

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**EFFECTO DE LAS SOBRETENSIONES POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS Y LA CONEXIÓN A TIERRA EN
EQUIPOS DE BAJA TENSIÓN**

T E S I S

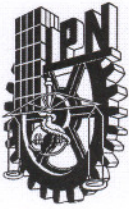
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ERNESTO MELÉNDEZ MELÉNDEZ.



MÉXICO D.F., JUNIO 2006



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 17:30 horas del día 6 del mes de Diciembre del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME ZAC. para examinar la tesis de grado titulada:
“EFECTO DE LAS SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y LA CONEXIÓN A TIERRA EN EQUIPOS DE BAJA TENSION”

Presentada por el alumno:

MELÉNDEZ

Apellido paterno

MELÉNDEZ

materno

ERNESTO

nombre(s)

Con registro:

B	0	0	1	2	0	0
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:


MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA


Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

DIRECTOR DE TESIS


M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER


DR. DAVID SEBASTIAN BALTAZAR


DR. DANIEL RUIZ VEGA

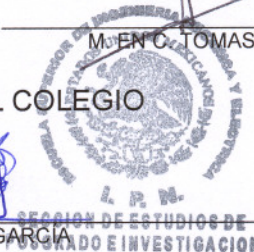

DR. PABLO GÓMEZ ZAMORANO


DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO


M. EN C. TOMAS ASIAIN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO


DR. JAIME ROBLES GARCIA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL


COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 10 del mes de febrero del año 2006, el (la) que suscribe Ernesto Meléndez Meléndez alumno(a) del Programa de Sistemas Eléctricos de Potencia con número de registro B001200, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del M. En C. Gilberto Enríquez Harper y cede los derechos del trabajo intitulado: EFECTO DE LAS SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS Y LA CONEXIÓN A TIERRA EN EQUIPOS DE BAJA TENSIÓN, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: angenspien@yahoo.com.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ernesto Meléndez Meléndez
Nombre y firma

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento al **M. en C. Gilberto Enríquez Harper** por el apoyo brindado durante el presente trabajo, así como al Ing. José Francisco Corza Plancarte, de la Gerencia de Información Tecnológica del Instituto de Investigaciones Eléctricas y al grupo de profesores que forman parte de la comisión revisora.

Al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología, a la Comisión Federal de Electricidad, a los compañeros y amigos que me apoyaron en la realización de esta tesis

.....**Gracias.**

DEDICATORIA

CON RESPETO Y ADMIRACIÓN A MIS PADRES:

ÁNGEL MELÉNDEZ GONZÁLEZ

MARINA MELÉNDEZ CHÁVEZ

RESUMEN.

La protección contra transitorios en instalaciones de baja tensión es de vital importancia ya que la mayoría de las actividades en nuestra sociedad dependen del comportamiento adecuado de estas instalaciones así como de los sistemas electrónicos. Esta tesis concentra una investigación sobre el efecto de las sobretensiones transitorias, la conexión a tierra y los dispositivos de protección en instalaciones de baja tensión.

Los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias, como el varistor y el tubo protector de descarga en gas en circuitos de protección son investigados. La respuesta de los dispositivos de protección es simulada, el modelo en el dominio del tiempo del varistor, del protector de descarga en gas y del cable de la instalación son implementados en el programa *Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program (ATP - EMTP)*. Los resultados obtenidos son comparados con los del autor [52] en la literatura afín y son orientados hacia el análisis de la calidad de la energía.

El efecto de la sobretensión transitoria tipo impulso en el punto de instalación del equipo sensible es inspeccionado de manera visual sobreponiendo la magnitud y duración del disturbio en la curva *Information Technology Industry Council (ITIC)* [35].

ABSTRACT.

The protection against transients surges in low tension facilities is of vital importance since most of the activities in our society depend on the suitable behavior of these facilities as well as on the electronic systems. This thesis concentrates an investigation on the effect of transients surges, grounding and protective devices in facilities.

The protective devices against transients surges, as well as the varistor and the gas discharge tube protector in protection circuits are investigated. The response of the protective devices is simulated, the time domain models of the varistor, the gas discharge tube protector and the installation cable are implemented in the *Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program (ATP - EMTP)*. The results obtained are compared with those of author [52] in compatible literature and are oriented to the analysis of the power quality.

The effect of the transient surge type impulse at the installation point of the sensible equipment is visually inspected superposing the magnitude and duration of the disturbance on the *Information Technology Industry Council (ITIC)* curve [35].

ÍNDICE

Contenido	Página
Resumen.	i
Abstract.	ii
Índice de tablas.	viii
Índice de figuras.	viii
Simbología.	xiii
Glosario.	xv
 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.	
1.1. Estado del arte.	4
1.2. Objetivo de la tesis.	6
1.3. Justificación.	6
1.4. Aportaciones.	7
1.5. Estructura de la tesis.	8
 CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES DE LAS SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS (PRINCIPALMENTE POR DESCARGA ATMOSFÉRICA) Y SU EFECTO SOBRE LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS.	
2.1. Introducción.	10
2.2. La descarga atmosférica.	11

2.3. Rutas de conducción para las descargas atmosféricas.	12
2.4. Definición de transitorio.	15
2.4.1. Disturbios.	16
2.5. La simulación de los sistemas de distribución.	17
2.6. Modelo aproximado de la línea de transmisión de parámetros concentrados.	18
2.7. Efecto sobre los sistemas y equipos eléctricos.	21

CAPÍTULO 3: LA FUNCIÓN DE LOS APARTARRAYOS Y LAS ONDAS CORTADAS AL RESTO DEL EQUIPO.

3.1. Introducción.	22
3.2. Los dispositivos de supresión.	23
3.3. Clasificación de los dispositivos de protección.	23
3.3.1. Dispositivos de tipo arco.	24
3.3.1.1. Dispositivos tipo explosor.	24
3.3.1.2. Tubo protector de descarga en gas.	24
3.3.2. Dispositivos sujetadores de voltaje.	25
3.3.2.1. Varistores de óxido metálico.	25
3.3.2.2. Diodos tener.	27
3.3.2.3. Varistores de carburo de silicio.	27
3.4. Principio de protección contra sobretensiones transitorias.	27
3.5. Protección híbrida ó protección múltiple.	28
3.6. Modelado del tubo protector de descarga en gas.	29
3.7. Modelado del varistor de óxido metálico.	35
3.7.1. Límites del modelo del varistor.	37
3.8. Simulación del comportamiento de los dispositivos de protección.	41

3.9.	Modelado del cable de la instalación.	43
------	---------------------------------------	----

CAPÍTULO 4: EL IMPACTO DE LAS SOBRETENSIONES EN LAS INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN.

4.1	Introducción.	44
4.2.	Representación de las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas.	45
4.3.	La curva CBEMA.	46
4.3.1.	La curva ITIC.	47
4.4.	Metodología para el análisis transitorio en equipos sensibles.	51
4.5.	Esquema de protección.	51
4.6.	Aplicación de la metodología propuesta para el análisis de transitorios a un casos de estudio (CASO DE ESTUDIO A).	52
4.7.	Análisis de resultados.	60

CAPÍTULO 5: LA FORMA DE PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES EN BAJA TENSIÓN Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA.

5.1.	Introducción.	61
5.2.	La necesidad de instalar dispositivos de supresión.	62
5.2.1.	Circuitos combinados y la protección en cascada.	63
5.3.	La protección mediante varistores de óxidos metálicos y protectores de descarga en gas.	63
5.4.	Selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.	76
5.5.	Estándares UL 1449 y ANSI/IEEE C62.41.	76
5.6.	La aplicación de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (CASO DE ESTUDIO B).	77
5.6.1.	Configuraciones de prueba.	78
5.7.	Impedancia de aterrizamiento en función del tiempo y de la corriente.	85

5.8.	El rol del aterrizamiento.	85
5.9.	Análisis de resultados.	91

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1.	Conclusiones	92
6.2.	Trabajos futuros.	93

REFERENCIAS.	94
---------------------	-----------

APÉNDICE A: DESCRIPCIÓN BREVE DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN MODELS.

A.1.	Introducción.	100
A.2.	Simulación en el EMTP.	101
A.3.	Simulación en el EMTP con MODELS.	102
A.4.	Instrucciones principales en MODELS.	103
A.5.	Estructura.	103
A.6.	Representación.	104
A.7.	Instrucciones del grupo MODELS.	104
A.8.	Autodiagnóstico.	105
A.9.	Herramientas.	105
A.10.	Arreglos.	105
A.11.	Reglas de formato.	106
A.12.	Uso de MODELS en el EMTP.	106
A.13.	Estructura del lenguaje MODELS.	107
A.14.	Principales grupos en MODELS.	107

A.15.	Definición de MODEL.	108
A.16.	Declaraciones.	109
A.17.	Directivas de simulación.	110

APÉNDICE B: PARÁMETROS DE VARISTORES DE ÓXIDO METÁLICO.

B.1.	Parámetros de la serie S10K75, 95, 115, 130, 140, 150 y 175.	111
B.2.	Parámetros de la serie S14K140, 150 y 175.	112
B.3.	Parámetros de la serie S18K140, 150 y 175.	113
B.4.	Parámetros de la serie S20K140, 150 y 175.	113
B.5.	Parámetros de la serie B40K250.	113

APÉNDICE C: LISTADO DE LOS PROGRAMAS REALIZADOS EN EMTP.

