <li>- Baja intensidad de fuga.</li> <li>- Disponibilidad de tensiones</li> <li>- Tiene el mejor factor de limitación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala disipación de energía</li> <li>- Alto costo joule</li> <li>- Corriente admisible limitada.</li> </ul>
Filtro resistencia condensador RC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absorbe eficazmente las sobretensiones de baja energía.</li> <li>- Dimensiones reducidas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplicación limitada a ciertos tipos de sobretensiones.</li> </ul>
Filtro inductancia condensador LC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Respuesta rápida a onda transitoria.</li> <li>- Atenúa eficazmente las sobretensiones de frecuencia predeterminadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Corriente admisible limitada.</li> <li>- Puede oscilar espontáneamente</li> <li>- No afecta a las sobretensiones de frecuencia diferente a la predeterminada.</li> </ul>
Diodo supresor de selenio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Buen costo relativo por joule.</li> <li>- Mejor que el supresor diodo de silicio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Factor de limitación pobre.</li> <li>- Baja disponibilidad de tensiones de limitación.</li> <li>- Baja fiabilidad y alto calentamiento.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Seguimiento tabla XI características de los limitadores de sobretensión**

Tipo	Ventajas	Desventajas
Diodo Zener convencional	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja intensidad de fuga.</li> <li>- Baja capacidad</li> <li>- Tiempo de respuesta medio.</li> <li>- Tensión de limitación precisa.</li> <li>- Bajas tensiones de limitación</li> <li>- Larga vida si no hay excesos</li> <li>- Seguridad inherente al CC.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja tensión de limitación</li> <li>- Baja capacidad de disipación.</li> <li>- Alta capacidad.</li> <li>- Alto costo por joule.</li> <li>- Estrictamente no es un limitador de picos de sobretensiones.</li> </ul>
Descargador de gas (cerrado)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disipación de energía elevada.</li> <li>- Buena resistencia al calentamiento.</li> <li>- Alta resistencia</li> <li>- Baja capacidad.</li> <li>- Tolerancia al funcionamiento muy pequeño.</li> <li>- Varias tensiones limitadas.</li> <li>- Larga vida.</li> <li>- Nula intensidad de fuga.</li> <li>- Resistencia baja de conducción.</li> <li>- Mejor vida en los bloques de carbón.</li> <li>- Seguridad inherente por corto circuito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de respuesta alto.</li> <li>- Alto costo</li> <li>- Baja tensión de descebado</li> <li>- Baja capacidad.</li> <li>- Tiene intensidad de seguimiento</li> <li>- Si tiene fugas puede aumentar su tensión.</li> <li>- La tensión de encendido depende de la pendiente del impulso de sobretensión.</li> <li>- No son autos extingüibles.</li> </ul>

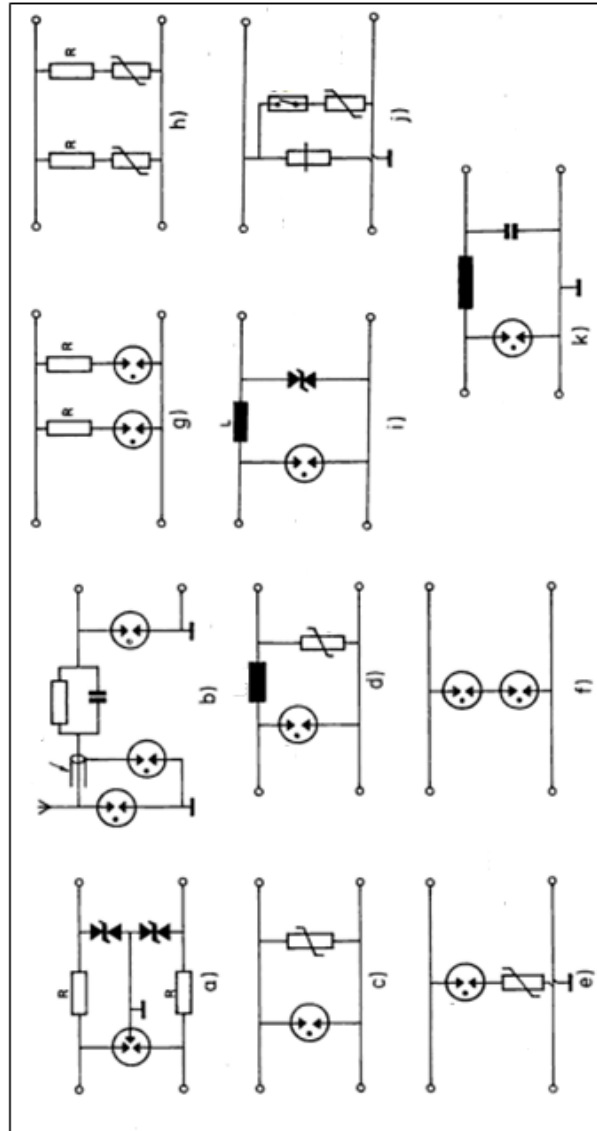
Fuente: elaboración propia.

Los medios de protección secundaria de la figura 21 describen su funcionamiento y aplicaciones para 11 tipos de limitadores, estos son:

- (a) Protección en líneas datos y comunicación en modo común.
- (b) Protección de antenas de alta frecuencia, debido al posible impacto de rayo directo que genere una sobretensión en modo en modo común.
- (c) Protección ideal para líneas de red por su facilidad de gran absorción de corriente sin necesidad de llegar a la alta tensión de encendido.
- (d) Protección que facilitar una conmutación de sobrecorriente del varistor al descargador de gas.
- (e) Protección que evita la corriente de seguimiento de la red.
- (f) Protección que extingue la intensidad de seguimiento de red pero tiene mala respuesta.
- (g) Capacidad energética de limitación de sobretensiones mayor, pero tiempo de respuesta lento.
- (h) Capacidad energética de limitación de sobretensiones mayores, pero tiempo de respuesta mayor que él (g).

- (i) Protección para líneas de comunicaciones, con el inconveniente de que en el caso de impulso de sobretensión con tiempos de subida lentos, la limitación se concentra en el diodo supresor.
- (j), Los descargadores de contorno deslizante extinguen independiente la corriente secuencial de la red.
- (k) Circuito básico de protección en modo común con descargador de gas y filtro LC.

Figura 21. Circuitos de protección secundaria



Fuente: BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, 1992.

p. 122.

## **2. TECNOLOGÍA DE SUPRESORES**

### **2.1. Funcionamiento de un supresor de transitorios**

Un supresor tiene una resistencia no lineal internamente, independientemente de la tecnología que se utilice, esta resistencia tiene un cambio extremadamente grande a una pequeña variación de voltaje, cuando el supresor está en su funcionamiento normal, es decir no existe ninguna sobretensión en el sistema, el equipo se comporta como un circuito abierto en la instalación con una resistencia muy elevada provocando que la corriente sea muy débil.

La resistencia depende esencialmente de la tensión que está en sus bornes, al crearse una sobretensión, la tensión de entrada del supresor será mayor, momento en cual el valor de la resistencia se vuelve nula y el supresor actúa como un cortocircuito y la corriente empieza a drenarse al sistema de tierra física provocando que el voltaje disminuya.

Al voltaje en los bornes se denomina nivel de protección, los supresores de transitorios se caracterizan por una corriente de descarga mayor que puede soportar el limitador una sola vez y diferentes valores de niveles de protección.

Los supresores de transitorios se instalan en paralelo al sistema de distribución de energía.

## **2.2. Tecnología de los limitadores de sobretensiones**

Diferentes tipos de tecnología de protección contra transitorios utilizados por fabricantes para la mitigación de las sobretensiones son las siguientes:

- Diodo Supresor de silicio
- Descargador de Gas
- Varistor de Oxido de Metal (MOV)

Para evaluar el tipo de tecnología y el tipo de supresor es necesario tomar en consideración ciertos puntos o características, entre los cuales están:

- Energía que disipa el supresor, temperatura de funcionamiento, dimensiones, corriente de fuga, tiempo de respuesta y la capacidad del supresor.
- El nivel de protección cuya relación es la tensión de limitación a una corriente muy pequeña y el máximo voltaje durante ciertas condiciones específicas.
- El voltaje disponible en el supresor y sus respectivas configuraciones en 3 hilos monofásico, 3 hilos trifásico o 4 hilos trifásico.

- La fiabilidad del supresor que cumpla con normativas, si el supresor funcionará a la temperatura exigida o bien si funcionará a la temperatura máxima que indica el fabricante.
- El supresor no debe de interferir con el funcionamiento óptimo del equipo.
- Durante su funcionamiento dinámico, el supresor cumpla con el nivel de tensión de seguridad.
- El supresor no debe de cambiar sus características dinámicas en el transcurso del tiempo.

### **2.2.1. Diodo supresor de silicio**

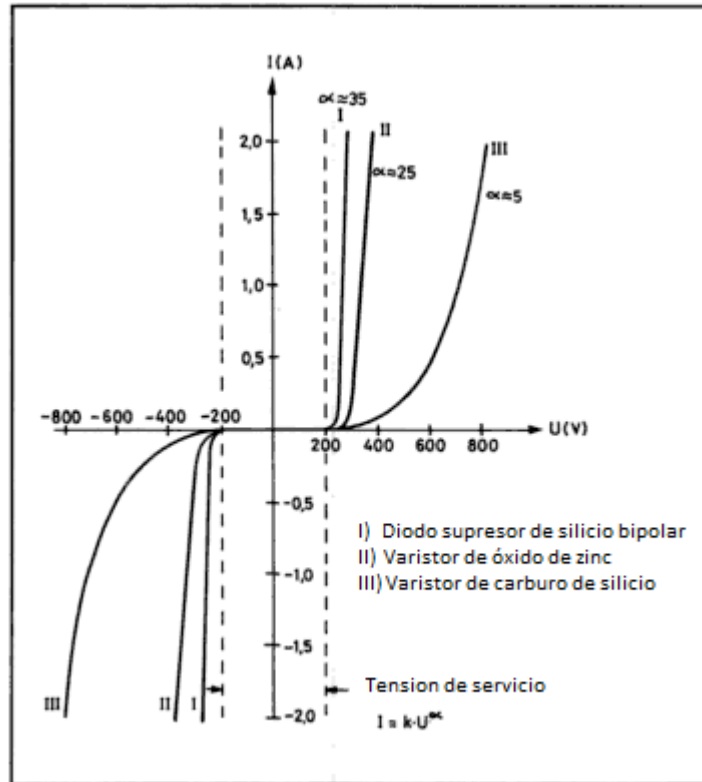
Es utilizado en líneas de datos y comunicación, aunque no se recomienda para uso de aplicaciones en corriente alterna de alta exposición debido a sus capacidades limitadas del manejo de energía ya que el supresor de silicio tiene una poca capacidad de disipación de calor.

La característica de un diodo de silicio es similar a un diodo zener, pero una mayor sección transversal, que es proporcional a su potencia nominal que puede soportar el supresor, a diferencia que los diodos zener están hechos para la regulación de voltaje y los diodos de silicio para la supresión de transitorios.

Tanto la tensión y la capacidad de potencia se puede aumentar colocando partes en serie o en paralelo.



Figura 22. Curva de un diodo de silicio bidireccional



Fuente: BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, 1992. p. 221.

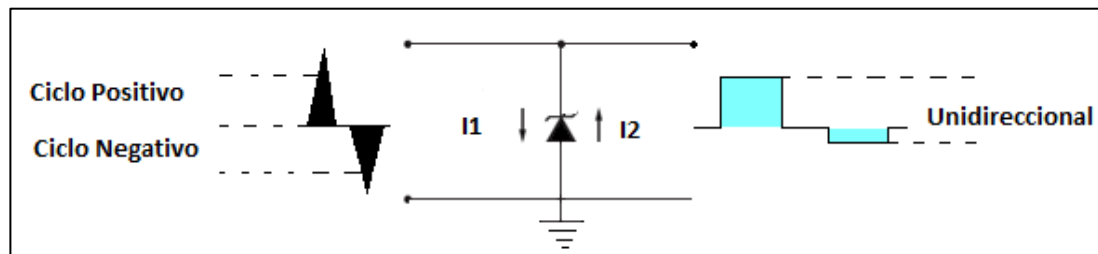
La figura 22 muestra el comportamiento de un diodo de silicio bidireccional que abarca ambas polaridades positiva y negativa al igual que las curvas del varistor óxido de zinc y carburo de silicio.

Los supresores con tecnología de silicio, pueden ser unidireccional o bidireccional, ambos dan la protección requerida al sistema que se desea proteger sin importar si se utiliza un supresor de silicio unidireccional o bidireccional.

### 2.2.1.1. Diodo supresor de silicio unidireccional vs bidireccional

El funcionamiento de un diodo de silicio unidireccional implica que durante el ciclo positivo del transitorio, el diodo se encuentra polarizado inversamente, con lo cual la corriente pueda circular al sistema de tierra física, cuando pasa el ciclo negativo, el diodo se encuentra polarizado directamente y solo necesita 0.6 V para romper la barrera de la unión y así pueda drenar a tierra física.

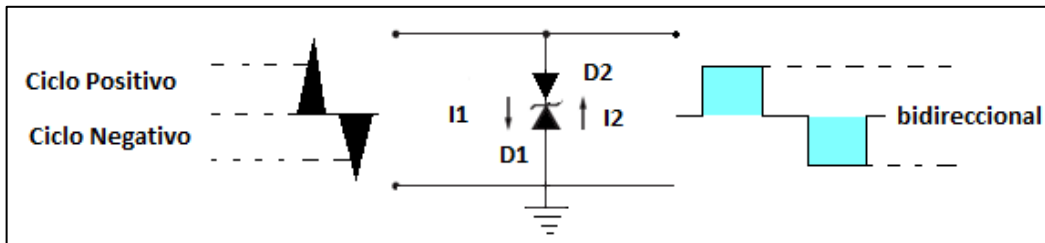
Figura 23. Comportamiento del diodo de silicio unidireccional



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

El supresor de silicio bidireccional opera similar al unidireccional en el ciclo positivo ya que se encuentra operando el diodo inversamente, cuando actúa en el ciclo negativo el diodo 1 está polarizado directamente, pero el diodo 2 está polarizado inversamente, provocando que la salida de la señal sea del mismo valor tanto en lado positivo como negativo.

Figura 24. **Comportamiento del diodo de silicio bidireccional**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

Los dispositivos bidireccionales son utilizados en aplicaciones en las que una configuración unidireccional no es suficiente.

Entre las ventajas de este limitador se encuentran:

- Tiempo de respuesta muy rápido
- Buen factor de limitación
- Baja intensidad de fuga
- Buenas características de funcionalidad
- Buena conducción

Los principales inconvenientes que presenta son:

- Mala disipación de energía
- Alto costo

### **2.2.2. Descargador de gas**

Está formado por un tubo de cerámica en el que se encuentran dos electrodos, internamente el tubo está lleno de gas por argón o neo que se encuentra a determinada presión cuando el voltaje en los electrodos alcanza un valor grande mayor al de encendido, se inicia un proceso de ionización en donde la resistencia de descarga cambia de un valor grande a un valor pequeño,

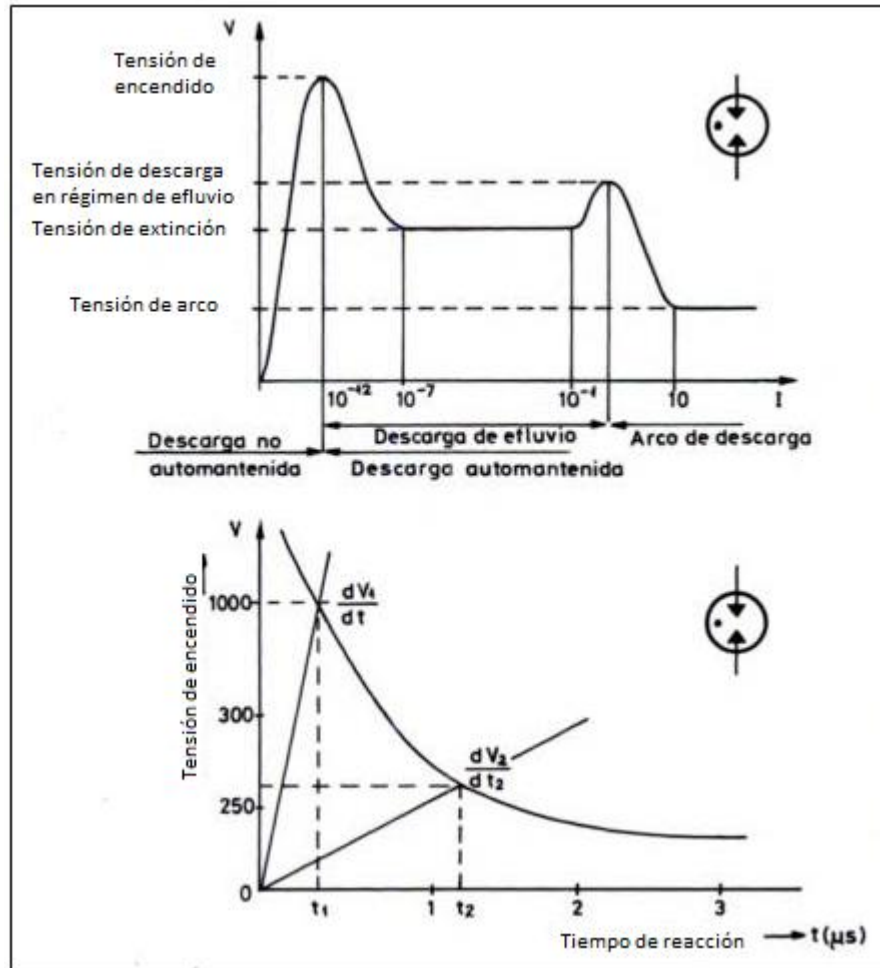
La curva característica de corriente y tensión del descargador de gas ver figura 25 (a) ayuda a determinar si después de extinguir un impulso de corta duración, el descargador puede interrumpir nuevamente el circuito, la posibilidad de que el gas permanezca ionizado depende de la tensión de servicio del sistema y corriente de seguimiento que es la intensidad que circula a través de este mientras esta descargando.