C.1.	Programa que simula el comportamiento del protector de descarga en gas CGZ/230 VL.	114
C.2.	Programa que simula el comportamiento del supresor SIOV.	118
C.3.	Programa que simula el comportamiento del tubo de descarga en gas y del supresor de sobretensiones transitorias TVSS en un arreglo en cascada.	121
C.4.	Programa que simula el comportamiento de la conexión a tierra.	126

Índice de tablas

2.1. Parámetros típicos de la descarga de nube a tierra.	12
2.2. Características de los disturbios.	16
2.3. Ecuaciones estándar para representar dos de las formas de onda transitorias dadas por el IEEE Std. C62.41-1991.	17
4.1. Valores proporcionados por la curva ITIC.	48
4.2. Sobretensiones transitorias.	50
4.3. Sobretensiones transitorias en diferentes puntos del arreglo.	59
5.1. Voltajes de supresión UL 1449	76
5.2. Voltajes de paso ANSI/IEEE C62.41	77
5.3. Sobretensiones transitorias obtenidas en la simulación, para una onda de corriente de 6 kV, 1.2/50 us.	83
5.4. Comparación entre las sobretensiones transitorias obtenidas en [52] y las de esta investigación, para una onda de corriente de 10 kA, 8/100 us.	83
5.5. Tabla comparativa de los varistores instalados en la configuración en [52] y la de esta investigación.	84

Índice de figuras

2.1. Múltiples flameos en los postes.	12
2.2. Acoplamiento capacitivo en los devanados del transformador.	13
2.3. Rutas de conducción a tierra.	14
2.4. Circuito equivalente de la línea de transmisión de parámetros concentrados.	20
2.5. e_0 -Sobretensión aplicada al arreglo de conductores, e_i - Sobretensión impresa al aislador, e_w - Sobretensión impresa al poste de madera.	20
3.1. Protección por medio de un varistor.	26
3.2. Protección híbrida con dos dispositivos de supresión.	29

3.3.	Representación del GDP para la simulación en EMTP-ATP.	31
3.4.	Modelo del tubo de descarga en gas.	31
3.5.	Diagrama de flujo para el retardo de tiempo.	33
3.6.	Diagrama de flujo de la resistencia de arco.	34
3.7.	Curva característica V-I del varistor.	35
3.8.	Función del varistor.	35
3.9.	Modelo del varistor del óxido metálico.	36
3.10.	Curva V-I, del varistor SIOV S20K275.	38
3.11.	Voltaje de sujeción del varistor SIOV S10K95, durante un voltaje aplicado de 2 kV, 10/700 us.	39
3.12.	Diagrama de flujo que representa la característica del supresor.	40
3.13.	Representación del varistor para la simulación en EMTP-ATP.	40
3.14.	Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 800 V.	41
3.15.	Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 1200 V.	41
3.16.	Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 1200 V.	42
3.17.	Curva V-I, del varistor SIOV S20K275 simulada en ATP DRAW.	42
3.18.	Curva R-I, del varistor SIOV S20K275 simulada en ATP DRAW.	42
3.19.	Representación del cable de la instalación para la simulación en EMTP-ATP.	43
3.20.	Efecto piel presente en el conductor.	44
4.1.	Information Technology Industry Council (ITIC).	48
4.2.	Ejemplo de aplicación de la curva ITIC.	49
4.3.	Arreglo utilizado para determinar las sobretensiones transitorias en diferentes puntos de impacto (A,B,C,D).	53
4.4.	Modelo en ATP/EMTP del arreglo utilizado para determinar las sobretensiones transitorias en diferentes puntos de impacto (A,B,C,D).	54
4.5.	Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto A del arreglo de la figura 4.3.	54

4.6.	Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto B del arreglo de la figura 4.3.	55
4.7.	Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto C del arreglo de la figura 4.3.	55
4.8.	Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto D del arreglo de la figura 4.3.	56
4.9.	Perfil de voltajes debido a un impacto de voltaje en el punto A del arreglo de la figura 4.3.	56
4.10.	Perfil de voltajes debido a un impacto de voltaje en el punto B del arreglo de la figura 4.3.	57
4.11.	Perfil de voltajes debido a un impacto de voltaje en el punto C del arreglo de la figura 4.3.	57
4.12.	Perfil de voltajes debido a un impacto de voltaje en el punto D del arreglo de la figura 4.3.	58
5.1.	Principio de protección mediante varistores de óxido metálico y protectores de descarga en gas.	63
5.2.	Forma de onda de 10/700 us., 2 kV de circuito abierto aplicada a diferentes varistores.	64
5.3.	Operación del SIOV- S10K75 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	64
5.4.	Operación del SIOV- S10K95 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	65
5.5.	Operación del SIOV- S10K115 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	65
5.6.	Operación del SIOV- S10K130 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	66
5.7.	Operación del SIOV- S10K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	66
5.8.	Operación del SIOV- S10K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	67
5.9.	Operación del SIOV- S10K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	67
5.10.	Operación del SIOV- S14K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	68
5.11.	Operación del SIOV- S14K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	68
5.12.	Operación del SIOV- S14K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	69

5.13.	Operación del SIOV- S18K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	69
5.14.	Operación del SIOV- S18K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	70
5.15.	Operación del SIOV- S18K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	70
5.16.	Operación del SIOV- S20K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	71
5.17.	Operación del SIOV- S20K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	71
5.18.	Operación del SIOV- S20K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us.	72
5.19	Arreglo completo de la protección, simulado en ATPDRAW	73
5.20.	Perfil de voltajes obtenidos durante la operación del tubo de descarga en gas CGZ/230 VL (GDP) y el varistor SIOV S10K95 obtenido con ATP/EMTP.	74
5.21.	Ejemplos de esquemas de protección.	75
5.22.	Ejemplo de aplicación de los dispositivos de protección en cascada	75
5.23.	Configuración general.	78
5.24.	Implementación del circuito en ATP/EMTP utilizando un supresor en cada punto de la instalación.	79
5.25	Supresores en los tres puntos	79
5.26.	Sin supresor en el tablero	80
5.27.	Sin supresor en la carga	80
5.28.	Sin supresores	81
5.29.	Supresor solo en la acometida	81
5.30.	Supresor solo en el tablero	82
5.31.	Supresor sólo en la carga	82
5.32.	Porcentaje de sobretensión de cada una de las configuraciones indicadas en la tabla 5.3.	84
5.33.	Implementación de un electrodo de puesta a tierra en ATP/EMTP.	87

5.34.	Onda de corriente de 10 kA@ 8/20 us, aplicada a la conexión a tierra.	87
5.35.	Comportamiento en el tiempo de la resistencia del electrodo de tierra, resistividad del terreno 30 ohms-m, $r_0=10$ ohms, 300 kV/m., 10 kA, 8/20 us. Comportamiento resistivo del: 0-Primer elemento, □- Segundo elemento, Δ- Tercer elemento.	88
5.36.	Arreglo de la conexión a tierra en ATPDRAW [15].	89
5.37.	Perfil de la onda de voltaje para diferentes valores de conexión a tierra, resistividad de 30 ohms-m, $r_0=10 - 0, 157 - \square$ y $20 - \Delta$ ohms, 300 kV/m., 500 A, 8/20 us.	90
5.38.	Perfil de la onda de corriente en el tiempo por el electrodo de tierra, resistividad de 30 ohms-m, $r_0=10 - 0, 157 - \square$ y $20 - \Delta$ ohms, 300 kV/m., 500 A, 8/20 us.	90

SIMBOLOGÍA.

a_{ij}	Distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j
b_{ij}	Distancia entre el conductor i y el conductor j
C	Capacitancia, Farads
C_p	Capacitancia del varistor
E_0	Gradiente de campo eléctrico
g	Conductancia
h	Altura de los conductores
I	Corriente
I_i	Corriente de ionización
L	Inductancia
L_s	Inductancia del varistor
P	Potencia
R	Resistencia
r	Radio del conductor
ρ	Resistividad del terreno
R_s	Resistencia del varistor
S	Índice de variación de voltaje.

SVR	Capacidad de supresión de voltaje
t	Tiempo
τ	Constante de tiempo del arco eléctrico
t_d	Tiempo de retardo
v	Velocidad de propagación
V	Voltaje
V_{BD}	Umbral de voltaje de disparo
V_I	Voltaje incidente
V_{in}	Voltaje de entrada
V_{out}	Voltaje de salida
V_p	Voltaje pico de la onda de voltaje a frecuencia del sistema
V_R	Voltaje reflejado
V_T	Voltaje transmitido
$V(t)$	Señal de voltaje en función del tiempo, en algún punto del sistema
Z	Impedancia característica
Z_c	Impedancia del dispositivo de sujeción
Z_{ij}	Impedancia mutua entre el conductor i y el conductor j
Z_s	Impedancia de la fuente

GLOSARIO.