Si el descargador de gas no puede interrumpir la sobrecorriente generada por un transitorio, debe de instalarse un fusible entre el descargador de gas y la red o bien una combinación de tecnología para dar confiabilidad al sistema.

Si el disparo del descargador es rápido, el pico de tensión residual es grande para ser absorbido directamente por equipos electrónicos o equipos que estén a la intemperie, se requieren otros limitadores que sean capaces de resistir picos de tensión.

La tensión de cebado de los descargadores de gas depende de la pendiente de la tensión transitoria que se presente, a mayor sea la pendiente del impulso perturbador, mayor será la reacción del descargador de gas, ver figura 25 (b).

Figura 25. Comportamiento de un descargador de gas



Fuente: BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, 1992.  
p. 219.

Los descargadores de gas son limitadores adecuados para la protección de circuitos electrónicos, redes de telecomunicaciones.

Ventajas que presenta un descargador de gas:

- Alta disipación de energía
- Buena resistencia al calentamiento
- Alta resistencia
- Larga vida, sin alteración de sus características funcionales
- Baja resistencia de conducción
- Amplio margen de tensiones limitadoras

Inconvenientes que presenta el descargador de gas:

- Tiempo de respuesta muy largo
- Baja tensión de cebado
- Alto costo
- No son auto extingüibles
- Cuando la tensión continúa en sus bornes, el descargador sigue ionizado y una corriente de mantenimiento circula por su interior.

### **2.2.3. Varistor Óxido de Metal (MOV)**

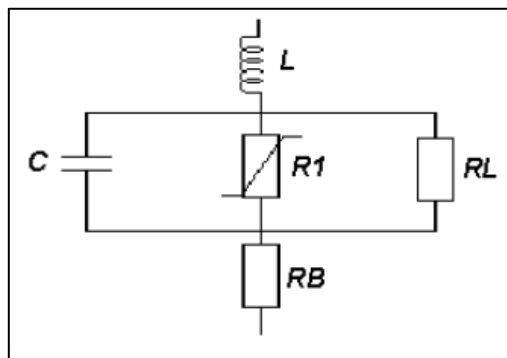
El varistor óxido de metal tiene resistencia no lineal soportando diferentes magnitudes de corrientes en un pequeño rango de tensiones, los varistores son similares al funcionamiento del diodo zener a diferencia que este es bidireccional, el varistor óxido de metal presenta mejores propiedades en su curva característica de corriente tensión.

A baja tensión se comporta como un circuito abierto y a altas tensiones como un cortocircuito, protegiendo así el equipo que está conectado y con su

característica óhmica en la región de operación normal hace que sea especial para aplicaciones de protección contra impulsos de tensión de corta duración.

Un modelo de conducción de un varistor óxido de zinc es el siguiente:

Figura 26. **Modelo eléctrico de conducción de un varistor**



Fuente: *Estudio de vida útil de varistores*, 2003. p. 10.

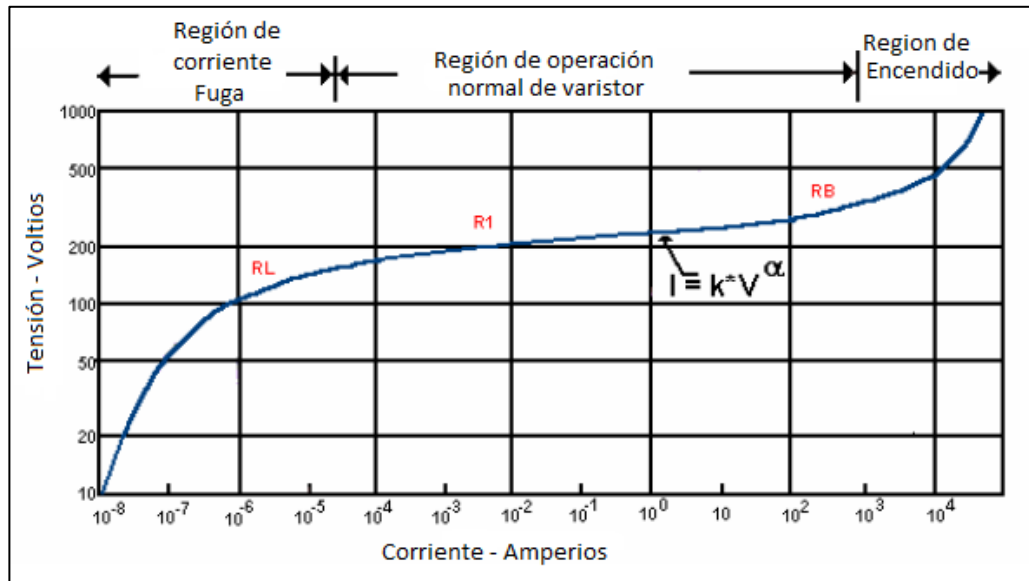
Los parámetros que describen al circuito son:

$L$  = inductancia equivalente de las terminales

$C$  = capacitancia del encapsulado del dispositivo y del material semiconductor por el cual circula la corriente.

El varistor a baja corriente se comporta como resistencia de valor muy alto  $R_L$  y a corrientes muy elevadas, el varistor es dominado por la resistencia  $R_B$  y  $R_1$  describe la componente no lineal del varistor.

Figura 27. **Curva característica del varistor**



Fuente: *Estudio de vida útil de varistores*, 2003. p. 11.

Las regiones de la curva y propiedades del varistor son:

### 2.2.3.1. **Región de corriente de fuga**

El varistor en ausencia de algún tipo de sobretensión, un aumento de temperatura hace que las corrientes de fuga sean mayores, la corriente de fuga es un fenómeno térmico y que limita las propiedades eléctricas del varistor.

### 2.2.3.2. **Región óhmica**

La relación del voltaje y corriente es lineal aunque es una región no utilizada en aplicaciones prácticas de los varistores.



### 2.2.3.3. Región de ruptura

Es la región principal del varistor en donde se observa que la corriente es una función altamente no lineal de la tensión aplicada y se puede establecer de la ecuación siguiente:

$$I = K * V^\alpha$$

Los parámetros que establecen son:

$V$  = tensión aplicada

$I$  = corriente

$K$  = constante que es función de la geometría y el proceso de fabricación.

$\alpha$  = coeficiente de no linealidad  $>1$ , a mayor el valor de  $\alpha$  mejor será la protección, ya que determina el punto de respuesta de un amplio rango de intensidades a una pequeña variación de tensión.

### 2.2.3.4. Curva característica I-V

La región más importante es la de alta corriente, esta región a menor sea la tensión, mejor será la protección ante descargas atmosféricas o de maniobra, la capacidad de un varistor para limitar transitorios depende del nivel de protección.

Este valor puede expresarse como  $C_r = V_c/V_1$

Donde:

$I_c$  = valor de la corriente de descarga atmosférica o de maniobra.

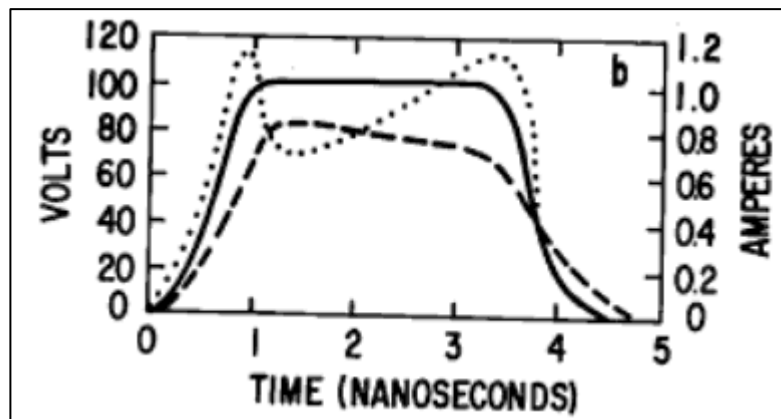
$V_c$  = valor medido para un pico de corriente  $I_c$ .

$V_1$  = es la tensión de ruptura correspondiente a la corriente de 1 mA que es un valor arbitrario que suele escogerse para definir la tolerancia en la fabricación que equipos con tecnología de varistor, ayuda a determinar el nivel de protección del equipo, cuanto más cerca este el valor  $C_r$  a 1, mejor protege el varistor.

### 2.2.3.5. Tiempo de respuesta del varistor

Esta aproximadamente en el orden de los nanosegundos, donde los cables de conexión aumentan el tiempo de respuesta.

Figura 28. Tiempo de respuesta de un varistor

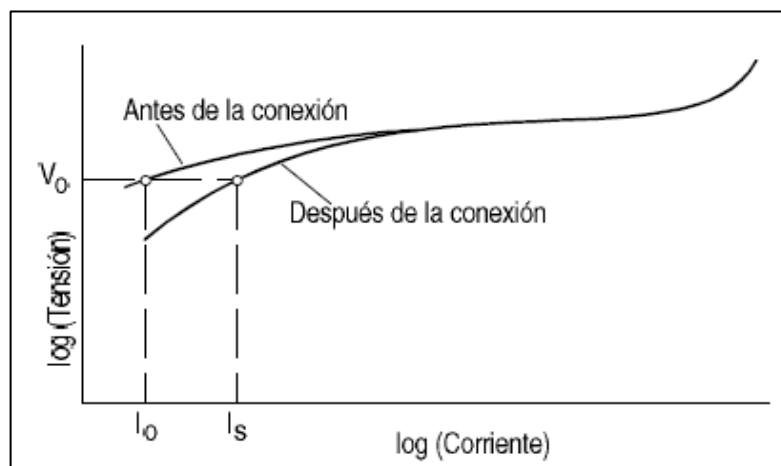


Fuente: *Electrical Overstress-Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, 1980.

### 2.2.3.6. Absorción de descarga de corriente y energía

Cuando el supresor está operando en condiciones normales, existe una corriente de fuga mínima, cuando el supresor es sometido a ciertos eventos, la corriente de fuga aumenta debido a que aumenta su potencia de absorción provocando un aumento en su temperatura.

Figura 29. **Curva característica I-V degradada tras un pulso de corriente**

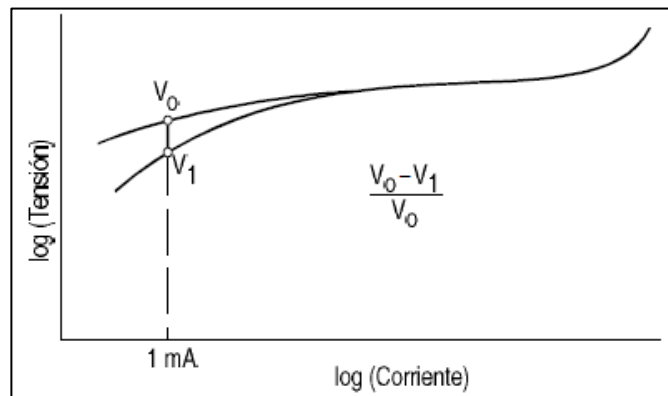


Fuente: *Estudio de los parámetros de procesamiento de varistores de óxido de zinc y modelización de la junta de grano con películas delgadas*, 1995. p. 12,

La región de alta descarga de corriente no es afectada y no disminuye el nivel de protección, además la tensión máxima de ruptura se acepta con una variación de un 10 % para la máxima descarga de corriente según UL 1449 tercera edición.

La energía máxima que puede absorber un supresor depende del tamaño del varistor, el efecto que tiene el pulso de corriente, aumenta la corriente de fuga y reduce la tensión de ruptura.

Figura 30. **Reducción del voltaje debido a una descarga atmosférica**



Fuente: *Estudio de los parámetros de procesamiento de varistores de óxido de zinc y modelización de la junta de grano con películas delgada*, p. 13.

El fenómeno de degradación del varistor genera que la potencia de disipación del varistor llegue a la destrucción térmica, debido a que no tendrá la capacidad de disipar la energía por una descarga atmosférica o de maniobra.

El varistor debe de poseer las siguientes características eléctricas que ayuden a dar una mejor protección:

- Alto coeficiente de no linealidad
- Tensión de ruptura aceptable
- Bajo valor de corriente de fuga
- Excelente capacidad de absorción de energía
- Larga vida en su funcionamiento

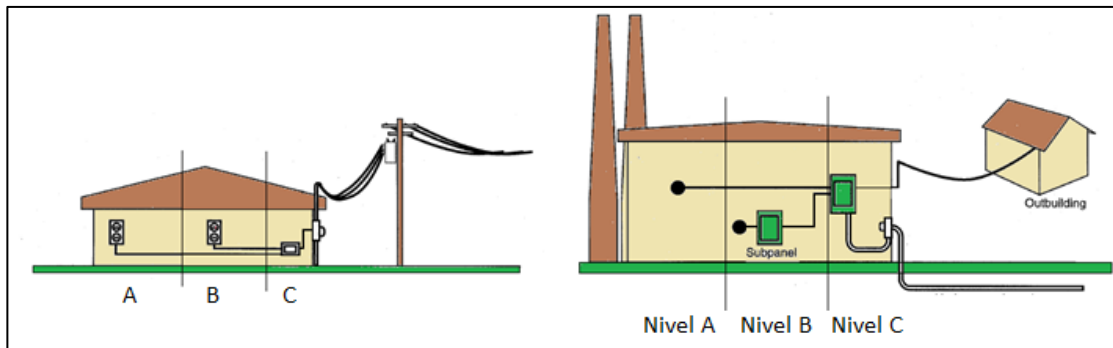
### **2.3. Tipos de categorías de supresores de transitorios**

Existen tres niveles de categorías en diferentes puntos de una instalación eléctrica.

Se observa en la figura 31 tres tipos de niveles o categorías, cada una utilizada en diferentes aplicaciones.

- Nivel A podrá instalarse en las siguientes ubicaciones:
  - Tomacorrientes y derivados que estén a una distancia de la acometida.
  - Todos los tomacorrientes que estén a más de 10 m de categoría B.
  
- Nivel B podrá instalarse en las siguientes ubicaciones:
  - Alimentadores y circuitos derivados cortos en la instalación.
  - Alimentadores en plantas industriales.
  - Tableros de distribución.
  
- Nivel C podrá instalarse en las siguientes ubicaciones:
  - Instalación exterior y acometida.
  - Circuitos que van del medidor principal a la desconexión principal de la instalación.
  - Cables del poste al medidor.

Figura 31. Niveles de protección de un supresor



Fuente: IEEE C62.41.1-2002.

## 2.4. Tipos de ondas estandarizadas para supresores de transitorios

La IEEE C62.41.1-2002 establece dos formas de ondas para los ensayos de dispositivos de protección contra sobretensiones y maniobra:

- La onda transitoria (*ring wave*) 100 kHz.
- Onda combinada 1,2/50–8/20  $\mu$ s.

### 2.4.1. La onda transitoria (*ring wave*) 100 kHz

Implica que un aumento de la frecuencia, limita su capacidad de disipación de energía y genera altos voltajes. A menor frecuencia mayor capacidad de disipación de energía, provocando voltajes bajos.

Para este tipo de onda, no existe una onda de corriente de corto circuito, la tabla XIII, muestra la corriente de cortocircuito que depende del nivel de exposición.

Tabla XIII. **Valores de tensión de ensayo según el nivel de exposición acorde a IEEE C62.41-1991**

Nivel de Categoría	Nivel de Exposición	Valores Pico		Impedancia Efectiva $\Omega$
		(kV)	(kA)	
A1	Bajo	2	0.07	30
A2	Mediano	4	0.13	30
A3	Alto	6	0.2	30
B1	Bajo	2	0.17	12
B2	Mediano	4	0.33	12
B3	Alto	6	0.5	12

Fuente: elaboración propia.

La onda tiene características importantes, estas son según la IEEE C62.41-1991.

- Tiempo de subida :  $0,5 \mu\text{s} \pm 0,15 \mu\text{s}$
- Frecuencia:  $100 \text{ kHz} \pm 20 \text{ kHz}$
- La amplitud se descompone de manera que la proporción de la amplitud de los picos adyacentes de polaridad opuesta, tiene relación del segundo pico hasta el primer pico entre 40 % y 110 %, la relación del tercer pico a pico del segundo y del cuarto pico para el tercer pico es de 40 % y 80 %.
- El tiempo de subida se define como la diferencia de tiempo entre el 10 % y el 90 % de la amplitud de la onda.

- La frecuencia se calcula a partir de la primera y tercer cruce por cero después de que el pico inicial.
- La amplitud nominal del primer pico ya sea el voltaje de circuito abierto ( $V_p$ ), o la corriente de cortocircuito ( $I_p$ ), deben de estar con una tolerancia de  $\pm 10\%$  según IEEE C62.41.1-2002.
- La relación  $V_p/I_p$  se especifica como  $12 \Omega \pm 3 \Omega$  para categoría B o  $30 \Omega \pm 8 \Omega$  para categoría A.
- Cuando la tensión en circuito abierto máxima se ajusta para que sea exactamente 6 kV, la corriente de cortocircuito nominal máxima será de 500 A para categoría B y 200 A para la categoría A.

La ecuación básica que establece el comportamiento de la onda transitoria (*ring wave*) 100 kHz según la recomendación IEEE C62.41-1991,

$$V(t) = AV_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) * \left(e^{-\frac{t}{T_2}}\right) \cos(\omega t)$$

Al realizar la sustitución de los valores se obtiene la tabla XIII:

Donde:

$A = 1,590$  constante.

$V_p$  = Valor pico de tensión.

$T_1 = 0,533 \mu s$ , tiempo de subida de la onda transitoria.

$T_2 = 0,9788 \mu s$ , tiempo de baja de la onda transitoria.

$\omega = 2\pi * 10^5 \frac{rad}{s}$ , frecuencia de la onda transitoria.



Tabla XIV. Iteración de valores para graficar la figura 32

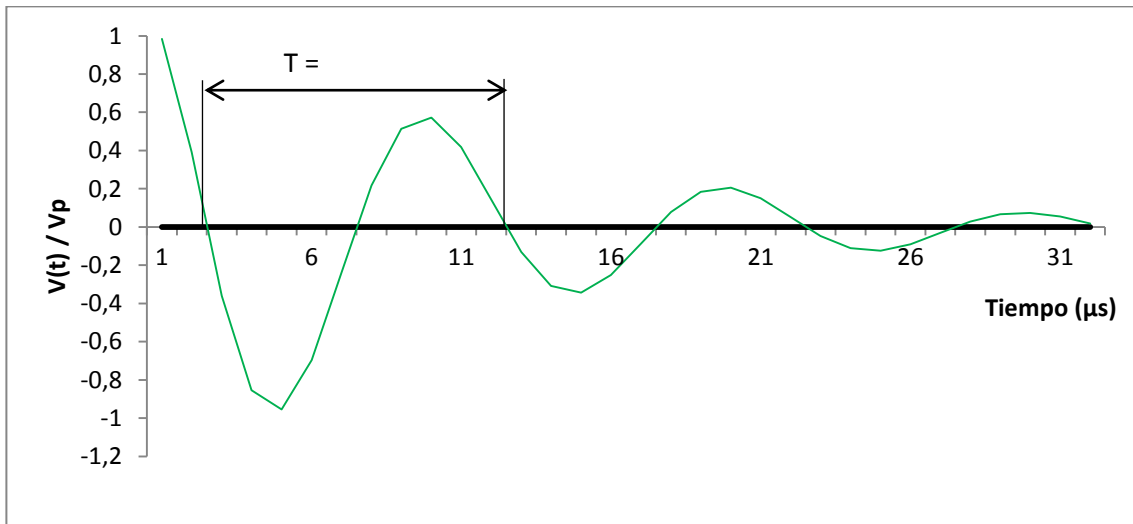
Columna 1		Columna 2		Columna 3		Columna 4	
tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$
0,000001	0,9835	0,000026	-0,0903	0,000051	0,0070	0,000076	-0,0005
0,000002	0,3911	0,000027	-0,0311	0,000052	0,0024	0,000077	-0,0002
0,000003	-0,3603	0,000028	0,0281	0,000053	-0,0022	0,000078	0,0002
0,000004	-0,8543	0,000029	0,0665	0,000054	-0,0052	0,000079	0,0004
0,000005	-0,9539	0,00003	0,0742	0,000055	-0,0058	0,000008	0,0004
0,000006	-0,6968	0,000031	0,0542	0,000056	-0,0042	0,000081	0,0003
0,000007	-0,2403	0,000032	0,0187	0,000057	-0,0015	0,000082	0,0001
0,000008	0,2170	0,000033	-0,0169	0,000058	0,0013	0,000083	-0,0001
0,000009	0,5129	0,000034	-0,0399	0,000059	0,0031	0,000084	-0,0002
0,000001	0,5724	0,000035	-0,0445	0,00006	0,0035	0,000085	-0,0003
0,000011	0,4181	0,000036	-0,0325	0,000061	0,0025	0,000086	-0,0002
0,000012	0,1442	0,000037	-0,0112	0,000062	0,0009	0,000087	-0,0001
0,000013	-0,1302	0,000038	0,0101	0,000063	-0,0008	0,000088	0,0001
0,000014	-0,3077	0,000039	0,0239	0,000064	-0,0019	0,000089	0,0001
0,000015	-0,3434	0,00004	0,0267	0,000065	-0,0021	0,00009	0,0002
0,000016	-0,2509	0,000041	0,0195	0,000066	-0,0015	0,000091	0,0001
0,000017	-0,0865	0,000042	0,0067	0,000067	-0,0005	0,000092	0,0000
0,000018	0,0781	0,000043	-0,0061	0,000068	0,0005	0,000093	0,0000
0,000019	0,1846	0,000044	-0,0144	0,000069	0,0011	0,000094	-0,0001
0,000002	0,2061	0,000045	-0,0160	0,00007	0,0012	0,000095	-0,0001
0,000021	0,1505	0,000046	-0,0117	0,000071	0,0009	0,000096	-0,0001
0,000022	0,0519	0,000047	-0,0040	0,000072	0,0003	0,000097	0,0000
0,000023	-0,0469	0,000048	0,0036	0,000073	-0,0003	0,000098	0,0000
0,000024	-0,1108	0,000049	0,0086	0,000074	-0,0007	0,000099	0,0001
0,000025	-0,1236	0,00005	0,0096	0,000075	-0,0007	0,000001	0,0001

Fuente: elaboración propia.

La figura 32, muestra el comportamiento de la onda transitoria, con los valores de la tabla XIV, se observa que la frecuencia es de 100 kHz, no es

factible observar el tiempo de subida ya que un rango de tiempo del orden de un microsegundo.

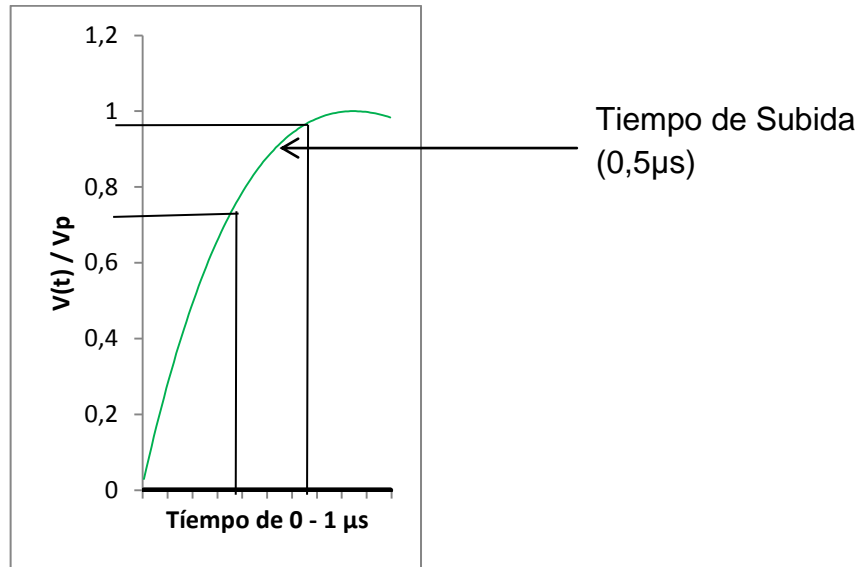
Figura 32. Onda transitoria (*ring wave*) 100 kHz



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

Para observar el tiempo de subida en el orden de los microsegundos, se observa la figura 33.

Figura 33. **Tiempo de subida de la onda transitoria (*ring wave*)**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

#### 2.4.2. **Onda combinada 1,2/50–8/20 $\mu$ s**

La onda combinada define dos figuras importantes, que son:

- La tensión en circuito abierto
- La corriente de cortocircuito

Tabla XV. **Valores sugeridos para ensayos según IEEE C62.41-1991**

Nivel de Categoría	Nivel de Exposición	Valores Pico		Impedancia Efectiva $\Omega$
		(kV)	(kA)	
A1	Bajo	2	1	2
A2	Mediano	4	2	2
A3	Alto	6	3	2
B1	Bajo	6	3	2
B2	Mediano	10	5	2
B3	Alto	20	10	2

Fuente: elaboración propia.

IEEE C62.41-1991 no menciona una combinación de onda en la categoría A, recomienda que para equipos conectados a circuitos ramales cortos, pueda estar expuesto a un nivel moderado de combinación de onda.

La protección que debe de cumplir los supresores, son:

- L-N: fase a neutro para sistemas monofásicos y trifásicos
- L-L: fase a fase para sistemas monofásicos y trifásicos
- L-G: fase al conductor de puesta a tierra del equipo en sus terminales de utilización.

La protección neutro tierra N-G tiene diferentes valores, existen lugares en donde no se lleva la conexión del sistema de tierra física en la entrada del edificio y provoca propagación de sobretensiones más graves o similares a los modos de protección mencionados anteriormente.

Tabla XVI. **Valores de protección N-G propuestos por IEEE C62.41-1991**

		Valores Pico			
		0,5µs-100 kHz		1,2/50 µs - 8/20 µs	
Practica Neutro	Nivel de	Voltaje	Impedancia	Voltaje	Impedancia
Tierra	Exposición	(kV)	Ω	(kV)	Ω
A1	Todos	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
A2	Todos	1	30	Ninguno	Ninguno
A3	Todos	3	30	Ninguno	Ninguno
B1	Bajo	2	12	2	2
B2	Mediano	4	12	4	2
B3	Alto	6	12	6	2

Fuente: elaboración propia.

La onda combinada en circuito abierto 1,2/50 µs contiene dos tiempos importantes que son:

$$T1=1,67T = 1,2 \mu s \pm 30 \% \quad y \quad T2 = 50 \mu s \pm 20 \%$$

La ecuación es el comportamiento de la onda combinada es:

$$V(t) = AVp \left( 1 - e^{-\frac{t}{T1}} \right) * \left( e^{-\frac{t}{T2}} \right)$$

Al realizar la sustitución de los valores se obtiene la tabla XI, dónde:

$\lambda A = 1,037$  constante.

$Vp$  = valor pico de tensión.

$T1 = 0,4074 \mu s$ , tiempo de subida de la onda transitoria.

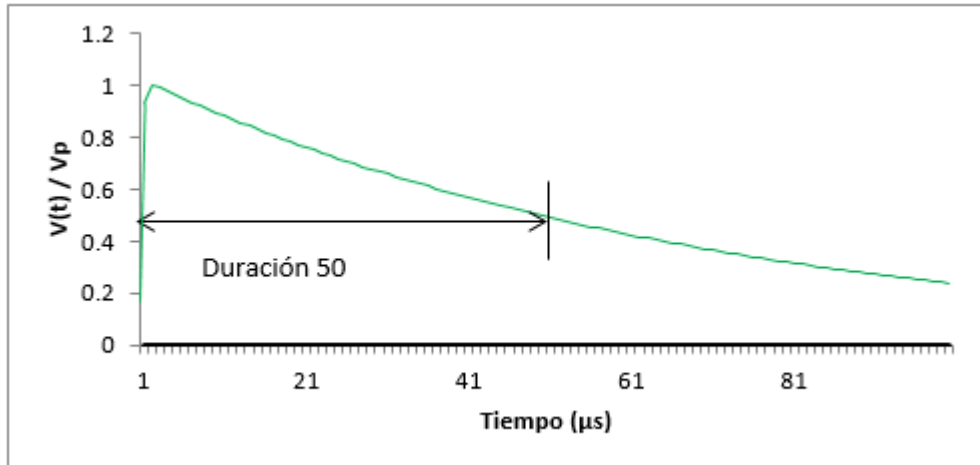
$T2 = 0,6822 \mu s$ , tiempo de baja de la onda transitoria.

Tabla XVII. Iteración para graficar la figura 34

Columna 1		Columna 2		Columna 3		Columna 4	
tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$	tiempo $\mu\text{s}$	$v(t) / V_p$
0,000001	0,9343	0,000026	0,7084	0,000051	0,4910	0,000076	0,3404
0,000002	0,9996	0,000027	0,6981	0,000052	0,4839	0,000077	0,3354
0,000003	0,9918	0,000028	0,6879	0,000053	0,4768	0,000078	0,3305
0,000004	0,9779	0,000029	0,6779	0,000054	0,4699	0,000079	0,3257
0,000005	0,9637	0,000003	0,6680	0,000055	0,4631	0,000008	0,3210
0,000006	0,9497	0,000031	0,6583	0,000056	0,4563	0,000081	0,3163
0,000007	0,9359	0,000032	0,6487	0,000057	0,4497	0,000082	0,3117
0,000008	0,9223	0,000033	0,6393	0,000058	0,4431	0,000083	0,3072
0,000009	0,9088	0,000034	0,6300	0,000059	0,4367	0,000084	0,3027
0,000001	0,8956	0,000035	0,6208	0,000006	0,4303	0,000085	0,2983
0,000011	0,8826	0,000036	0,6118	0,000061	0,4241	0,000086	0,2940
0,000012	0,8697	0,000037	0,6029	0,000062	0,4179	0,000087	0,2897
0,000013	0,8571	0,000038	0,5941	0,000063	0,4118	0,000088	0,2855
0,000014	0,8446	0,000039	0,5855	0,000064	0,4058	0,000089	0,2813
0,000015	0,8323	0,000004	0,5769	0,000065	0,3999	0,000009	0,2772
0,000016	0,8202	0,000041	0,5686	0,000066	0,3941	0,000091	0,2732
0,000017	0,8083	0,000042	0,5603	0,000067	0,3884	0,000092	0,2692
0,000018	0,7965	0,000043	0,5521	0,000068	0,3827	0,000093	0,2653
0,000019	0,7849	0,000044	0,5441	0,000069	0,3772	0,000094	0,2614
0,000002	0,7735	0,000045	0,5362	0,000007	0,3717	0,000095	0,2576
0,000021	0,7622	0,000046	0,5284	0,000071	0,3663	0,000096	0,2539
0,000022	0,7511	0,000047	0,5207	0,000072	0,3609	0,000097	0,2502
0,000023	0,7402	0,000048	0,5131	0,000073	0,3557	0,000098	0,2465
0,000024	0,7294	0,000049	0,5056	0,000074	0,3505	0,000099	0,2430
0,000025	0,7188	0,000005	0,4983	0,000075	0,3454	0,000001	0,2394

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. Onda combinada en circuito abierto 1.2/50  $\mu\text{s}$



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

La onda combinada de cortocircuito 8/20  $\mu\text{s}$  contiene dos tiempos importantes recomendados por IEEE C62.41-1991, que son:

$$T1=1,25T = 8 \mu\text{s} \pm 30 \% \quad T2 = 20 \mu\text{s} \pm 20 \%$$

La ecuación define el comportamiento de la onda combinada en circuito abierto 1,2/50  $\mu\text{s}$ , que es:

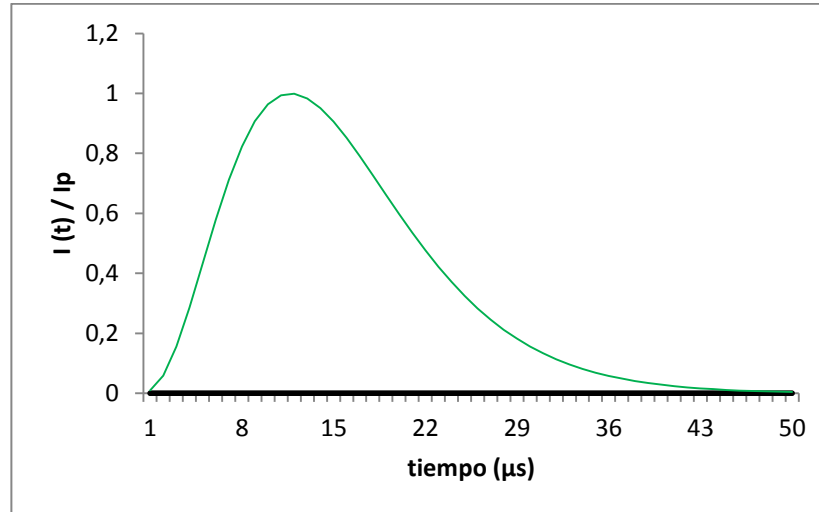
$$I(t) = A I_p t^3 * \left( e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

Donde:

$T = 3,911 \mu\text{s}$ , es un tiempo ya definido.