ATP	Alternative Transient Program
CEBEMA	Computer Business Manufacturers Association
EMTP	Electro Magnetic Transient Program
Explosor	Distancia de separación en aire o en gas
GDP	Protector de descarga en gas
Híbrido	Combinación de dos o más dispositivos de supresión
ITIC	Information Technology Industry Council
MODELS	Lenguaje de programación
MOV	Varistor de óxidos metálicos
PSpice	Paquete de simulación de circuitos eléctricos
PLC	Controlador lógico programable
RCC	Resistencia controlada por corriente
SCV	Switch controlado por voltaje
SiC	Apartarrayos de carburo de silicio
SIOV	Varistor de óxido metálico (fabricante)
TVSS	Supresor de transitorios de voltaje (SPD)
Varistor	Resistencia variable
ZnO	Varistor de óxido de zinc

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

Actualmente la Calidad de la Energía eléctrica en los comercios y en las industrias es un aspecto muy importante que hay que tener presente. Hasta hace algunos años no había que otorgar mayor atención al tipo de señal que alimentaba a los equipos que utilizaban dispositivos electrónicos, los cuales eran robustos y poco sensibles a las variaciones de tensión. En la actualidad basta mirar a nuestro alrededor para darse cuenta de la infinidad de equipos electrónicos complejos con que se cuenta. Esta complejidad trae consigo un sin fin de comodidades, pero también trae la desventaja de que son equipos sensibles debido a que utilizan dispositivos de estado sólido, entre los cuales se encuentran los circuitos integrados. Esto los hace particularmente vulnerables a problemas eléctricos de origen atmosférico que anteriormente pasaban desapercibidos.

El impulso de voltaje producido por una descarga atmosférica rompe fácilmente el aislamiento del equipo a menos que la instalación esté protegida con dispositivos de supresión, permitiendo únicamente que el voltaje que llega

al punto donde se encuentra instalado el equipo no adquiera una magnitud ni duración que provoque su mal funcionamiento y destrucción.

Debe tenerse claro que la función de un dispositivo de supresión es desviar la energía del transitorio, evitando que alcance al equipo instalado. Los equipos de cómputo están sujetos a daño, o bien, producen errores en los datos a causa de las sobretensiones transitorias debido a la ausencia de dispositivos de protección. Equipos electrónicos como controladores de velocidad y equipo de comunicación están sujetos al mismo disturbio [36].

El daño causado por el transitorio es inmediato si la energía de la sobretensión provoca la falla de aislamiento entre los dispositivos de estado sólido del equipo. El daño es latente si el aislamiento o los componentes son severamente estresados por uno o varios transitorios, de manera que no ocurre una falla inmediata. Si después de un tiempo, ocurre un transitorio, que generalmente no causaría problema alguno, el equipo falla sin una causa aparente [43]. La primera línea de defensa debe estar en el punto más lejano del equipo a proteger. Esto es, en el punto de entrada del servicio eléctrico si la instalación es alimentada por medio de conductores aéreos. Esta línea de defensa debe ser reforzada mediante la instalación de otro(s) dispositivo(s) de supresión localizados cerca del equipo a proteger y desviar la sobretensión transitoria remanente que logra cruzar la primera línea de defensa [42].

Conforme la tecnología avanza, las empresas dependen cada vez más de los equipos electrónicos e informáticos, las líneas de producción son controladas por circuitos digitales, la información se maneja vía electrónica desde el correo hasta el control total de la organización, los registros de las operaciones

diarias quedan guardados en su mayoría de forma digital en grandes servidores de datos, las comunicaciones se vuelven vitales desde un conmutador hasta una videoconferencia ó comunicación vía satélite.

Toda esta información digital se procesa y almacena en equipos electrónicos y de cómputo, los cuales son cada vez más rápidos. Sin embargo, también son más sensibles a los disturbios en el sistema eléctrico. Por esto se ha desarrollado el término *Calidad de la Energía*, el cual engloba todas las acciones necesarias para desarrollar una instalación que alimente a los equipos sensibles con energía continua y de calidad [67].

Cuando se discute el tema de la calidad de la energía, se asume erróneamente que se debe tratar únicamente con equipos de cómputo. Esto se debe a que fueron las computadoras las primera cargas que dejaron de operar adecuadamente por falta de calidad en la energía eléctrica recibida de la empresa suministradora. Con la llegada del microprocesador, hay una multitud de equipos que operan a niveles de voltaje similares al de los equipos de cómputo. Así que la calidad de energía que estos equipos reciben es tan importante como la que reciben estos últimos [38]. La categoría que cubre a tales equipos, incluyendo las computadoras personales, y equipos de cómputo para el control de procesos, es adoptada en esta tesis como equipos que contienen *dispositivos electrónicos de estado sólido* por lo que en adelante nos referimos como *equipo electrónico sensible* [36], o bien, aquel que requiere de un suministro eléctrico de alta calidad, esto es, libre de disturbios [55].

La calidad de la energía es un tema que necesita atención continua y es cada vez más crítica debido al incremento en el número dispositivos electrónicos en

equipos de cómputo, controles de proceso y equipo de comunicaciones, ya que son sensibles a los disturbios en el sistema de potencia [1], [21]. Los efectos de los disturbios sobre los equipos del sistema son vistos en términos de vulnerabilidad y susceptibilidad en los estudios de Calidad de la Energía [18], [39].

1.1. Estado del arte.

Actualmente existe en el mercado una tecnología llamada *discriminatoria*, que permite identificar las sobretensiones temporales y las sobretensiones transitorias en el sistema. Esta tecnología no sólo asegura el funcionamiento correcto, sino que también prolonga la vida útil del dispositivo de protección.

La tecnología de los dispositivos de supresión utiliza varistores de óxido metálico para limitar los eventos transitorios. La tecnología *discriminatoria* cuenta con un circuito que permite diferenciar la frecuencia de las sobretensiones consideradas como temporales de la frecuencia de las sobretensiones transitorias con el fin de que el dispositivo de supresión sea inmune a las sobretensiones temporales a 60 Hz. [73].

En sistemas de alta tensión, los apartarrayos de óxido metálico (ZnO) han reemplazado a los apartarrayos de carburo de silicio (SiC) para la protección contra sobretensiones transitorias. Los apartarrayos de ZnO tienen características no lineales y dejan pasar menos corriente a frecuencia del

sistema que los apartarrayos de SiC; dejando pasar sólo al impulso de corriente causado por la sobretensión transitoria. Esto permite que los apartarrayos con menos capacidad de energía reemplacen a los apartarrayos de SiC [24], [33].

Por el lado de baja tensión, para hacer frente a los problemas asociados con los transitorios, se usan los dispositivos supresores de transitorios de voltaje (TVSS) [8]. Los dispositivos más recientes son los varistores de óxido metálico (MOV) [72].

Existe un gran número de herramientas disponibles para el análisis de transitorios. En los métodos en el dominio del tiempo, la solución matemática viene de la solución directa de las ecuaciones diferenciales. Existe software designado para analizar transitorios en forma numérica tales como el *Electro Magnetic Transient Program (EMTP)*, *Alternative Transient Program (ATP)*, y varias versiones de *Current Distribution, Electromagnetic Interfere, Grounding, and soil Structure Analysis (CDEGS)* [16], [31], [64], [65], [66].

1.2. Objetivo de la tesis.

Establecer una metodología para analizar el efecto de los transitorios por descargas atmosféricas que afectan a los equipos en baja tensión que son sensibles a este tipo de transitorios. Apoyada en el estudio de transitorios y en la aplicación de los dispositivos de protección de tecnologías recientes.

1.3. Justificación.

Con la aparición de los equipos sensibles que contienen electrónica digital y componentes de estado sólido, se observó un comportamiento anormal y un elevado índice de fallas cuando se presentan transitorios, principalmente por descargas atmosféricas, debido a esto, es necesario hacer una revisión de los estudios que se hacen relacionados con el efecto de las ondas de sobretensión transitoria en los equipos.

Los voltajes transitorios son breves e impredecibles. Esas dos características los hacen difíciles de detectar y de medir [27].

Hoy en día los sistemas eléctricos usan componentes de estado sólido y son vulnerables a daño y susceptibles a mal funcionamiento debido a los transitorios [9], [39].

Continuamente los circuitos sensibles analógicos y digitales son dañados por sobretensiones transitorias, es por ello que estas últimas deben ser mitigadas

mediante la aplicación de dispositivos de supresión. Sin embargo, el problema es cuantificar la magnitud y duración del transitorio para la correcta selección de los dispositivos supresores de transitorios [27].

El problema principal es que, mientras el límite de la velocidad de los dispositivos digitales actuales incrementa continuamente, la lógica de voltajes se reduce simultáneamente. Esta relación no es accidental. Conforme más transistores y otros dispositivos son empaquetados juntos sobre la misma superficie, el espacio entre ellos se reduce. Esta distancia mínima entre componentes ayuda a reducir el tiempo que requieren los circuitos para operar. De otra manera, si el voltaje en el circuito permaneciera sin cambio, debido al mismo empaquetamiento (encapsulado) se incrementaría la posibilidad de que la corriente viaje por una ruta más corta a tierra ó debido a una falla de aislamiento entre dos componentes adyacentes. Estas fallas se previenen reduciendo los voltajes en el circuito, pero hacen vulnerable al equipo ante un disturbio [23], [29], [38].

1.4. Aportaciones.

1. Una metodología para el análisis de estudios transitorios en equipos sensibles.
2. El modelado en ATP/EMTP de dos dispositivos de supresión de sobretensiones transitorias: el varistor de óxido metálico y el tubo protector de descarga en gas, así como del electrodo de puesta a tierra utilizando el lenguaje de programación MODELS.