$A = 0,01243(us)^{-3}$ , constante de la ecuación.

Figura 35. **Onda combinada en cortocircuito 8/20  $\mu$ s**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

La Norma IEC 61312-1 1995 establece valores distintos para ensayos de dispositivos de protección contra sobretensiones, la sugerencia por IEEE C62.41-1991 son distintos, en la actualidad no hay una norma que unifique ambos criterios y sigue siendo tema de discusión.

La ecuación que describe el comportamiento de la sobretensión en la norma IEC 62312-1 1995, es la siguiente.

$$i(t) = \frac{I_p}{h} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} * \left(e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$$

- T1 y T2 son tiempos asociados al ascenso y decaimiento de la onda.
- h el factor de corrección de la corriente máxima  $I_p$ .



La capacidad de absorción de energía de un supresor, está definido por el intervalo de tiempo hasta alcanzar la mitad de su valor máximo para la onda 8/20 $\mu$ s como para la onda 10/350 $\mu$ s, los valores que recomienda IEC 61312-1 1995, están en la tabla XVIII.

**Tabla XVIII. Los valores que recomienda IEC 61312-1, 1995**

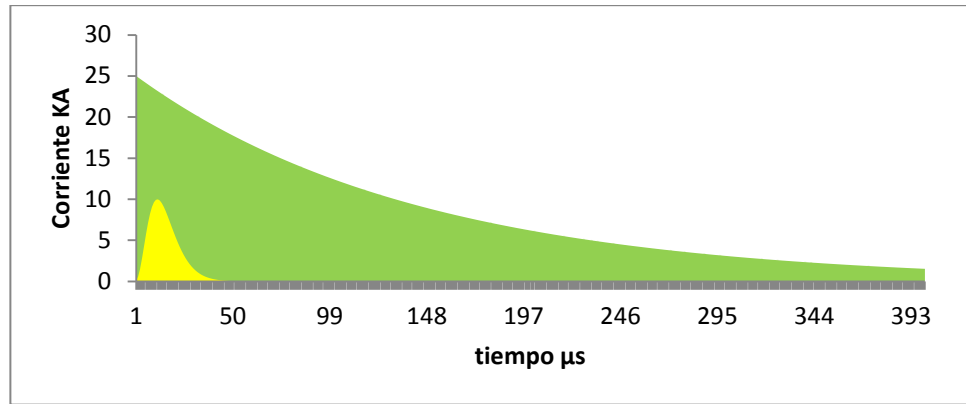
		Nivel de Protección			Nivel de Protección		
		Primer Choque de Onda			Segundo Choque de Onda		
		I	II	III-IV	I	II	III-IV
$I_p$	(KA)	200	150	100	50	37,5	25
T1	( $\mu$ s)	0,19	0,19	0,19	0,454	0,454	0,454
T2	( $\mu$ s)	485	485	485	143	143	143
h		0,93	0,93	0,93	0,993	0,993	0,993

Fuente: elaboración propia.

Un nivel de protección III-IV con corriente pico igual 25 kA tomada de la tabla XVIII, y graficar la ecuación que describe el comportamiento de la sobretensión que recomienda Norma IEC 62312-1 1995, se obtiene la figura 28.

Al graficar la onda combinada 8/20  $\mu$ s, IEEE 62.41, 1991 ver figura 36, se observa la comparación entre onda dando como resultado que la energía absorbida por la onda 10/350  $\mu$ s, es mayor que la 8/20  $\mu$ s, tomando en consideración que no existe un voltaje pico establecido para el ensayo de la onda 10/350  $\mu$ s, caso contrario la onda 8/20  $\mu$ s, se tiene lo siguiente:

Figura 36. Comparación de onda combinada 8/20µs y 10/350µs



Fuente: elaboración propia, con base al programa Excel.

Tabla XIX. Desarrollo de comparación de ondas normalizadas

No.	Ecuación
1	$\int_t^{t+t_0} V_p * i(t) * dt$
2	$E1 = \int_{t=10}^{t=350} V_p * \frac{25\ 000}{0,993} * \frac{\left(\frac{t}{0,000000454}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{0,000000454}\right)^{10}} * \left(e^{-\frac{t}{0,000143}}\right) * dt$
3	$E1 = 3.0456V_p$
4	$E2 = \int_{t=8}^{t=20} V_p * 10\ 000 * 12\ 430\ 000\ 000\ 000\ 000 * t^3 * \left(e^{-\frac{t}{0,000003911}}\right) * dt$
5	$E2 = 0,10459V_p$
6	$E1 \cong 30E2$

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. Explicación de tabla XIX

No. 1	La energía por definición es potencia por unidad de tiempo.
No. 2	<p>Sustitución de los parámetros de la ecuación No. 1, tabla XIX.</p> $i(t) = \frac{I_p}{h} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} * \left(e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$ <p>Y la integración del rango de 10 -350 μs.</p>
No. 3	Resultado del No. 2, donde E1 es la energía que absorbe el supresor en función del voltaje pico Vp con el ensayo de onda 10/350us.
No. 4	<p>Sustitución de los parámetros de la ecuación del No. 1, tabla XIX, donde</p> $i(t) = \frac{I_p}{h} * \frac{\left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T_1}\right)^{10}} * \left(e^{-\frac{t}{T_2}}\right)$ <p>Y la integración del rango de 8-20 μs.</p>
No. 5	Resultado del No. 4, E2 es la energía que absorbe el supresor en función del voltaje Vp, con el ensayo de onda 8/20us.
No. 6	El resultado establece que la onda 10/350μs disipa 30 veces más que la onda 8/20μs para este caso en particular, tomando en consideración que se estableció para este análisis un valor de tensión pico igual para ambas ondas

Fuente: elaboración propia.

### **3. REQUERIMIENTOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPRESORES**

#### **3.1. Conexión a tierra de los dispositivos de protección contra sobretensiones**

El funcionamiento óptimo y adecuado de un supresor está definido por la buena conexión al sistema de tierra física y la ubicación donde será instalado, el sistema de distribución de energía eléctrica debe de tener una conexión a tierra confiable y segura para los equipos electrónicos.

La conexión al sistema de tierra física es el camino por el cual el pico de sobretensión se drena evitando daños al equipo y a la red, cuando un rayo o una sobretensión impacta el sistema, la función del sistema de protección es transportar la corriente generada por el rayo o la sobretensión al sistema de tierra física evitando fallos inesperados.

Cuando existe una conexión al sistema de tierra que no cumple, cualquier corriente generada por un fenómeno de descarga atmosférica o de maniobra sigue a través de otras rutas en la instalación generando una pérdida en equipos electrónicos y paros de producción en la industria, amarrado a esto, la resistencia del propio sistema, mientras menor sea la resistencia de conexión a tierra, mayor será el beneficio que se tiene.

La alta resistencia a tierra (*high resistance ground*) proporciona una excelente protección frente a un arco de falla a tierra y mejora la continuidad de un proceso, pero contradice los requerimientos de un supresor de transitorio en su conexión al sistema de tierra física.

Un supresor se conecta a una alta resistencia a tierra las posibilidad de falla es mayor, se analiza una falla a tierra y el supresor de transitorio tiene el modo de protección línea a tierra, el supresor no tendrá la capacidad de drenar la corriente al sistema de tierra física, creando una sobretensión continua en las dos fases sin falla mientras dure la falla a tierra, si el voltaje máximo aplicado supera el máximo voltaje continuo de operación (MCOV) durante la falla, el supresor fallará.

Los fabricantes de supresores realizan pruebas y determina cual es el máximo voltaje continuo de operación (MCOV) para la protección de un supresor, la tabla de abajo se observa para un sistema de 480/277V, la protección posible que puede proporcionar el fabricante es 320V, el voltaje línea a neutro es de 277V  $\pm$  10 %.

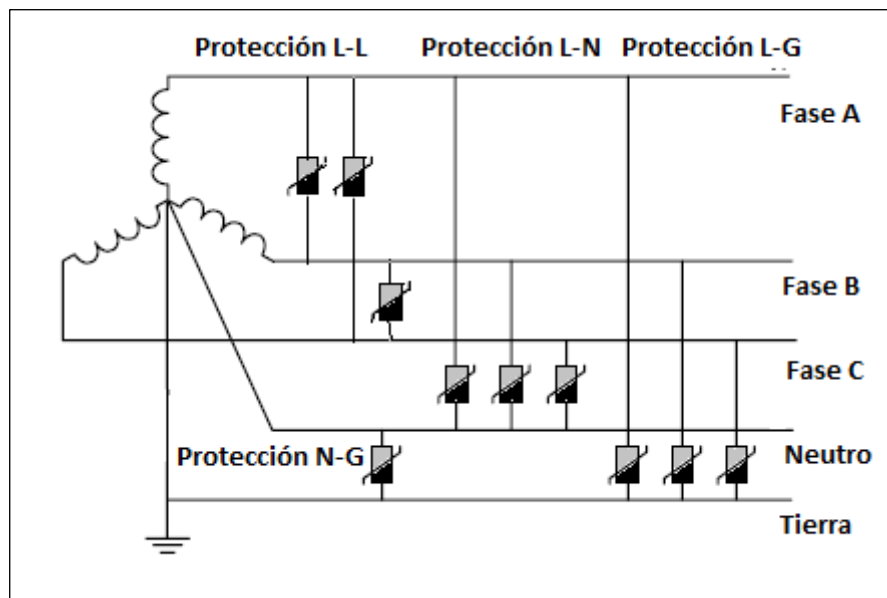
Tabla XXI. **Máximo voltaje continuo de operación (MCOV) para un sistema 480/277V**

277/480V			
L-N	L-G	L-L	N-G
320	320	640	320

Fuente: elaboración propia.

La figura 37, se observa los modos de protección que un supresor de transitorios sin ninguna alta resistencia a tierra HRG.

Figura 37. **Formas de protección para un sistema 4 hilos + tierra**



Fuente: *High Resistance Grounding-Avoiding Unnecessary Pitfalls*. p. 2.

Cuando existe una resistencia alta a tierra HRG, el voltaje máximo de operación MCOV puede llegar a tener un valor del voltaje L-L o mayor, algunos valores propuestos por los fabricantes en un sistema 480 V.

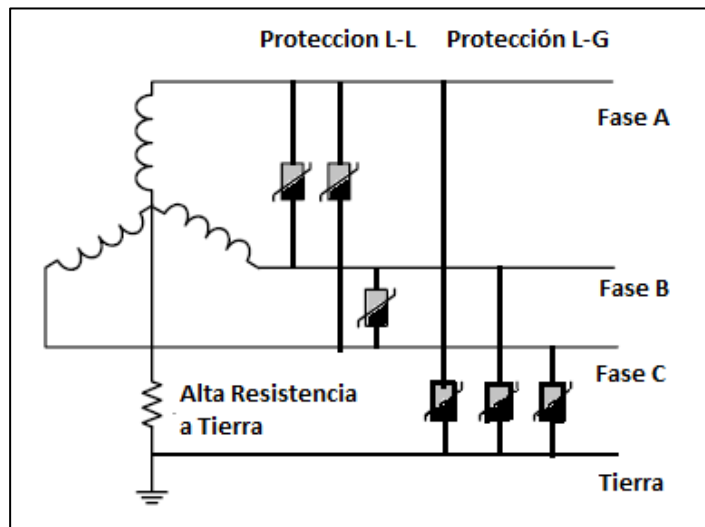
Tabla XXII. **Máximo voltaje continuo de operación MCOV en un sistema HRG**

480V	
L-G	L-L
575V	575V

Fuente: elaboración propia.

El neutro no está distribuido en el sistema estrella 3 hilos de alta resistencia a tierra HRG, se convierte en energía durante la falla a tierra, por lo cual no es necesario la protección L-N y N-G de un supresor.

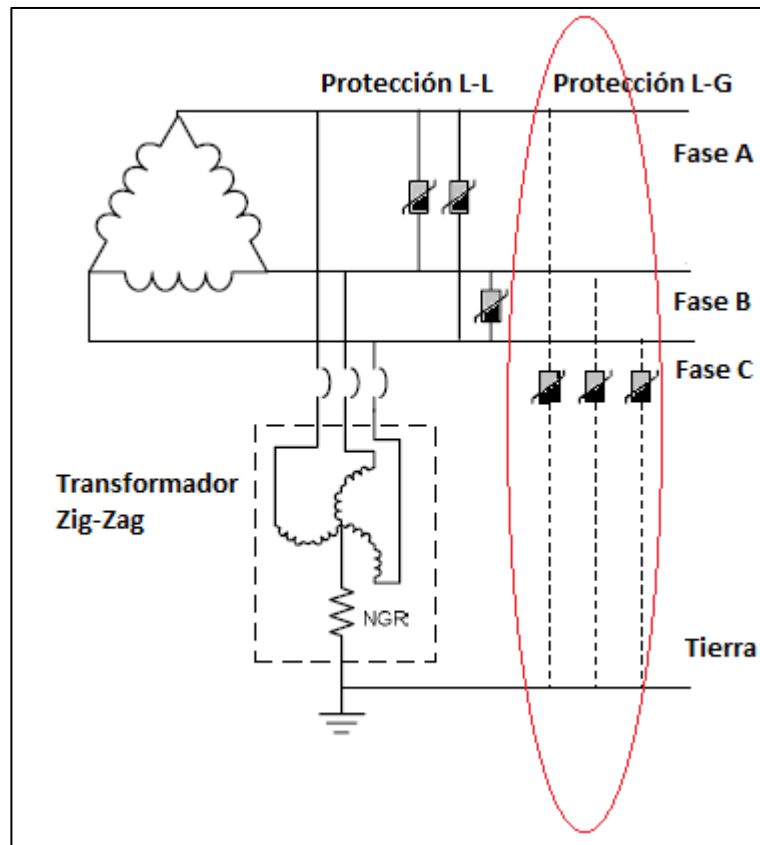
Figura 38. **Protección para un sistema 3 hilos + tierra**



Fuente: *High Resistance Grounding-Avoiding Unnecessary Pitfalls*. p. 2.

En sistema Delta sin conexión a tierra es necesario crear esa conexión a tierra a través de un transformador Zig-Zag, mediante la conexión de un neutro al sistema de tierra física, creando así un sistema de alta resistencia y así el supresor funcione en óptimas condiciones, de no ser así, el supresor estaría vulnerable a tensiones de fase a tierra, que ocurren durante fallas a tierra.

Figura 39. **Formas de protección para un sistema delta 3 hilos**



Fuente: *High Resistance Grounding-Avoiding Unnecessary Pitfalls*. p. 3.

La principal interrogante con respecto al valor deseado en un sistema de tierra al momento de la instalación de un supresor no tiene respuesta.



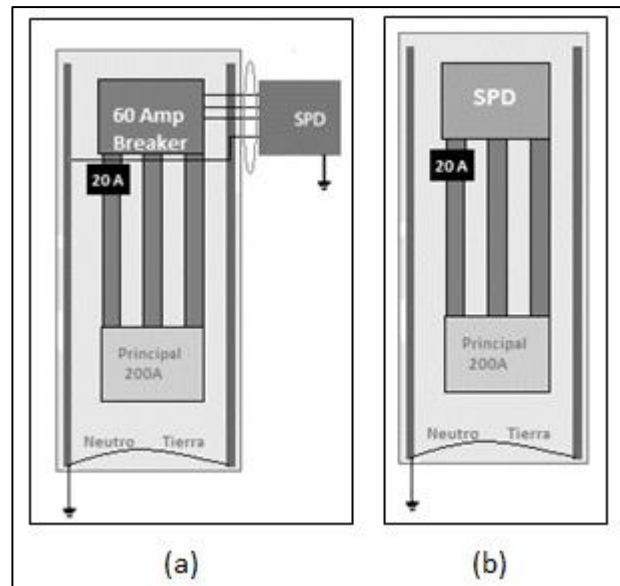
El Instituto de Protección contra Sobretensiones NEMA establece que no hay una sola respuesta a la interrogante mencionada, es más importante tener un sistema equipotencial en sus redes de tierras con una conexión adecuada, el valor de la resistencia a tierra puede ser variable dependiendo del método utilizado para hacer el análisis del sistema de tierra y temporada en donde este se realizó.

### **3.2. Requerimientos de instalación de un supresor de transitorios**

Es necesario considerar varios factores antes de la instalación del equipo.

- Personal capacitado e informado sobre el riesgo que conlleva la instalación de un supresor, además de utilizar el equipo de protección personal EPP apropiado de acuerdo a las Normas NFPA 70E que corresponda a su última actualización.
- Considerar las condiciones ambientales del lugar de la instalación y verificar si el supresor de transitorio es adecuado para las condiciones ambientales según la placa de datos del equipo.
- El espacio necesario según las Normas NFPA 70E para la realización del mantenimiento.
- Es conveniente que se instale el supresor lo más cerca posible de los circuitos protegidos, así se obtendrá una menor impedancia posible entre el supresor y los circuitos, si bien en la actualidad el supresor puede estar instalado dentro del *panelboard* o fuera de él, para obtener un rendimiento efectivo al máximo.

Figura 40. Supresor instalado (a) fuera (b) dentro del *panelboard*.



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric*.

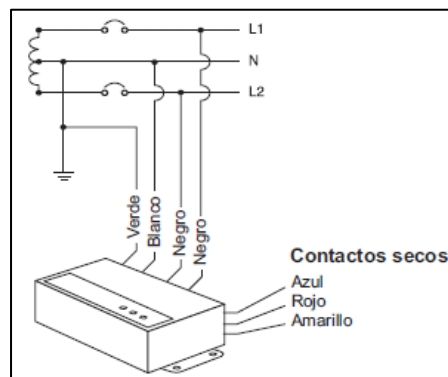
El valor del nivel de protección establecido por UL 1449 tercera edición, es con una longitud de cable de 6 pulgadas de largo, de acuerdo con la forma de onda, la recomendación por IEEE C62.41.1-2002 que puede ser 6KV/3KA en 8/20us.

Cuando el supresor está instalado dentro del *panelboard*, tiene una longitud casi nula que permite que el supresor de mayor confiabilidad ante una sobretensión ya que evita la impedancia del cable.

- Cuando se instala un supresor, la persona encarga de colocar el dispositivo debe de estar seguro cual es la tensión nominal de la red, la configuración de cualquier sistema de red eléctrica está basada en la conexión del transformador que alimenta a la comedita.

- El tamaño del conductor que recomienda Nacional Electrical Code 2008 Edition, artículo 285, debe ser no menor de 14 AWG de cobre o 12 AWG aluminio para los conductores de línea y puesta a tierra.
- Antes de instalar un supresor, hay que desenergizar el equipo para trabajar en él y utilizar un equipo para verificar la existencia de voltaje en la red.
- La instalación del supresor es necesario realizarse bajo las recomendaciones del fabricante y tipo de sistema.

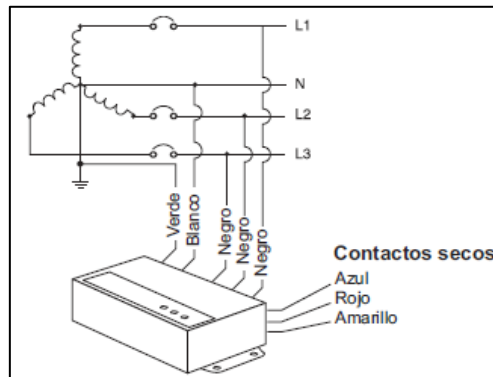
Figura 41. **Instalación de un supresor monofásico 3 hilos**



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric.*

La figura 41 muestra una conexión para un sistema monofásico de tres hilos, en donde L1 y L2 son las fases y N es el neutro que es el punto de referencia a tierra.

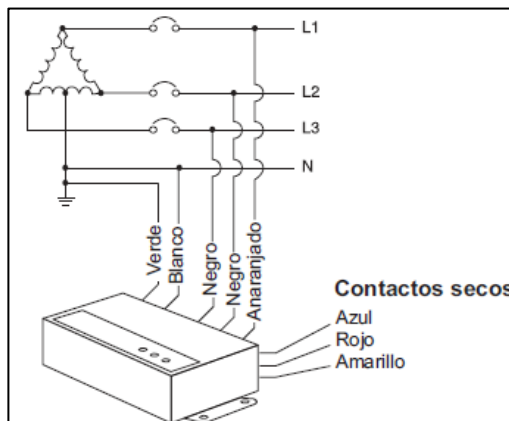
Figura 42. **Instalación de un supresor 3 fases, 4 hilos**



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric.*

Es la conexión que observa en la figura 42, es en un sistema estrella 4 hilos, L1, L2 y L3 son las fases, teniendo un punto común la tierra y el neutro.

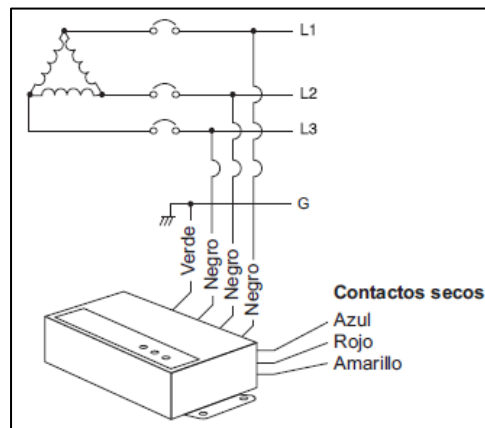
Figura 43. **Instalación de un supresor conexión delta con extremo alto 3 fases, 4 hilos**



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric.*

La figura 43 muestra una instalación de un supresor en conexión delta con *high leg* o extremo alto, en donde L1, L2 y L3 son las fases, el neutro y la tierra se obtienen de la conexión intermedia de una fase.

Figura 44. **Instalación de un supresor conexión delta 3 fases, 3 hilos**



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric.*

La figura 44 muestra la conexión de un supresor delta, L1, L2 y L3 son las fases, el elemento neutro no existe y la tierra del supresor va directamente al sistema de tierra física.

- Cada supresor de transitorios tiene indicadores, su función es dar el diagnóstico del equipo cuando opera correctamente o incorrectamente, verificar el manual del equipo al momento de instalar y comprender cuál es el funcionamiento de cada indicador.
- Además de los indicadores, cada fabricante determina si es necesario que el equipo tenga contactos secos, con el objetivo de monitorear remotamente el estado del supresor, para la conexión de la salida de los

contactos se debe de verificar el manual de instalación del equipo a requerir.

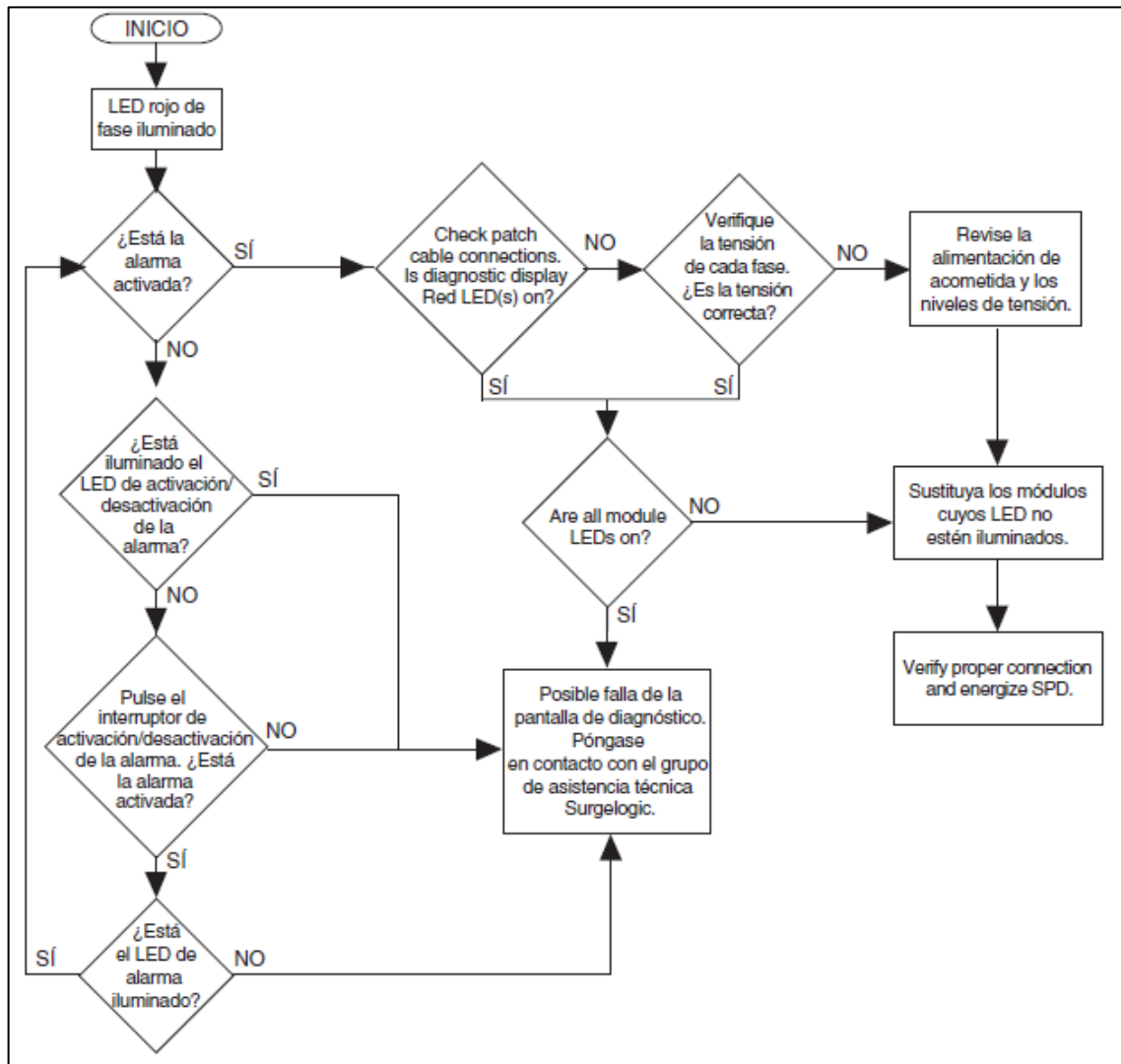
### **3.3. Mantenimiento de un supresor de transitorios**

Un dispositivo de protección contra transitorios no es una obligación o requisito el mantenimiento periódico del equipo, los equipos de protección están fabricados para una larga duración de vida que dependerá de la exposición al que el equipo esté sometido, los equipos vienen acompañados de un sistema de diagnóstico para su monitoreo a través de led indicadores o contactos secos.

El diagnóstico se realiza a través de una inspección visual, periódicamente se determina si el supresor funciona correctamente, si en determinada inspección se visualiza alguna falla, se debe de proceder con las mediciones necesarias o remplazo del equipo.

Diagrama de flujo de la funcionalidad de un determinado supresor:

Figura 45. **Diagrama de flujo del funcionamiento e inspección de un supresor en específico**



Fuente: *surgelogic Square-D Schneider Electric.*

### 3.4. Especificaciones técnicas de un supresor de transitorios

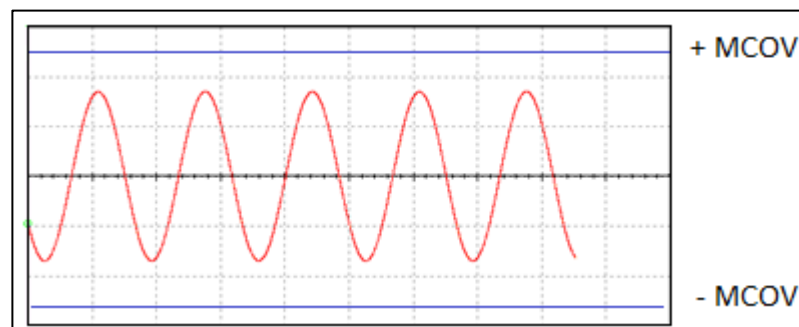
La importancia de comprender las características de un supresor al comparar dos supresores de transitorios de diferentes fabricantes, son:

- Voltaje máximo continuo de operación MCOV.
- Nivel de protección VPR
- Corriente de corto circuito
- Corriente nominal de descarga por fase
- Modos de protección de un supresor.
- Tiempo de respuesta de un supresor.
- Dispositivo de seguimiento de onda

#### 3.4.1. Voltaje máximo continuo de operación (MCOV)

Tensión máxima continua que puede soportar sin que el equipo falle, la figura 46 muestra la onda sinusoidal de tensión nominal y en el lado positivo y negativo el valor máximo de operación que el supresor puede trabajar.

Figura 46. Tensión máxima de operación continua MCOV



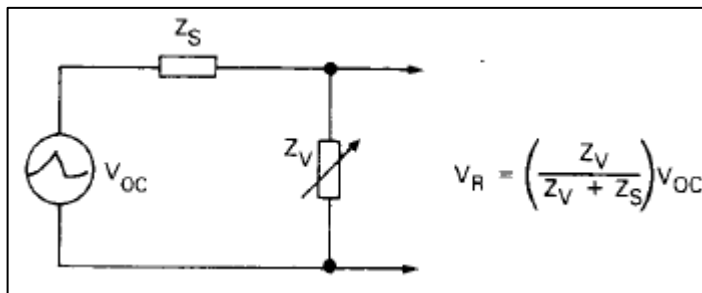
Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.



### 3.4.2. Nivel de protección (VPR)

Se determina como el valor momentáneo más alto de tensión que llega al equipo protegido después de haber sido limitado por un dispositivo de protección, también llamado *clamping voltage*, sobretensión remanente, entre más bajo sea el valor del parámetro mejor será la protección, el dispositivo tiene una impedancia variable en función de la corriente que circula a través de sus terminales, muestran una característica no lineal, la Ley de Ohm puede ser aplicado con la diferencia de que tienen un impedancia variable

Figura 47. **Clamping voltage de un supresor**

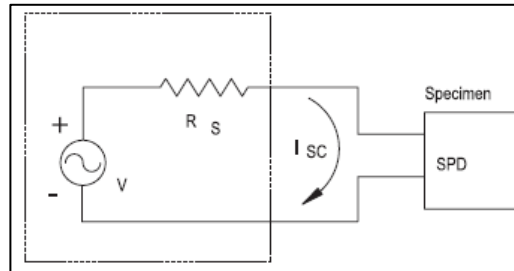


Fuente: MARTZLOFF, François D. *Surge protection techniques in low-voltage AC power systems*, 1979.

### 3.4.3. Corriente de cortocircuito

Cantidad disponible de corriente que el supresor puede ser sometido y desconectado de forma segura desde la fuente de energía bajo las condiciones de corto circuito.

Figura 48. **Corriente de cortocircuito de un supresor**



Fuente: 1449 UL Surge Protective Devices, 2006.