1.5. Estructura de la tesis.

En el capítulo 2, CONCEPTOS GENERALES DE LAS SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS (PRINCIPALMENTE POR DESCARGA ATMOSFÉRICA) Y SU EFECTO SOBRE LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS, se presenta una de las principales causas de falla en los sistemas eléctricos, los parámetros de una descarga atmosférica y las rutas por donde alcanza a los equipos. Se da la definición de transitorio y los tipos de transitorios que existen en los sistemas eléctricos. Finalmente se presenta la manera en que una descarga atmosférica produce una sobretensión transitoria cuando impacta sobre una línea aérea, y su efecto reflejado en los equipos eléctricos.

En el capítulo 3, LA FUNCIÓN DE LOS APARTARRAYOS Y LAS ONDAS CORTADAS AL RESTO DEL EQUIPO se presenta la interpretación que debe darse a los varistores, respecto a la manera en como manejan la energía del transitorio, así como su característica no lineal durante su operación. Se presenta la clasificación de los dispositivos de supresión y del principio de protección con dispositivos híbridos. El modelo en ATP/EMTP del cable de la instalación, el tubo protector de descarga en gas.

En el capítulo 4, EL IMPACTO DE LAS SOBRETENSIONES EN LAS INSTALACIONES DE BAJA TENSION se presentan tres de los efectos en los equipos cuando se ven expuestos a una sobretensión transitoria. La representación de la descarga atmosférica sobre las líneas aéreas y las curvas

establecidas por fabricantes de equipos cómputo y de equipos que contienen dispositivos de estado sólido, que muestran los límites de operación correcta de tales equipos. Se presenta una metodología para el análisis transitorio en equipos sensibles y su aplicación a un caso de estudio.

En el capítulo 5, LA FORMA DE PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES EN BAJA TENSIÓN Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA, se presenta una de las herramientas de simulación utilizadas para el análisis de transitorios; la necesidad de instalar dispositivos de supresión, la protección en cascada utilizando los dispositivos modelados en el capítulo tres; el comportamiento de varios dispositivos es simulado en función de su diámetro, y de su voltaje máximo de operación. Se presenta el arreglo completo de una protección híbrida simulada en ATP-DRAW; se muestra a modo de ejemplo, esquemas de protección. La aplicación y selección de los dispositivos de protección de acuerdo a UL 1449 y C62.41. Finalmente se presenta el comportamiento del sistema de aterrizamiento en función del tiempo y de la corriente aplicada por una descarga atmosférica.

En el capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, como su nombre lo indica, se concluye partiendo sobre la base de las simulaciones obtenidas en esta tesis y se sugieren trabajos futuros para la aplicación de los dispositivos de protección en instalaciones de baja tensión.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS GENERALES DE LAS SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS (PRINCIPALMENTE POR DESCARGA ATMOSFÉRICA) Y SU EFECTO SOBRE LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS.

2.1 Introducción.

Las sobretensiones de origen atmosférico son una de las principales causas de falla en los sistemas eléctricos. Las sobretensiones se clasifican en temporales y transitorias. Las sobretensiones temporales presentan una frecuencia de 60 Hz., y una duración de varios milisegundos. Las sobretensiones transitorias presentan frecuencias mayores a 60 Hz.; dentro de ésta clasificación se encuentran las originadas por descargas atmosféricas y tienen una duración menor a medio ciclo [18]. [27].

Las fuente más severa de impulsos transitorios es la descarga atmosférica. Esta se origina por la atracción de cargas positivas y negativas en la atmósfera dando como resultado la construcción de una descarga de energía eléctrica [60]. Esta investigación se concreta en como las descargas atmosféricas causan sobretensiones transitorias sobre los sistemas de energía eléctrica.

2.2. La descarga atmosférica.

Existen dos formas en que se producen las descargas atmosféricas: nube a tierra y entre nubes.

La descarga de nube a tierra comienza con un plasma altamente ionizado, llamado *descarga descendente*, el cual se propaga de la nube hacia tierra. Cuando esta *descarga descendente* se encuentra a unos 50 m de alcanzar tierra, otra descarga eléctrica, llamada *descarga ascendente*, se propaga desde tierra hacia arriba estableciendo un canal de conducción entre la tierra y la *descarga descendente*. En este momento un arco de corriente, llamado *descarga de retorno*, fluye de tierra por el canal ionizado hacia la nube. La *descarga de retorno* produce una luminosidad intensa. Al final de la *descarga de retorno*, fluye en el canal una corriente del orden de 100 A [36], [60]. Esta corriente tiene una duración de algunos milisegundos. Después de algunas decenas de milisegundos o más, otra *descarga descendente* viaja por el mismo canal hacia tierra produciendo una segunda *descarga*, repitiéndose este proceso varias veces. El evento completo es llamado *rayo*. Un *rayo* contiene entre tres y cinco retornos de *descarga descendente* [60]. Los parámetros de la *descarga de nube a tierra* se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros típicos de la descarga de nube a tierra [36].

Parámetro	Valor típico	Valor máximo
Magnitud pico	20 kA	2000 kA
Total de carga transferida	20 C	30 C
Índice de tiempo de la descarga de retorno	0.2 μ s	-
Máxima di/dt de la descarga de retorno	10^{11} A/s	-

2.3. Rutas de conducción para las descargas atmosféricas.

La ruta más obvia de conducción es por impacto directo al cable de fase, ya sea en el lado primario o en el secundario produciendo grandes sobretensiones.

El transitorio viaja varios kilómetros a lo largo de la línea (alimentador) y causa múltiples flameos en los postes cuando éste pasa por ellos, como se muestra en la figura 2.1.

Sin embargo ésta no es la única manera en que las descargas entran a las instalaciones y causan daño [42].

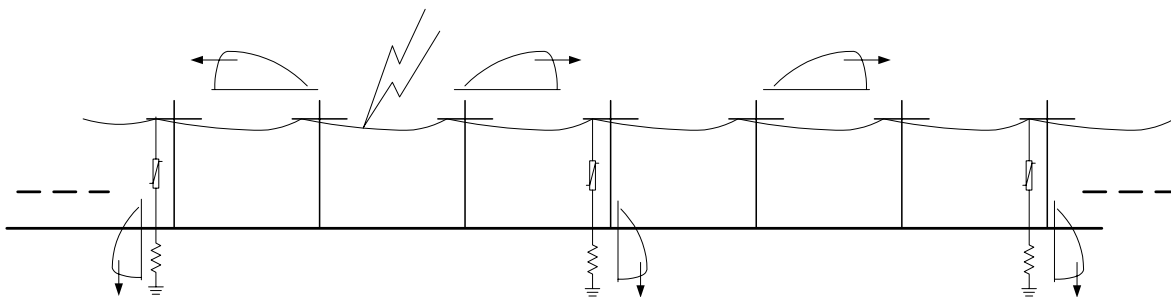


Figura 2.1. Múltiples flameos en los postes.

La descarga atmosférica no necesariamente tiene que impactar a un conductor de fase aéreo para inyectar un impulso de voltaje sobre el sistema de potencia. Si la descarga atmosférica impacta cerca de la línea se inducirá una sobretensión sobre ella [42].

Algunos de los transitorios causados por la descarga atmosférica entran a la carga a través de la capacitancia que existe entre los devanados del transformador de servicio y son de corta duración, como se muestra en la figura 2.2.

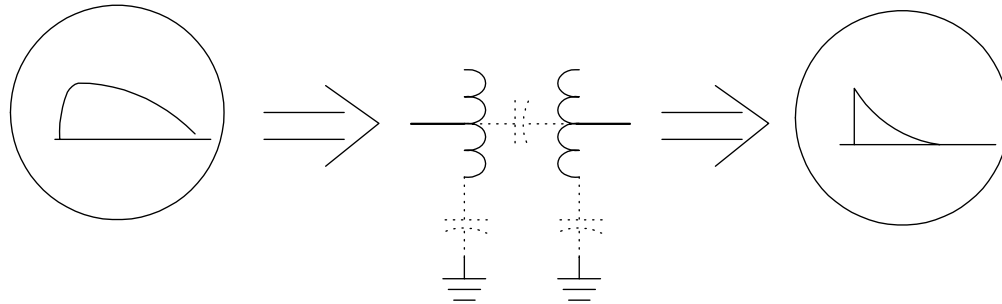


Figura 2.2. Acoplamiento capacitivo en los devanados del transformador.

Una sobretensión oscilatoria se presenta en el lado secundario cuando se aplica un impulso de voltaje al lado primario; parte de éste impulso es conducido a través del apartarrayos del transformador dirigiéndose hacia el sistema de

conexión a tierra como se muestra en la figura 2.3. Un problema en particular se presenta si la resistencia de conexión a tierra de la carga es menor que la del apartarrayos; de esta manera el transitorio de corriente fluirá a través de los conductores a tierra en la instalación del usuario [42].