La corriente de corto circuito se determina en base a la ecuación siguiente:

$$I_{SC} = (V_{OC} \times I) \div (V_{OC} - V_{CC})$$

UL 1449 tercera edición, establece distintos valores para la corriente de corto circuito para el ensayo de los supresores, estos valores se deben de respetar por los fabricantes y es un buen parámetro en la comparación entre dos equipos de protección contra transitorios.

Tabla XXIII. **Valores de corriente de corto circuito por UL 1449 tercera edición**

Corriente de corto circuito SCCR valores RMS recomendados por UL 1449 tercera edición	
5 000	50 000
10 000	65 000
14 000	85 000
18 000	100 000
22 000	125 000
25 000	150 000
30 000	200 000
42 000	

Fuente: elaboración propia.

#### **3.4.4. Corriente nominal de descarga por fase**

Se realiza al supresor por 15 inyecciones de corriente en un minuto dependiendo de la categoría del supresor, y está aprobado por UL 1449 en su tercera edición y última actualización en septiembre 2006, para verificar que las condiciones dinámicas del supresor estén en buen estado, la UL 1449 muestra los valores de corriente para cada categoría del supresor quedando de la siguiente manera:

- Para un supresor de transitorios nivel C los valores son: 10 kA o 20 kA dependiendo del nivel de riesgo del area.

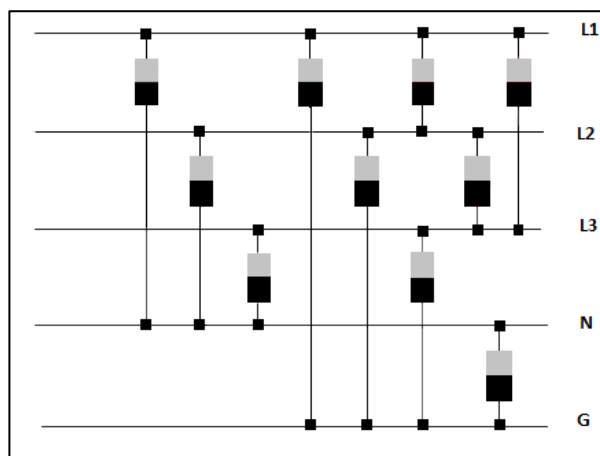
- Para un supresor de transitorios nivel B los valores son: 3 kA, 5 kA, 10 kA o 20 kA dependiendo del nivel de riesgo del area.
- Para un supresor de transitorios nivel A los valores no tienen una corriente de descarga nominal.

### 3.4.5. Modos de protección de un supresor de transitorios

Los modos de protección que un supresor debe de cumplir para la conexión estrella y delta son:

Un supresor en un sistema estrella 3 fases, 4 hilos debe de tener 10 modos de protección y así dar la confiabilidad al equipo que se esté protegiendo.

Figura 49. **10 formas de protección para un sistema en conexión estrella**

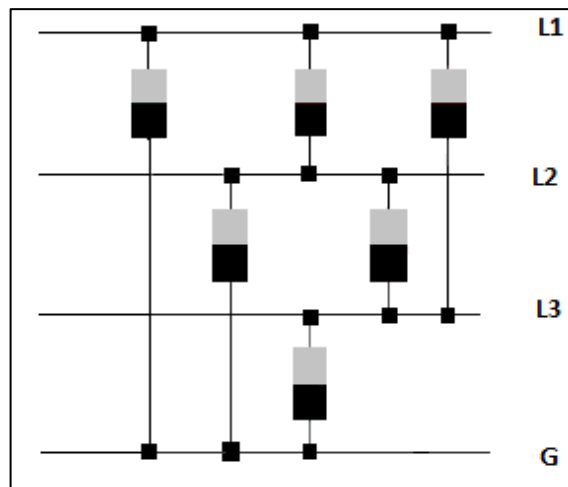


Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

La conexión al sistema de tierra física, debe de considerar si se trata de un sistema sólidamente aterrizado o un sistema con alta resistencia a tierra para la conexión en estrella.

Un supresor en un sistema Delta 3 fases, 3 hilos, debe de tener 6 modos de protección.

Figura 50. **6 formas de protección para el sistema en conexión delta**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.

### 3.4.6. Tiempo de respuesta de un supresor

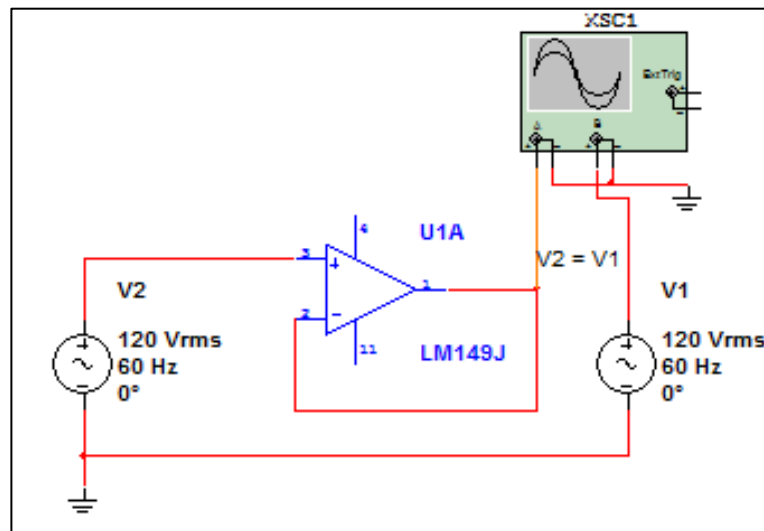
El tiempo de respuesta de un supresor de transitorios deberá tener una reacción inmediata cuando ocurre un transitorio, hay fabricantes que afirman que sus equipos tiene un tiempo de respuesta menor  $<1$  nanosegundo ( $10^{-9}$ ), este es un parámetro que no está aprobado por normas internacionales.

### 3.4.7. Seguidor de onda sinusoidal (*sine wave tracking*)

Se define como el rastreo de la onda o la capacidad de un supresor para suprimir la frecuencia alta, proporcionando uniformidad de supresión alrededor de la onda fundamental independientemente de fase y ángulo.

En la figura 51, se observa un análisis del comportamiento del seguidor de onda sinusoidal.

Figura 51. Circuito seguidor de onda sinusoidal



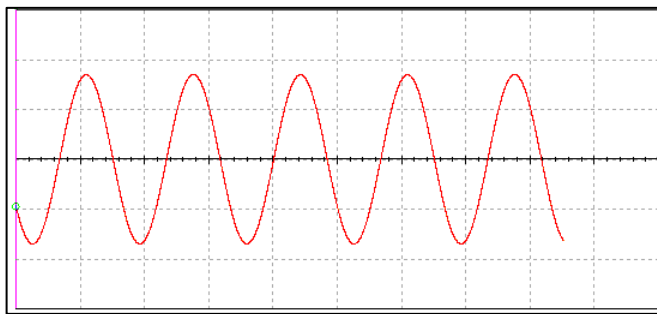
Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

$$\begin{aligned}R2 &\approx \alpha \\R1 &\approx 0 \\V1 &= \left(\frac{R1}{R2} + 1\right) * V2 = \left(\frac{0}{\alpha} + 1\right) * V2 = V2 \\V2 &= V1\end{aligned}$$

El circuito se denomina seguidor de voltaje, el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada tanto en magnitud como en signo, se dice que el voltaje de salida sigue al voltaje de entrada o fuente.

Su principal característica es que tiene alta impedancia de entrada, por lo que no extrae corriente de la fuente y baja impedancia de salida, haciendo que el amplificador se comporte como una fuente de corriente ideal y no sufra pérdidas de voltaje con cargas (RL) de bajo valor, al realizar el análisis de la figura 51, el resultado es el gráfico 52.

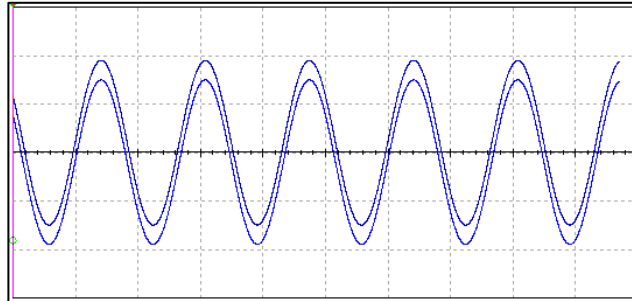
Figura 52. **Seguidor de onda sinusoidal**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.

Un supresor de transitorio con seguidor de onda tiene un ventana de un  $\pm 15-20\%$  del valor de tensión nominal, dependiendo en qué punto y ángulo surja la sobretensión, el seguidor de onda conserva la uniformidad de la onda.

Figura 53. **Ventana de supresión del seguidor de onda**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Multisim.





## 4. SELECCIÓN DE UN SUPRESOR DE TRANSITORIOS

La selección un supresor lleva ciertas recomendaciones y características del supresor, a continuación se detalla los parámetros geográficos y eléctricos que se deben de tomar en cuenta para la selección de la coordinación de supresores en cascada.

### 4.1. Nivel isocerámico

Se refiere a un número promedio de días al año en los que se presentan tormentas eléctricas, en la práctica se mide como el número de días al año en los que se escuchan truenos, este parámetro es importante al momento de seleccionar un supresor, con ello se determina si el nivel de riesgo del área es alto, medio o bajo.

Las características del rayo son aleatorias, la principal forma de representarlo es en términos de probabilidad, uno de los valores más representativos de un rayo es la magnitud de corriente de pico, la probabilidad que cierta magnitud de corriente de rayo sea excedida está definida por:

$$P(I) = \frac{I}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}}$$

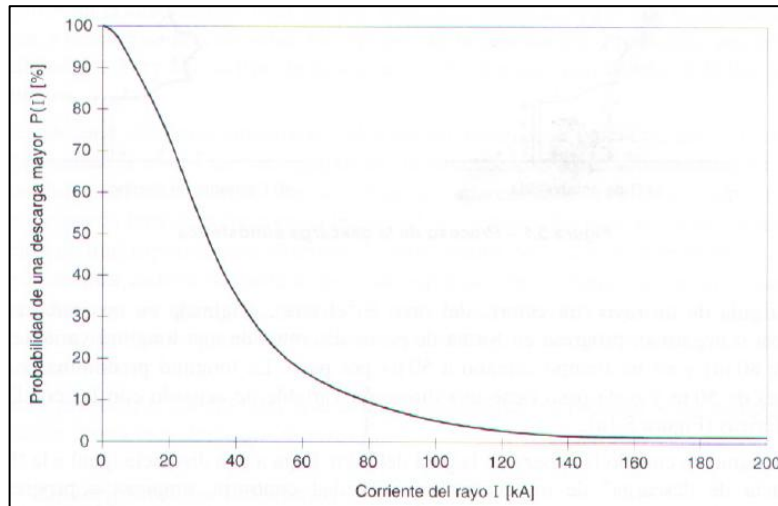
Donde:

$I$  = corriente de máxima de rayo.

$P(I)$  = la probabilidad de corriente de pico de una descarga sea excedida.

La figura 54, muestra el comportamiento de la probabilidad de rayo.

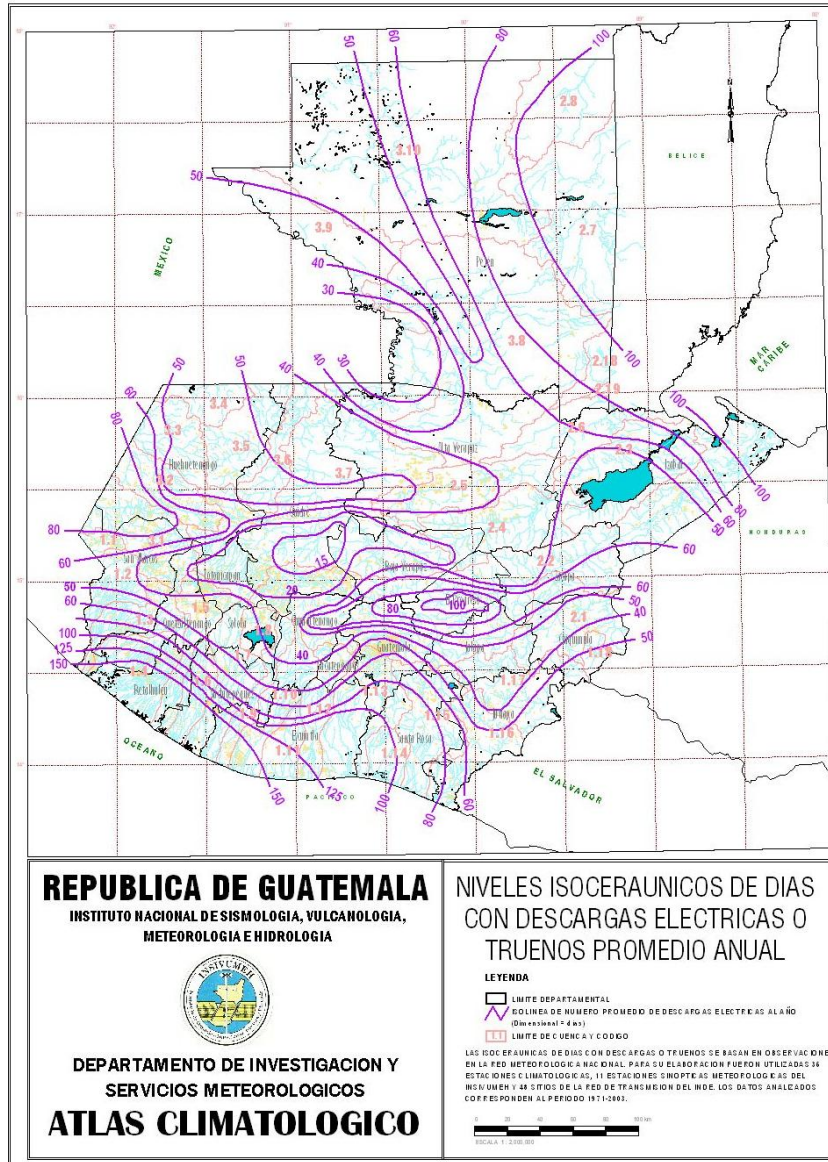
Figura 54. **Distribución de probabilidad de rayo**



Fuente: MEJÍA VILLEGAS. *Libro de subestaciones de alta y extra alta tensión*. p. 120.

. Guatemala tiene el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) que es una institución técnico científica, con la misión de contribuir al sector productivo del país asociadas a la ciencias atmosféricas, geofísicas e hidrológicas, coordinando servicios con el sector privado y de gobierno en casos de desastres naturales, además del monitoreo climático en lo que destaca el mapa de niveles isoceráunicos.

Figura 55. Niveles isoceráunicos de Guatemala

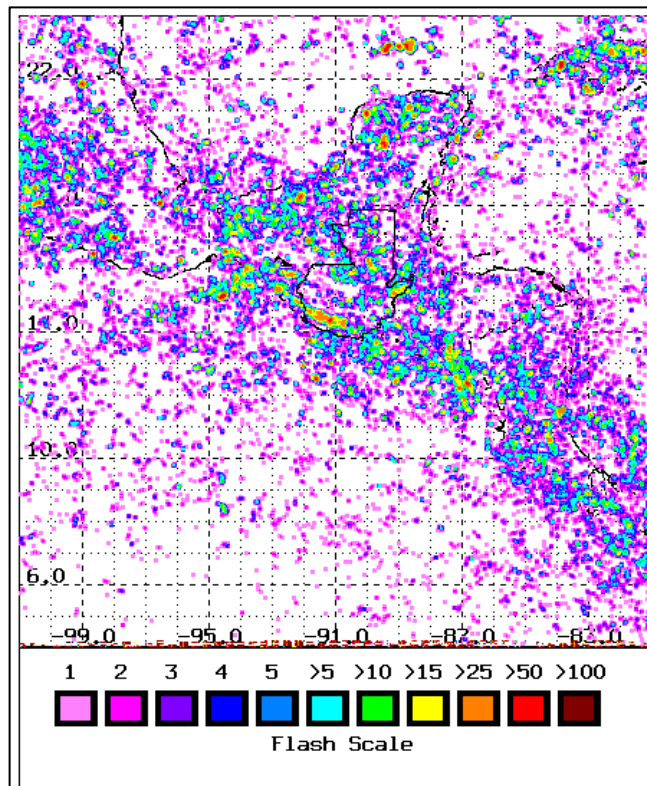


Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

La NASA a través de su tecnología de detectores ayudan a determinar los flashes que ocurren en Guatemala durante una temporada o en un día

específico, la figura 56, muestra la determinación de los relámpagos que ocurrieron durante el 2013.

Figura 56. Niveles Isoceráunicos en Centroamerica



Fuente: <http://lightning.nsstc.nasa.gov/>. Consulta: 20 de marzo 2014.

Se detecta que el área de las costas del Pacífico fue donde ocurrieron mayores descargas atmosféricas.

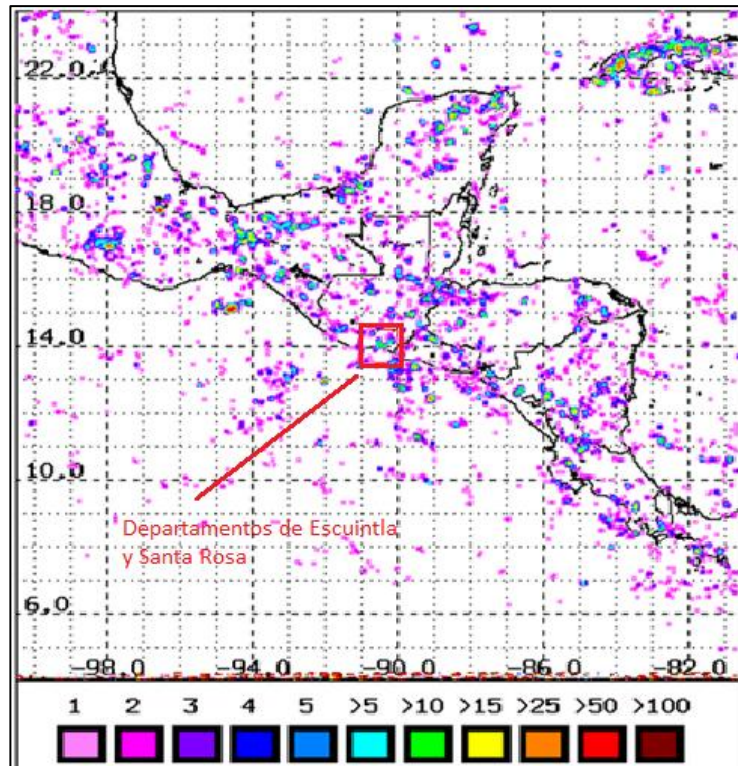
Cuando se elige un supresor de transitorios, el parámetro del nivel isoceráunico es importante para determinar si el riesgo es alto, medio o bajo.

La figura 57, muestra un panorama de la densidad de rayos en Guatemala.

Al instalar un supresor, es necesario observar minuciosamente la zona en donde este será colocado, para ello se observa las trayectorias del mapa de los niveles isoceráunicos que muestra el INSIVUMEH o bien con la ayuda del sitio web de la NASA para determinar los relámpagos ocurridos en determinada ubicación.

Al analizar el departamento de Escuintla y Santa Rosa durante el mes de junio 2013, ver figura 57, se detecta que ocurrieron 81 relámpagos en el área marcada.

Figura 57. **Análisis de niveles isoceráunicos**

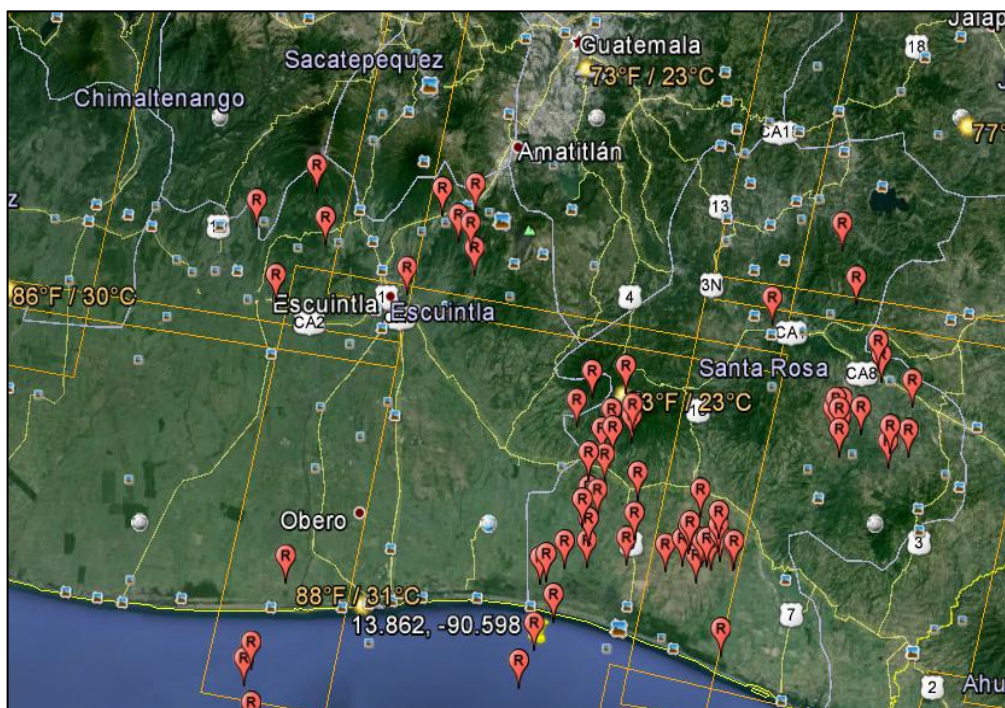


Fuente: <http://lightning.nsstc.nasa.gov/>. Consulta: 20 de marzo 2014.

Los departamentos de Escuintla y Santa Rosa tienen alta incidencia de descargas atmosféricas.

La información que genera el sitio oficial de la nasa además del mapa, también muestra información de las coordenadas del impacto de rayo, al trasladar las coordenadas a grafico a través de Google Earth, el resultado es el de la figura 58.

Figura 58. Impacto de rayo junio 2013



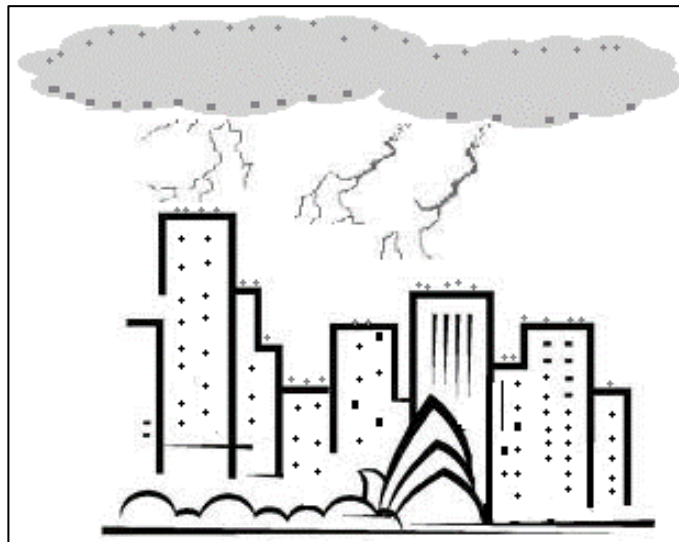
Fuente: elaboración propia, con base a Google Maps.

La figura 58, refleja los puntos de impacto de rayo durante el mes de junio 2013.

#### 4.2. Ubicación si es un espacio abierto o aislado respecto a otras construcciones

La formación del rayo se genera por una separación de cargas, las regiones diversas de las nubes adquieren cargas diferentes, generando una atracción entre cargas entre nube y tierra o entre nubes. Eventualmente se crea una diferencia de potencial mediante la ionización del aire, permitiendo un flujo de carga entre nube y tierra, el aire es un buen aislante, de manera que el campo eléctrico debe de ser muy fuerte para que ocurra este efecto, la diferencia de potencial está en función de la distancia que exista entre nube a tierra, a menor distancia el campo eléctrico será mayor, ver figura 59.

Figura 59. **Rayo nube a tierra**



Fuente: elaboración propia, con base al programa Microsoft Paint.



Tabla XXIV. **Desarrollo de intensidad de campo eléctrico**

No.	Ecuación	Descripción
1	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$	Intensidad del campo eléctrico es igual a la fuerza dividido entre la carga.
2	$\Delta U = \vec{F} * d$ $\vec{F} = \frac{\Delta U}{d}$	El cambio de energía es igual a la fuerza multiplicada por la distancia, por lo tanto la fuerza es igual al cambio de energía dividido la distancia.
3	$V = \frac{\Delta U}{q}$ $q = \frac{\Delta U}{V}$	El potencial eléctrico es igual al cambio de energía dividido entre la carga, entonces la carga es igual al cambio de energía entre el potencial eléctrico.
4	$ \vec{E}  = \frac{\Delta U}{d} * \frac{V}{\Delta U}$ $ \vec{E}  = \frac{V}{d}$	Sustituyendo y simplificando, la intensidad de campo eléctrico es igual al voltaje dividido la distancia.

Fuente: elaboración propia.

La ubicación del edificio o industria a proteger con supresor de transitorios, hay que considerar si el espacio es abierto, aislado o en una colina, puede ser un área industrial en crecimiento o un parque industrial extendido.

La altura del inmueble en donde se desea hacer la protección, hay que verificar la altura respecto a otras construcciones vecinas, tomando en

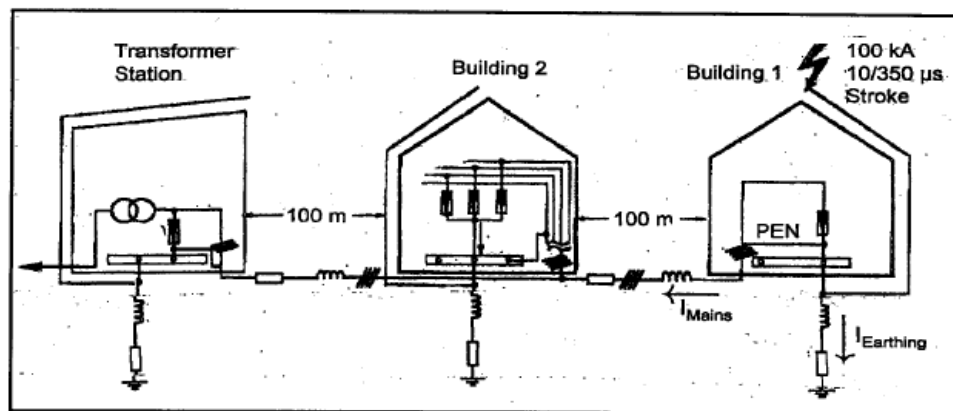
consideración antenas, depósitos aéreos o edificio que tengan protección de pararrayos.

#### 4.3. Evaluar el tipo de acometida existente en la planta industrial o residencial

Cuando se selecciona el supresor, se analiza el tipo de conexión de acometida respecto a otras construcciones.

Un grupo de trabajo de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) desarrollo un reporte técnico con las simulaciones para protección de transitorios. La simulación consistió en el ensayo de un impacto de rayo en donde dos edificios y el transformador de distribución están unidos por un cable en un arreglo lineal. El punto de impacto de es el edificio 1, ver figura 50.

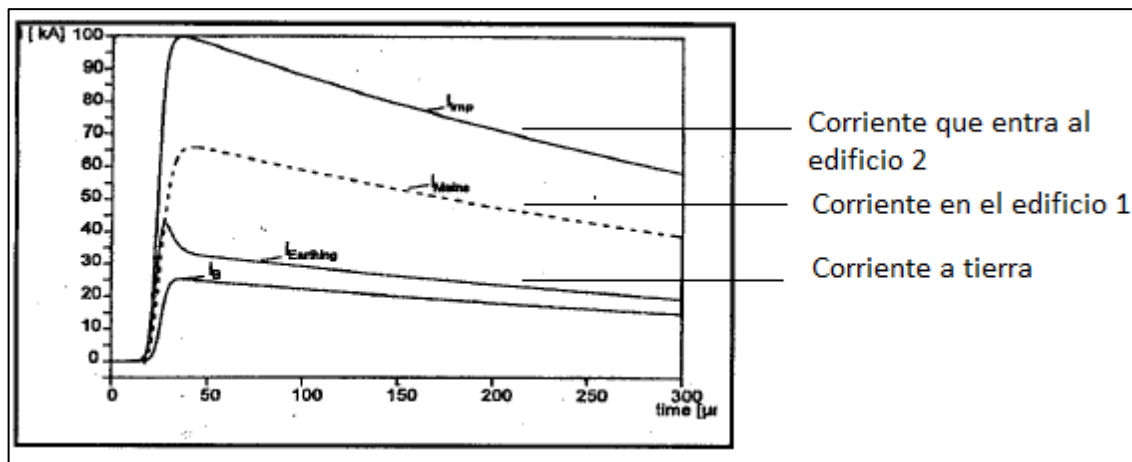
Figura 60. Configuración usada en la simulación y componentes eléctricos



Fuente: *on the dispersion of lightning current after a direct flash to a building, 2000.*

El resultado obtenido en la simulación corresponde a la figura 51, se observa que la corriente que se introduce al edificio 2 es mayor que la del edificio 1, el impacto ocurrió en el edificio 1 y los valores de inductancia y resistencia son los mismos para el transformador de distribución y edificios, provocando que el efecto inductivo desaparezca con conforme a la distancia sea más larga.

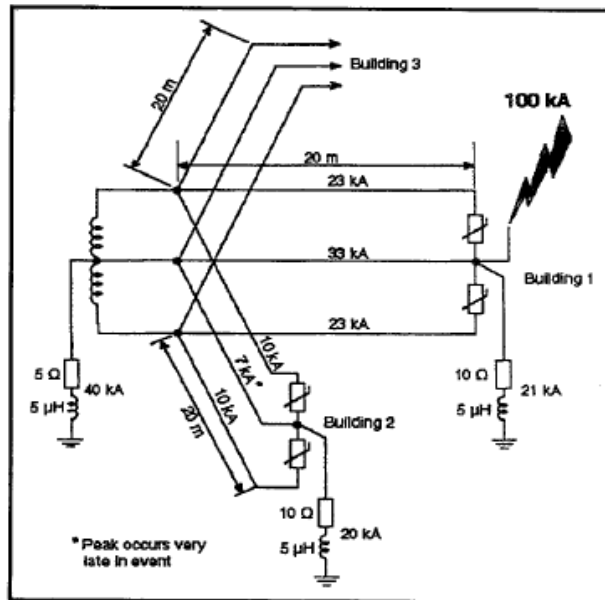
Figura 61. Resultados de la simulación



Fuente: *on the dispersion of lightning current after a direct flash to a building*, 2000.

El mismo efecto sucede en una configuración radial ver figura 51, en donde tres edificios están conectados a las terminales del transformador de distribución y donde cada edificio cuenta con su resistencia e inductancia propia del sistema.

Figura 62. Configuración radial de tres edificios



Fuente: *On the dispersion of lightning current after a direct flash to a building*, 2000.

El resultado de estas simulaciones define la importancia de considerar este efecto al momento de seleccionar un equipo de protección contra transitorios, el análisis refleja que a mayor longitud que este la acometida de un edificio respecto de otras construcciones, mayor será el impacto al mismo al momento de ocurrir un transitorio por rayo o de maniobra.

#### 4.4. Historial de disturbios

El conocer el historial de disturbios en donde se planea instalar un equipo ayuda a tener mayor confiabilidad del sistema eléctrico, esta es información que ayuda a determinar cuál es el valor de supresión idóneo para un equipo contra transitorios.

El análisis se debe realizar conforme a los equipos dañados con anterioridad, tarjetas de comunicación, equipo de computación, discos duros, equipo electrónico industrial, información que ayudara a determinar la frecuencia con la que ocurren los eventos.

La información obtenida, se evalúan los puntos críticos en donde los equipos están operando en la industria o residencia, y verificar si generan paro de producción, pérdidas económicas y esencialmente el valor económico del equipo que se desea conocer.

Cuando una instalación es nueva, no tiene un historial de disturbios adecuado respecto a la ubicación, se recomienda preguntar con las personas aledañas a la futura instalación para esta informado y a la vez verificar en su entorno si existen plantas industriales o talleres que estén generando transitorios de corta duración.

#### **4.5. Resumen de los criterios al seleccionar un supresor**

El tabla XXV detalla un procedimiento adecuado para la selección de supresores de transitorios tomando en consideración aspectos eléctricos y geográficos y en algunos casos económicos que ayudarán a determinar cuál es la mejor opción en la coordinación de los equipos al momento de seleccionarlos en la Guatemala, la suma del valor total es comparado con la tabla XX, y se procede a tomar la coordinación óptima.