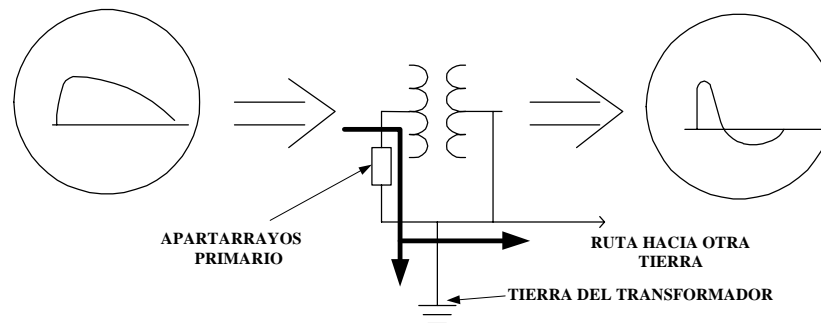


Figura 2.3. Rutas de conducción a tierra.

Los problemas principales de calidad de la energía debido a impactos de descargas atmosféricas que entran por el sistema de tierra son:

1. La elevación del potencial de la tierra local hasta varios kV. por encima de otras en la vecindad. El equipo electrónico sensible que es conectado entre dos tierras de referencia falla cuando está sujeta a este tipo de descargas.
2. Se inducen altos voltajes en los conductores de fase cuando los transitorios de voltaje pasan a través de los conductores de tierra.

2.4. Definición de transitorio.

La definición de Calidad de la Energía ó específicamente de un disturbio de la Calidad de la Energía se establece como cualquier cambio en la potencia, voltaje, corriente, o frecuencia que interfiere con la operación correcta del equipo [31].

En los sistemas eléctricos se define al transitorio como un cambio rápido en el voltaje o en la corriente del sistema sobre un periodo corto. Los transitorios considerados en esta investigación poseen una duración que no excede la mitad del periodo de la forma de onda principal a 60 Hz. [18], [27]. Otras definiciones de transitorios son presentadas en [39] y [44].

Si $|V(t)| > 1.25 \cdot V_p$, entonces $V(t)$ es una sobretensión temporal que rebasa los límites normales de operación del equipo eléctrico [39], [56]. Una sobretensión transitoria de alto voltaje es definida como una forma de onda $|V(t)|$ mayor a $2.0 \cdot V_p$ con una duración menor a medio ciclo de la forma de onda de voltaje a frecuencia del sistema. Esta definición de sobretensión transitoria de alto voltaje es definida en ANSI C62.41-1991 [47].

2.4.1. Disturbios.

Las sobretensiones de corta duración, son conocidas como tipo I, estas alcanzan valores tan altos que superan el 200% del voltaje nominal del sistema como lo indica la tabla 2.2. [38]. Las sobretensiones tipo II y III también son definidas en la tabla siguiente pero quedan fuera del alcance de esta investigación.

Tabla 2.2. Características de los disturbios [38].

	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Definición	Sobretensión transitoria tipo impulso y oscilatoria	Sobretensiones y supresiones momentáneas	Desenergizaciones
Causas	Descargas atmosféricas, switcheo de bancos de capacitores o inductores, operación de las cargas.	Fallas en sistema de potencia; cambios grandes de carga.	Fallas en sistema de potencia; cambios grandes de carga.
Umbral*	200 % o más del voltaje rms.	Abajo del 80 al 85% y arriba del 110% del voltaje rms respectivamente.	Abajo del 80 al 85% del voltaje rms
Duración	Menor a 0.5 ciclos para tipo impulso y hasta 16.7 ms., o más para tipo oscilatorio.	De 4 a 60 ciclos, dependiendo del tipo del sistema de potencia y de distribución.	De 2 a 60 segundos si la corrección es automática; tiempos mayores si la corrección es manual.
	0	0.5	120
	Duración (ciclos a 60 Hz.)		

* Fuera de estos límites, el disturbio causa daño al equipo electrónico.

2.5. La simulación de los sistemas de distribución.

La simulación de los sistemas de distribución es difícil debido a la variedad de configuraciones y componentes. Por otra parte, debido a la naturaleza aleatoria de los disturbios y a las características variables del medio de transmisión, los transitorios exhiben amplias variaciones en su forma de onda. Sin embargo, mediciones de laboratorio y de campo, confirmados por cálculos teóricos, han llevado a la selección de un pequeño número de formas de onda que son representativas de la mayoría de los transitorios encontrados en la práctica [26].

Seis señales diferentes son desarrolladas por el estándar de IEEE C62.41-1991 [47], y ayudan a entender las características de las formas de onda que se aproximan a la mayoría de los disturbios. Dos de ellas son utilizadas en la presente investigación y sus características son mostradas en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Ecuaciones estándar para representar dos de las formas de onda transitorias dadas por el IEEE Std. C62.41-1991

8/20 us	$I(t) = AI_p t^3 \exp(-t/\tau)$ Donde: $\tau = 3.11 \text{ us}$ $A = 0.01243 (\text{us})^{-3}$
1.2/50 us	$v(t) = AV_p (1 - \exp(-t/\tau_1)) \exp(-t/\tau_2)$ Donde: $\tau_1 = 0.4074 \text{ us}$, $\tau_2 = 68.22 \text{ us}$ $A = 1.037$

t = tiempo

V_p = valor pico de voltaje de circuito abierto

I_p = valor pico de corriente de corto circuito

La descarga atmosférica causa el mayor daño cuando alcanza al conductor de fase de una línea aérea, ya que inyecta un transitorio enorme de corriente que genera una sobretensión muy alta.

Cuando una descarga atmosférica inyecta corriente sobre una línea de potencia, se generan a ambos lados del punto de impacto las llamadas ondas viajeras [54], [57] [82].

2.6. Modelo aproximado de la línea de transmisión de parámetros concentrados.

Desde el punto de vista eléctrico, una línea de transmisión es corta si su longitud física es mucho más corta que su longitud de onda calculada a la frecuencia de operación. En este caso se modela a la línea, como una aproximación, mediante un circuito de parámetros concentrados. No hay un criterio fijo para considerar cuando una línea es corta y de parámetros concentrados; en ésta investigación se asume que la línea es corta si su longitud física es menor que $\frac{1}{10}$ de una longitud de onda a la frecuencia de operación; esto es, longitud física $< \frac{1}{10} \lambda$.

Cuando una línea es eléctricamente corta, hay muchas posibilidades de usar modelos aproximados de circuitos de parámetros concentrados. Uno de los modelos es mostrado en la figura 2.4.

La inductancia total de la línea es el producto de la inductancia por unidad de longitud multiplicado por la longitud total de la línea. La capacitancia total de la línea es la capacitancia por unidad de longitud multiplicada por la longitud total de la línea.

La inductancia y la capacitancia en por unidad de longitud se obtiene a partir de la impedancia característica de la línea,

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{ecuación (2.1.)}$$

y de la velocidad de propagación

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{ecuación (2.2.)}$$

como

$$L = \frac{Z_c}{v} \quad \text{ecuación (2.3.)}$$

y

$$C = \frac{1}{vZ_c} \quad \text{ecuación (2.4.)}$$

Por ejemplo, si se considera una línea de transmisión, cuya frecuencia mínima y máxima de operación es 3 kHz. y 10 MHz. respectivamente, con una velocidad de propagación de 3×10^8 m/s, la longitud de onda mínima para este caso es de 30m., lo que equivale a $\frac{1}{10} \lambda$. Por lo anterior se considera que la línea es eléctricamente corta y se aproxima mediante un modelo de parámetros concentrados.

Por ejemplo, si se considera una línea corta. Los valores por unidad de longitud de la resistencia, r , la inductancia, l , y la capacitancia, C , son concentrados en tres elementos que representan a la línea como se muestra en la figura 2.4.

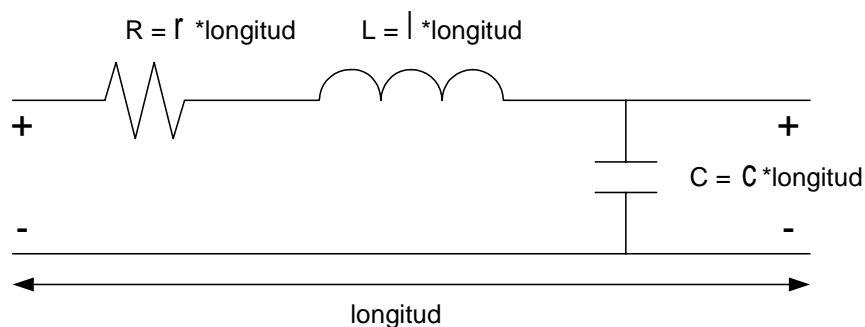


Figura 2.4. Circuito equivalente de la línea de transmisión de parámetros concentrados.

Por otra parte, la figura 2.5. muestra el comportamiento de un aislador tipo poste, que da soporte a una línea aérea, durante una sobretensión transitoria.

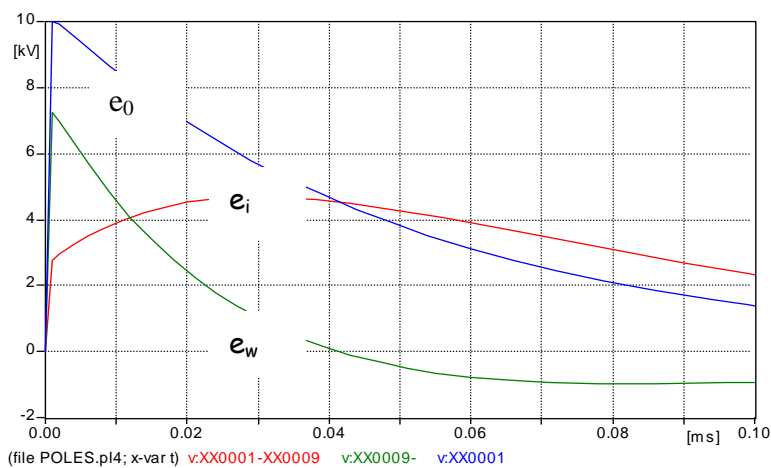


Figura 2.5. e_0 - Sobretensión aplicada al arreglo de conductores, e_i - Sobretensión impresa al aislador, e_w - Sobretensión impresa al poste de madera.

El voltaje impreso al poste de madera alcanza un valor cresta de 7.22 kV., en 1.2 μ s., y alcanza la mitad de este valor en 16.5 μ s., El voltaje impreso al aislador alcanza un valor inicial de 28.0 kV., en 1.2 μ s., y debido a que la sobretensión aplicada e_0 continúa, el voltaje pico en el aislador alcanza un valor de 52.6 kV., en 37 μ s. Los parámetros para la simulación son obtenidos de [54].

2.7. Efecto sobre los sistemas y equipos eléctricos.

El estrés de voltaje en los sistemas y en los equipos presenta dos tipos de adversidades: *daño* ó mal funcionamiento (*bloqueo*). Un sistema dañado falla por completo o parcialmente. La única manera de recobrase del daño es reemplazando los componentes afectados. La recuperación de un *bloqueo* no requiere de alguna reparación o reemplazo.

La falla en los equipos eléctricos es causada por la ruptura de su aislamiento. El parámetro más importante en el rompimiento del aislamiento es la magnitud pico del voltaje y su índice de elevación. Equipos como transformadores y motores soportan voltajes que son mucho mayores a aquellos que causan falla en los dispositivos de estado sólido.

La magnitud de voltaje, corriente, o potencia necesaria para causar el daño permanente es conocida como el umbral de daño o de falla. En general, el valor del umbral está en función de la duración de la tensión aplicada [20], [36], [38].

CAPÍTULO 3

LA FUNCIÓN DE LOS APARTARRAYOS Y LAS ONDAS CORTADAS AL RESTO DEL EQUIPO.

3.1. Introducción.

La función principal del apartarrayos y del supresor de transitorios (SPD) es limitar el voltaje que aparece entre dos puntos del circuito. Este es un concepto importante de entender. Una de las interpretaciones erróneas más comunes acerca de los varistores y componentes similares, es que éstos son capaces de absorber la energía del transitorio [62].

Los apartarrayos de óxido metálico protegen al aislamiento del equipo eléctrico contra las sobretensiones transitorias. Los apartarrayos como los dispositivos de protección están sometidos a la tensión de operación del sistema y las sobretensiones transitorias como las producidas por las descargas atmosféricas. Su característica extremadamente no lineal exhibe una resistencia muy alta durante la operación normal y una resistencia muy baja durante las sobretensiones transitorias [2].

Un modelo de varistor que representa a una resistencia no lineal es disponible en el ATP/EMTP mediante el dispositivo *tipo 92* [8], [75], [77].

3.2. Los dispositivos de supresión.

El supresor de sobretensiones transitorias y el apartarrayos tienen el mismo principio de operación; cuando el voltaje en sus terminales aumenta, la resistencia del dispositivo de protección disminuye, dejando pasar más corriente [27], [28], [36], [37].

El término apartarrayos se usa con frecuencia para referirse al dispositivo instalado en la entrada del servicio, mientras que el término supresor es usado para referirse al dispositivo conectado en el punto de instalación del equipo sensible.

La barrera contra los transitorios que intentan alcanzar al equipo sensible se lleva a cabo mediante la instalación de los dispositivos de supresión de voltajes transitorios (SPD). Esta protección debe ser instalada cerca del equipo sensible para protegerlo contra el voltaje residual que alcanza a entrar a la instalación cuando un apartarrayos opera [39].

3.3. Clasificación de los dispositivos de protección [28], [39]:

- Dispositivos de arco (*crowbar devices*).
- Dispositivos sujetadores de voltaje (*voltaje clamping devices*).

3.3.1. *Dispositivos de tipo arco.* Incluyen *explosores en aire*, tubos de descarga en gas. Son dispositivos inactivos hasta que el voltaje aplicado excede un valor establecido. En ese momento empiezan a conducir creando un cortocircuito a tierra, desviando de esta manera la sobretensión que se dirige hacia la carga.

3.3.1.1. Dispositivos tipo explosor. Requieren entre 300 a 700 V para iniciar el arco a través del explosor. Durante el tiempo que están conduciendo, deben transportar la energía del transitorio que es enviada a tierra con una duración de medio ciclo o más. El arco en el explosor se extingue al pasar la corriente por el primer cruce por cero o en uno subsecuente; a menos que el voltaje del sistema no sea lo suficientemente alto para producir un reencendido el explosor regresa su estado de no conducción.

3.3.1.2. Tubo protector de descarga en gas. Son los de mayor aplicación en los sistemas de cómputo y otros equipos sensibles. Consisten de dos o tres electrodos dentro de un tubo hermético con una mezcla de gases a baja presión. Los electrodos forman uno o dos *explosores*. Tienen una vida relativamente larga y una gran capacidad de manejo de corriente, [49].

Los dispositivos de arco son relativamente lentos, ya que les toma varios microsegundos para operar y proteger al sistema de una rápida elevación de voltaje.

3.3.2. *Dispositivos sujetadores de voltaje.* Son resistencias no lineales (*varistores*) las cuales conducen muy bajas cantidades de corriente hasta que una sobretensión ocurre. Es entonces cuando empiezan a conducir grandes cantidades de corriente y su impedancia cae rápidamente conforme el voltaje incrementa. Estos dispositivos incrementan la cantidad de corriente para limitar la elevación de voltaje producida por la sobretensión, [45], [46], [48], [50], [51].

La ventaja que tienen sobre los dispositivos tipo *arco* es que cuando conducen el transitorio de corriente, el voltaje no se reduce por debajo del nivel de voltaje de referencia.

3.3.2.1. *Varistores de óxido metálico.* (MOV's), diodos *zener* (avalancha), son conductores unidireccionales hasta que su voltaje de ruptura se alcanza; en ese momento empiezan a conducir en reversa. Si el voltaje aplicado a la línea es mayor al voltaje de sujeción, el voltaje en el dispositivo decrece rápidamente. Cuanto más aumenta la corriente la impedancia disminuye, desviando de esta manera al transitorio que se dirige hacia la carga.

La impedancia del dispositivo sujetador de voltaje actúa como un divisor de voltaje y mantiene al sistema cerca del voltaje de sujeción. La relación es:

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{Z_c}{Z_c + Z_s} \right) \quad \text{ecuación (3.1.)}$$

Cuando V_{in} es normal, Z_c es muy alta comparada con Z_s y $\left(\frac{Z_c}{Z_c + Z_s}\right) \approx 1$; así, $V_{out} \approx V_{in}$.

Cuando V_{in} es alto (transitorio arriba del voltaje de sujeción), Z_c es bajo y de la misma magnitud que Z_s . Cuando V_{in} se incrementa, Z_c decrece y la corriente a través de ésta aumenta. Como resultado, el voltaje V_{out} permanece relativamente constante al voltaje de sujeción, como se muestra en la figura 3.1., [36], [38], [59].

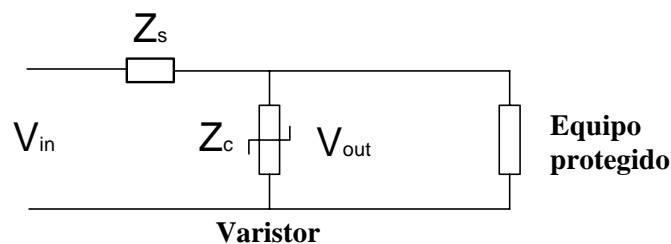


Figura 3.1. Protección por medio de un varistor.

Durante el voltaje de sujeción, la impedancia del dispositivo es baja, pero no llega a cero como ocurre con los dispositivos de arco. No hay por tanto un flujo de corriente de cortocircuito esencial.

Los dispositivos de sujeción operan en el intervalo de los nanosegundos [26], [36], mil veces más rápido que los dispositivos de arco, pero su capacidad de manejo de energía es menor. Una de las desventajas del MOV es que su característica se deteriora cada vez que se presenta un transitorio.

3.3.2.2. Diodos zener. Los diodos *zener* actúan más rápido que los MOV y proporcionan una sujeción efectiva, un voltaje casi constante, pero con una limitada capacidad de manejo de energía.

3.3.2.3. Varistores de carburo de silicio. Tienen una alta capacidad para el manejo de energía y son usados en apartarrayos para altos voltajes. Tienden a manejar en condiciones normales una cantidad de corriente considerable; es por ello que utilizan un explosor en serie que proporciona un circuito abierto hasta el momento en que el transitorio ocurre. Esta propiedad los hace inadecuados para operar en bajo voltaje [36]. Existen apartarrayos de óxido de zinc que se utilizan en los sistemas de alto y bajo voltaje y debido a su característica no lineal son utilizados sin la adición de un explosor.