Tabla XXV. Procedimiento para seleccionar un supresor

No.	Tema	Exposición	Valor
1	<b>Nivel isocerámico</b> El nivel isocerámico de la región donde se desea proteger es alto, medio o bajo.	Alto	10
		Medio	5
		Bajo	1
2	<b>Ubicación respecto a otras actividades</b> El espacio es abierto, aislado, área en crecimiento o si es una área densamente poblada.	Rural	10
		Sub Urbano	5
		Urbano	1
3	<b>Ubicación respecto a otras construcciones</b> La altura del edificio que se desea proteger es la más alta, mediana o pequeña.	El más alto	10
		Mediano	5
		El más pequeño	1
4	<b>Tipo de acometida</b> La acometida del edificio que se desea proteger es la más alejada en una distribución radial.	Ultimo usuario	10
		Usuarios múltiples	5
		Acometida independiente	1
5	<b>Historial de disturbios</b> Verificar los disturbios que hayan dañado equipo eléctrico, tarjetas electrónica, equipo crítico, etc.	Frecuentes	10
		Ocasionales	5
		Escasos	1
6	<b>Importancia del equipo a proteger</b> Existe equipo crítico que genere pérdidas o paro de producción al momento de fallar.	indispensable	10
		moderada	5
		puede detenerse	1
7	<b>Costo económico del equipo si falla.</b> El costo del equipo es alto, moderado o económico.	costosa	10
		moderada	5
		Económica	1
8	<b>Categoría de aplicación según IEEE C62.41</b> Ubicación donde se instalará el equipo para transitorios.	Acometida	A
		Distribución	B
		Derivado	C

Fuente: elaboración propia.

**4.6. Propuesta para la coordinación de supresores con base en IEEE C62.41-2002**

La tabla XXVI detalla una propuesta de supresores que se recomienda a partir de la suma total del valor de la tabla XXV, dependiendo del punteo que se obtenga, se establece la coordinación necesaria de supresores que debiese colocarse cualquier zona en Guatemala.

**Tabla XXVI. Propuesta para la coordinación de supresores**

<b>Nivel de categorías según IEEE C62.41</b>	<b>Considere el índice de exposición calculado y categoría del supresor según IEEE C62.41.1 -2002.</b>			
	7-25 puntos	26-40 puntos	41-55 puntos	56-70 puntos
Categoría C Acometida	120KA	160KA	240KA	480KA ó 320KA
Categoría B Distribución	80KA	120KA	160KA	240KA
Categoría A Derivado	40KA	50KA	80KA	120KA

Fuente: elaboración propia.

Los valores que están en la tabla XXVI están basados en la suma total de los valores numéricos que da como resultado la tabla XXV, cuando no se tenga la disponibilidad de los supresores, se escoge el más próximo.

El inciso 8, establece el nivel de categoría donde se instalara el supresor.

#### 4.7. Ejemplo de selección de una coordinación de supresores.

Al analizar la coordinación de supresores es el Banco de Guatemala ubicado en la zona 1, ciudad capital, se deben de responder las preguntas de la tabla XXV (procedimiento para la selección de un supresor).

Figura 63. Banco de Guatemala



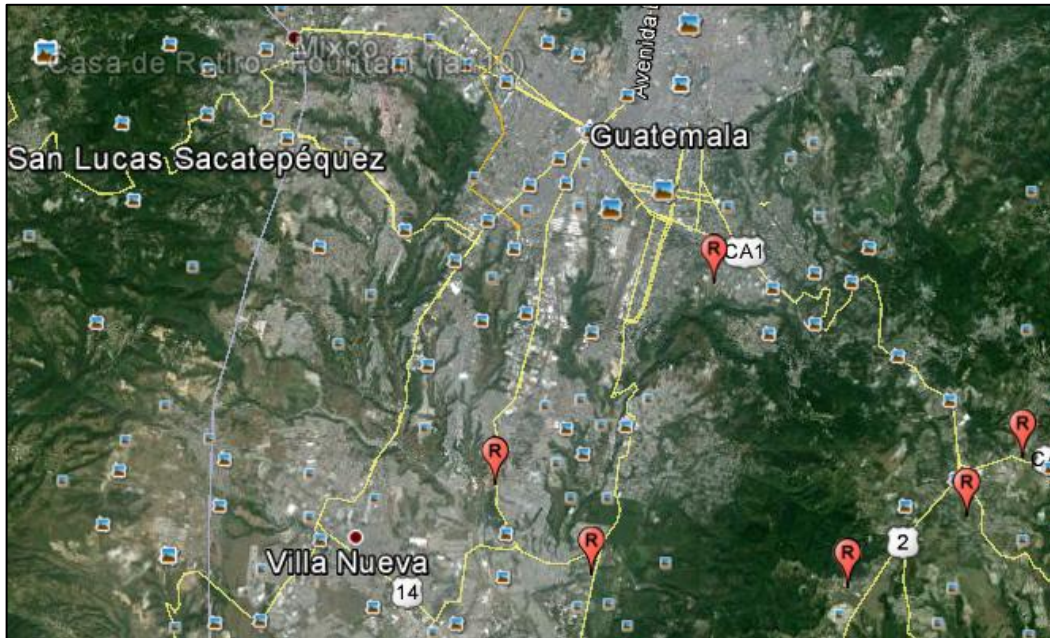
Fuente: municipalidad de Guatemala

- Inciso 1:

La tabla XXV, muestra que la primera interrogante es determinar el nivel isocerámico del sitio donde se instalara los supresores, en el sitio oficial de NASA se obtiene las coordenadas y trasladándose a Google Earth se obtiene la figura 64.



Figura 64. Nivel isoceráunico en el Banco de Guatemala 2013.



Fuente: elaboración propia, con base a Google Maps.

La figura 64 muestra un valor bajo en el nivel isoceráunico cercano al Banco de Guatemala, dando una puntuación de 1.

- Inciso 2:

La figura 63 muestra que el Banco de Guatemala está ubicado en un área urbana en crecimiento, lo que implica que el valor numérico es 1 en base a nivel de exposición y pregunta No. 2.

- Inciso 3:

La altura del Banco de Guatemala es una de las infraestructuras más altas en su alrededor, el valor numérico es 10, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 4:

La acometida del Banco de Guatemala es independiente el valor numérico es 5, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 5:

El historial de disturbios en el Banco de Guatemala es muy escaso, por lo que es un valor numérico de 1, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 6:

En el Banco de Guatemala existe equipo costoso a proteger, como los servidores y equipos electrónicos, se coloca un valor numérico de 10, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 7:

El costo de los equipos es alto en el Banco de Guatemala, se recomienda dar valor numérico de 10, de acuerdo a la tabla XXV.

El resultado del análisis lo demuestra la tabla siguiente:

Tabla XXVII. **Resultado numérico Banco de Guatemala**

<b>Paso</b>	<b>Valor</b>
1	1
2	1
3	10
4	1
5	1
6	10
7	10
<b>Resultado</b>	<b>34</b>

Fuente: elaboración propia.

El resultado obtenido de la tabla XXVII, es un valor de 34 puntos, en base a la propuesta de la tabla XXV, la coordinación de supresores es:

Tabla XXVIII. **Resultado de capacidad del supresor Banco de Guatemala**

<b>Categoría</b>	<b>Valor del supresor</b>
C Acometida	160KA
B Distribución	120KA
A Derivado	50KA

Fuente: elaboración propia.

Al analizar para la coordinación de supresores en Guatemala es una empresa ubicada en el 60,5 km, departamento de Escuintla, se responden las preguntas de la tabla XXV.

Figura 65. **Ubicación de planta industrial**

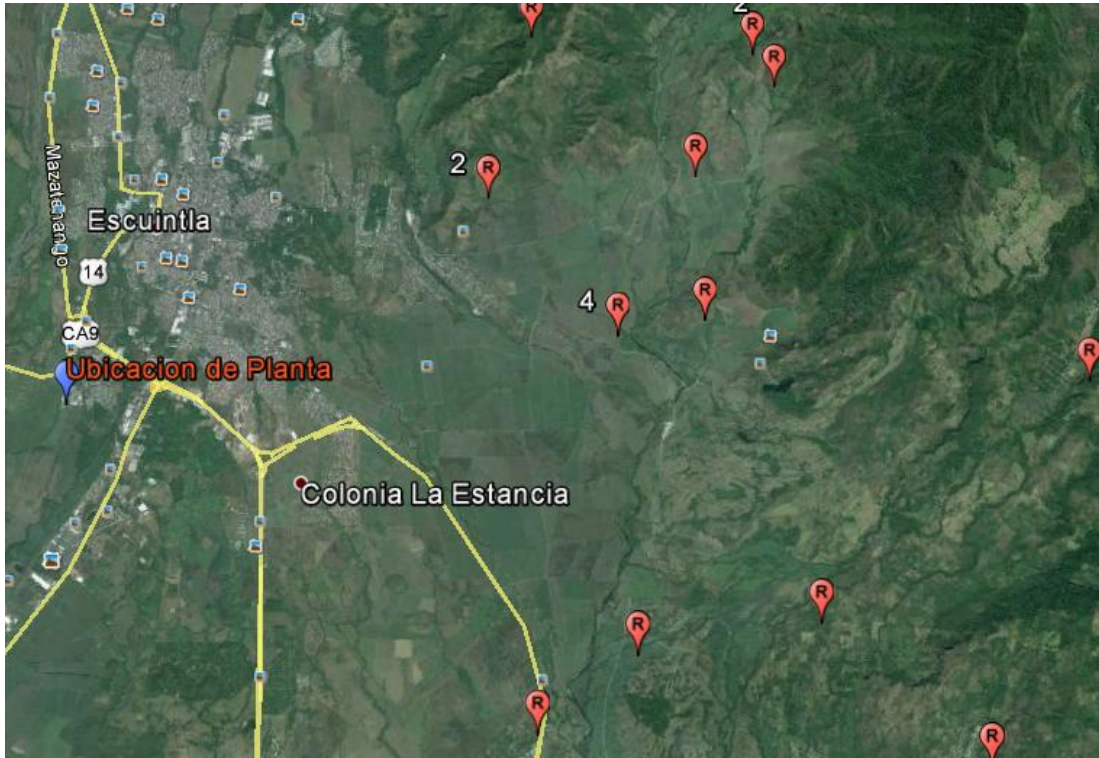


Fuente: carretera del Pacífico km 60,5.

- Inciso 1:

La tabla XXV muestra que el primer paso es determinar el nivel isocerámico del sitio donde se instalará los supresores, en el sitio oficial de NASA se obtiene las coordenadas y trasladándose a Google Earth se obtiene la figura 66.

Figura 66. Nivel isocerámico en planta industrial, Escuintla



Fuente: elaboración propia, con base a google Earth.

La figura 66 muestra un valor medio en el nivel isocerámico cercano al Banco de Guatemala, dando una puntuación de 5.

- Inciso 2:

La figura 66 muestra que la planta industrial está ubicada en un área de crecimiento densamente poblada, lo que implica que el valor numérico de 10.

- Inciso 3:

La altura de la planta industrial es una de las infraestructuras más altas en su alrededor, el valor numérico es 10, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 4:

La alimentación de la planta industrial en una distribución radial con acometida independiente, el valor a dar es 1, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 5:

El historial de disturbios en la planta industrial es moderado por ser una zona en crecimiento industrial, por lo que amerita un valor numérico de 5, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 6:

En la planta industrial existe equipo moderado a proteger, tarjetas electrónicas, equipos electrónicos, se coloca un valor numérico de 5, de acuerdo a la tabla XXV.

- Inciso 7:

El costo de los equipos es alto en la planta industrial, se recomienda un valor numérico de 10, de acuerdo a la tabla XXV.

El resultado del análisis muestra la tabla siguiente:

Tabla XXIX. **Resultados numérico de planta industrial**

<b>Paso</b>	<b>Valor</b>
1	5
2	10
3	10
4	1
5	5
6	5
7	10
<b>Resultado</b>	<b>46</b>

Fuente: elaboración propia.

El resultado obtenido de la tabla XXIX, es un valor de 42 puntos, en base a la propuesta de la tabla XXV, la coordinación de supresores es:

Tabla XXX. **Resultado de capacidad del supresor planta industrial**

<b>Categoría</b>	<b>Valor del supresor</b>
C Acometida	240KA
B Distribución	160KA
A Derivado	80KA

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó una tabla para la selección de las tres categorías de supresores que corresponde: Nivel C que está en la entrada de la acometida, Nivel B corresponde a la distribución y Nivel A corresponde al circuito derivado.
2. Los medios de inserción y propagación de los transitorios en una red eléctrica en baja tensión es a través de acople directo e indirecto por las descargas atmosféricas, acople directo e indirecto por maniobras en la red eléctrica o por la interacción entre sistemas.
3. La tecnología varistor oxido de metal es la más adecuada cuando se desea proteger un equipo por sus propiedades no lineales, alta capacidad de disipación de energía y respuesta rápida.
4. Si se desea comparar dos supresores de transitorios de diferentes fabricantes es necesario conocer los principales parámetros eléctricos del equipo.
5. Los criterios de selección de un supresor son: Nivel isocerámico, altura del edificio, ubicación de la estructura, tipo de acometida, historial de disturbios, importancia del sistema a proteger y costo económico.





## RECOMENDACIONES

1. Al realizar una instalación de un equipo de protección considere cumplir las especificaciones de cada fabricante, con respecto al equipo de protección y pasos de la instalación.
2. Instalar a 6 pulgadas como máximo un supresor de transitorios con respecto al tablero de distribución según UL 1449 tercera edición.
3. Considerar que la valor óhmico de la tierra física debe de ser el más pequeño posible.
4. Tomar en consideración los parámetros eléctricos y geográficos al realizar la coordinación en cascada de los supresores.
5. Evitar recorridos cercanos entre un sistema de comunicación y un sistema de potencia, para evitar inducciones magnéticas.
6. Tomar en cuenta que colocar tres supresores de la misma categoría en una protección en cascada no protegerá de igual manera.
7. Establecer un plan de verificación al equipo para que funcione correctamente durante su operación.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BALCELLS, Josep. *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*, 1992. 118 p. España.
2. CALVAS, Roland. *Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra, cuaderno técnico No. 177. Schneider Electric*, 2003. Argentina.
3. CHAPMAN, Stephen J. *Máquinas eléctricas*. 3a ed. 2000. 8 p.
4. GARZÓN ZABALA, Luz Adriana. *Pasantía “Universidad Nacional de Colombia” estudio de vida útil de varistor*, 2003.
5. *IEC 1312-1 International Standard Protection against lightning electromagnetic impulse first edition*, 1995-02.
6. *IEEE Std C62.41.1. Guide on the Surge environment in Low – Voltage (1000V and less) AC power circuits*, 2002. 5 p.
7. *IEEE Std C62.41 Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits*, 1991. 7 p.
8. *IEEE Std 519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, 1992.

9. MARTZLOFF, Francois. *On the Dispersion of lightning Current After a Direct Flash to a Building*, National Institute of Standards on Technology, 25th International Conference on Lightning Protection 18-22 September 2000.
10. \_\_\_\_\_. *Surge Protection Techniques in Low-Voltage AC Power Systems*, General Electric Company, Schenectady NY, 1979.
11. MARTZLOFF, Francois D.; MANSOOR, Arshad. *The Role and Stress of Surge-Protective Devices in Sharing Lightning Current*, Reprint of paper presented at EMC Europe 2002, September 2002.
12. \_\_\_\_\_. *A solution to Cascade Coordination*, IEEE transactions PWRD- 13 No. 4, December 1998.
13. MEJÍA VILLEGAS. *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. 2a ed. 2003. 120 p.
14. MURRAY P. David; DICKIN P. John; HANNA, Robert; MORIN, Tom. *High Resistance Grounding – Avoiding Unnecessary Pitfalls*, copyright Material IEEE, paper No. PCIC-2007-4.
15. NFPA 70 *National Electrical Code*, 2008 edition. 70-124 p. *UL 1449 Standard for safety for Surge Protective Devices, Third Edition*, 2006. 71 P.
16. SÉRAUDIE, Christophe. *Sobretensiones y limitadores de sobretensiones en BT – coordinación de aislamiento en BT*, Schneider Electric, 2000.

17. TOMÁS GÓMEZ – Acebo Temes. *Estudio de los parámetros de procesamiento del Varistor óxido de zinc y modelización de la junta de grano con películas delgadas*. San Sebastián, 1995.
18. ZOLA, Julio Guillermo. *Correlación entre ondas de ensayo para dispositivos de supresores de sobretensiones*. 2008. Vol. 4.