3.4. Principio de protección contra sobretensiones transitorias.

El principio fundamental de la protección contra sobretensiones en los equipos es limitar los transitorios a través de los aislamientos sensibles desviándolos de la entrada mediante un filtro pasa-bajas usando principios de limitación y bloqueo [42], [61].

3.5. Protección híbrida ó protección múltiple.

Son dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias que combinan dos o más tecnologías para proporcionar la supresión en un amplio intervalo de voltajes, índices de elevación, y contenido de energía que un dispositivo por si sólo no cubre satisfactoriamente. Esta protección combina normalmente un tubo protector de descarga en gas de dos o tres electrodos para un manejo de alta energía, y un MOV ó un diodo *zener* para una respuesta de operación rápida [21], [36], [61].

En la figura 3.2., se presenta una protección híbrida formada con dos dispositivos de supresión. El primer dispositivo de protección es conectado entre línea y neutro en el punto de entrada del servicio. Este dispositivo limita al voltaje de línea (V_1), de una elevación muy alta con respecto al neutro.

Cuando se lleva a cabo la acción de limitar el voltaje, éste proporciona una ruta de baja impedancia para el transitorio de corriente que viaja por el conductor de puesta a tierra. Esto obliga a que la mayoría de la energía del transitorio sea conducida a tierra a través del dispositivo de supresión instalado en la entrada del servicio.

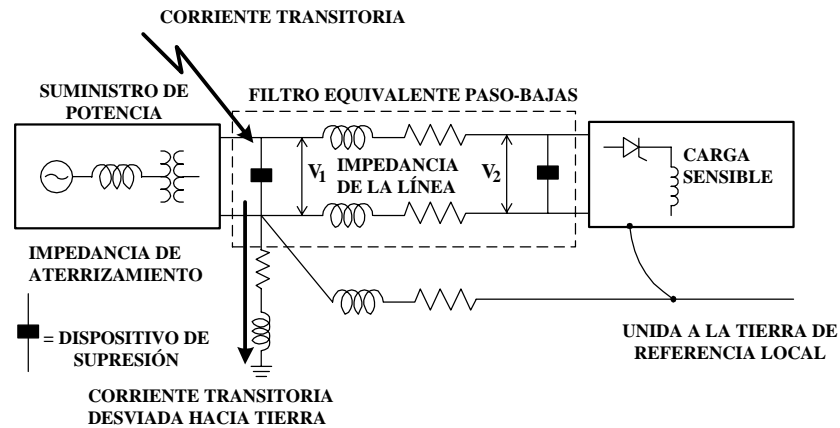


Figura 3.2. Protección híbrida con dos dispositivos de supresión.

La limitación de voltaje es combinada con la función de bloqueo para formar un filtro pasa-bajas. La línea proporciona la función de bloqueo en proporción a su longitud. Como la inductancia obliga a que la mayor parte del transitorio viaje por el primer dispositivo limitador, el segundo dispositivo tiene entonces que limitar esa pequeña sobretensión (V_2) que consigue atravesar y es de esta manera que proporciona protección a la carga [22], [42].

3.6. Modelado del tubo protector de descarga en gas.

Son dos las características principales del mecanismo de descarga que deben ser modelados: el tiempo de retardo entre la señal de voltaje y la señal de voltaje de disparo y la resistencia de arco dependiente del tiempo[5].

Se usa la siguiente fórmula de retardo de tiempo para un tubo de descarga en gas de 230 V [5].

$$\log t_d = 1.283 - 0.82 \log S \quad \text{ecuación (3.2.)}$$

Donde t_d es el retardo de tiempo en segundos y S es el índice de elevación de voltaje en volts por unidad de tiempo.

La manera de simular la resistencia de arco es mediante el modelo empírico establecido en [5].

Para este estudio se ha empleado el modelo de conductancia representada en la ec. 3.3. [6], utilizando el lenguaje de programación MODELS. Los parámetros son obtenidos de [7] para un caso similar.

$$g + \tau(dg/dt) = \dot{I}^2 / p \quad \text{ecuación (3.3.)}$$

$$R = 1/g$$

Donde (R) es la resistencia, (g) es la conductancia, (τ) es la constante de tiempo, (i) es la corriente y (p) es la potencia en estado estacionario del arco eléctrico [13].

El retardo de tiempo es representado por un switch controlado por voltaje (SCV) donde la ecuación (3.2.) es implementada en MODELS. La resistencia de arco es representada por una resistencia controlada por corriente (RCC). La caja RCC es un módulo de MODELS donde la variación en la conductancia del arco dada en la ecuación (3.3.) durante la operación del GDP es implementada

[5], [10], [21]. El modelo del tubo de descarga en gas se muestra en la figura 3.3.

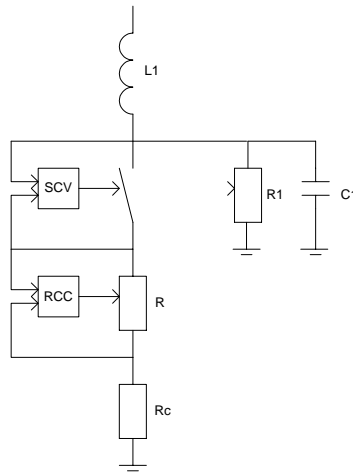


Figura 3.3. Representación del GDP para la simulación en EMT-ATP [5], [9], [10], [13].

En el lado izquierdo de la figura 3.4. se muestra el generador de voltaje, la parte media es el equipo de medición de voltaje representado por un resistencia y un capacitor en derivación. Estos elementos no influyen en los resultados debido a que la resistencia tiene un valor muy alto comparado con el de la resistencia en paralelo del generador y la capacitancia es también pequeña para influir sobre la razón de voltaje usado. A la derecha está el tubo de descarga en gas.

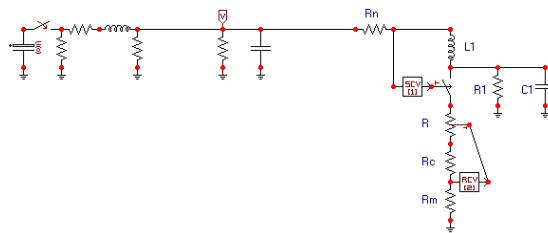


figura 3.4. Modelo del tubo de descarga en gas.

El modelo tiene una entrada de voltaje y una de corriente; la corriente es obtenida de la resistencia de medición R_m . R_1 y C_1 son la resistencia y la capacitancia de fuga, respectivamente. L_1 es la inductancia del cable. R_c es la resistencia de contacto y R_n es una resistencia despreciable introducida para tener un nodo dentro del módulo del tubo de descarga en gas para conectar el SCV. En las figuras 3.5. y la figura 3.6. se presentan los diagrama de flujo para el retardo de tiempo y la resistencia de arco eléctrico respectivamente.

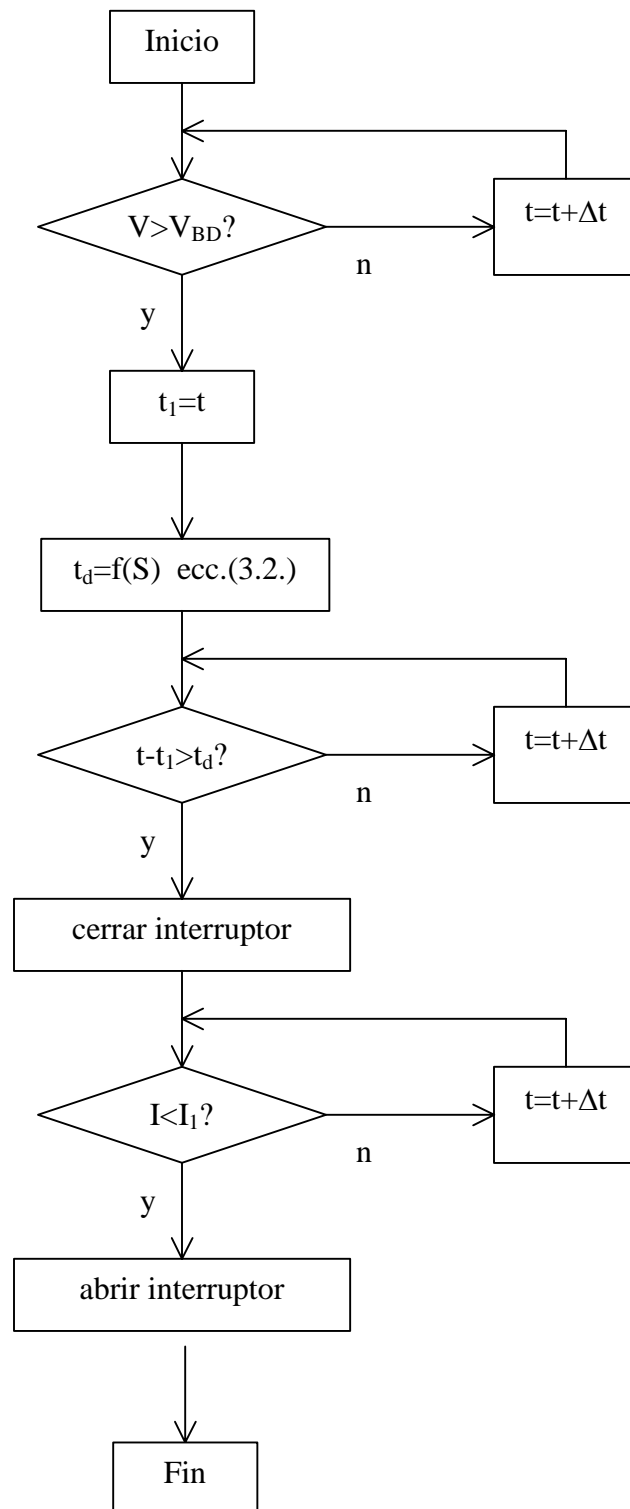


Figura 3.5. Diagrama de flujo para el retardo de tiempo.

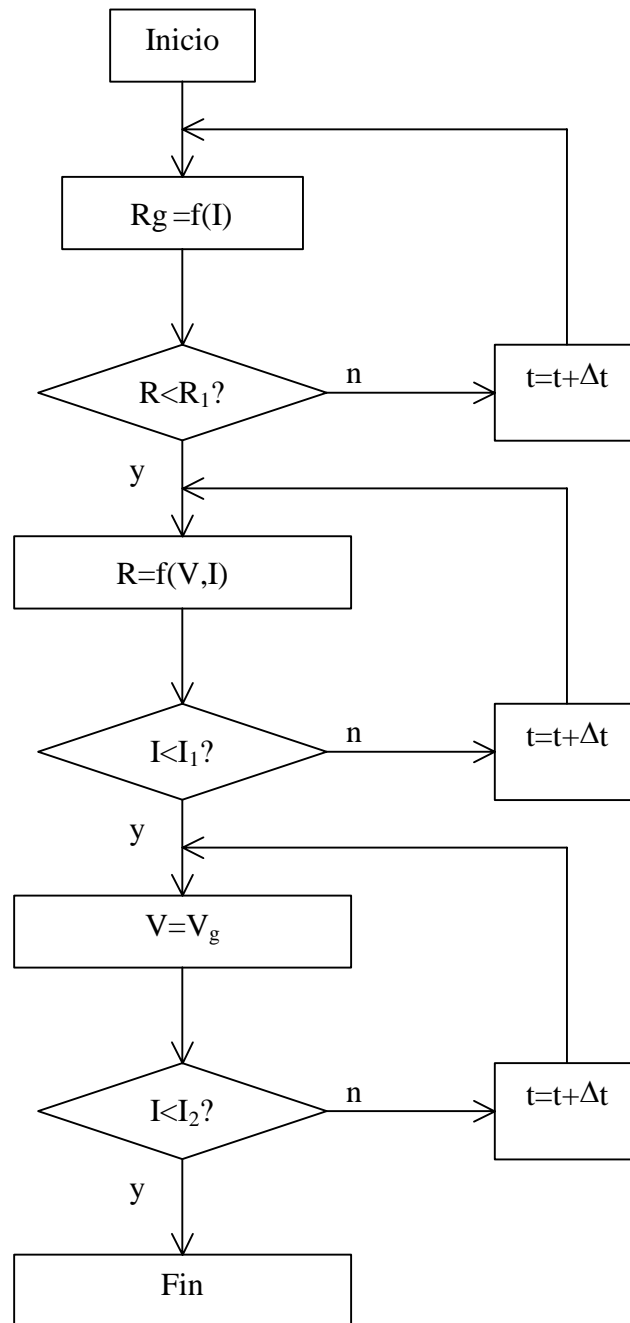


Figura 3.6. Diagrama de flujo de la resistencia de arco.

3.7. Modelado del varistor de óxido metálico.

El varistor usado como dispositivo de protección contra las sobretensiones transitoria exhibe una característica no lineal V-I; la impedancia decrece con el incremento de voltaje, proporcionando una ruta de baja impedancia para las sobretensiones transitorias y una ruta de alta impedancia a voltaje normal del sistema. La curva V-I del varistor es mostrada en la figura 3.7. La función del varistor es ilustrada en la figura 3.8.

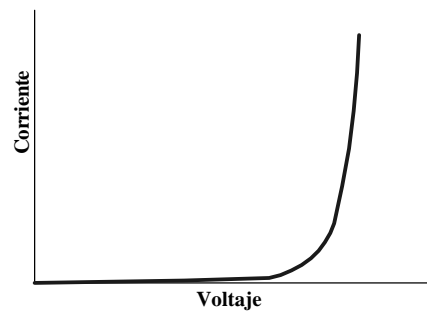


Figura 3.7. Curva característica V-I del varistor.

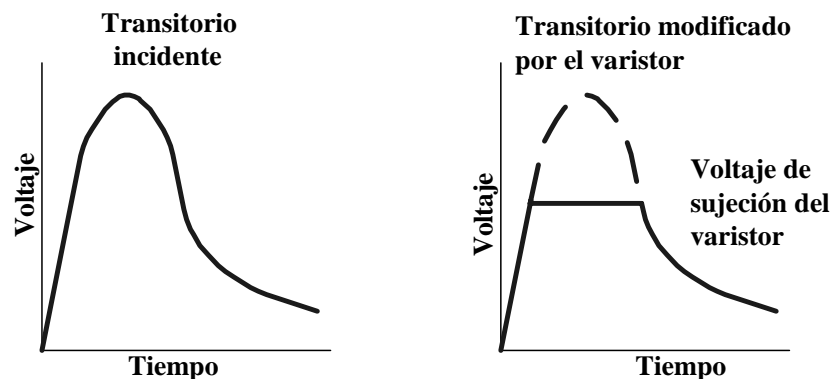


Figura 3.8. Función del varistor.

El modelo del varistor es representado por su curva característica V-I, una capacitancia en paralelo (C_1) y una inductancia en serie (L_1). Una resistencia en serie $R_s = 100 \mu\text{ohms}$ es insertada para prevenir que una fuente ideal sea conectada en paralelo, ó que el modelo del varistor sea conectado directamente a la fuente [12].

El equivalente es mostrado en la figura 3.9.

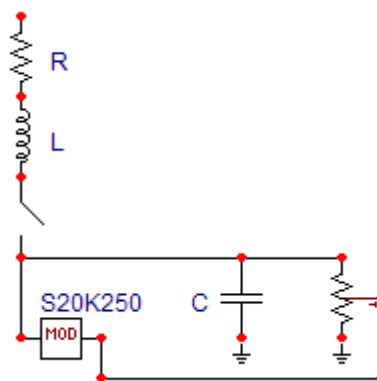


Figura 3.9. Modelo del varistor de óxido metálico.

De acuerdo con el circuito equivalente la inductancia y la capacitancia representan la inductancia (L_1) del cable y la capacitancia (C_1) paralelo. (L_1) y (C_1) son diferentes para cada tipo y son definidos como parámetros en el Apéndice B.

$V = f(I)$ característica V-I.

C = Capacitancia del varistor.

L = Inductancia serie.

R_s = Resistencia serie.

No se permite despreciar la inductancia del varistor en aplicaciones con pulsos muy escarpados. Por esta razón, se debe insertar una inductancia en serie cuyo valor es determinado por la inductancia del cable [12].

Los valores de la inductancia en la librería son seleccionados para aplicaciones típicas, por ejemplo, 13 nH para el varistor S20K275. Si se usan cables, largos debe considerarse la adición de la inductancia. En el caso de varistores de tipo disco, la inductancia de los cables es de aproximadamente 1 nH/mm. [12].

3.7.1. Límites del modelo del varistor.

Por razones matemáticas, las curvas características se extienden hacia ambas direcciones mas allá del intervalo de corriente ($10 \mu A$ a $I_{m\acute{a}x}$) especificado en los datos y no es limitada por el procedimiento del programa. La validez del modelo se pierde si estos límites especificados se exceden. El límite inferior es de $10 \mu A$ y el límite superior $I_{m\acute{a}x}$ depende de cada tipo de varistor [12].

Se ha desarrollado un módulo de varistor para bajo voltaje usado en la coordinación de protección contra transitorios dentro del ambiente ATP-EMTP usando el lenguaje MODELS. Para ello se ha utilizado la función de interpolación sugerida en [8] para la relación de voltaje-corriente de los varistores de ZnO:

$$y = \sum_n a_n x^n \quad \text{ecuación (3.4.)}$$

Donde $y=\log(V)$ y $x=\log(I)$, y V e I son el voltaje y la corriente en el varistor respectivamente [8]. Un caso especial de la ec. (3.4.), está dado por la siguiente expresión [8], [10], [12]:

$$\log(u) = B_1 + B_2 \log(i) + B_3 e^{-\log(i)} + B_4 \log(i) \text{ con } i > 0 \quad \text{ecuación (3.5.)}$$

Donde los parámetros B_1, B_2, B_3 y B_4 son constantes para cada tipo de varistor. Esta ecuación muestra el comportamiento ideal del varistor. Incluyendo también la capacitancia C y la inductancia L del cable de conexión de éste, se consigue la característica completa de voltaje-corriente del varistor.

Esto significa que la curva característica para cada varistor es descrita por los parámetros B_1 a B_4 . La figura 3.10. presenta la curva característica V-I del varistor SIOV-S20K275 así como sus parámetros correspondientes B_1 a B_4 .

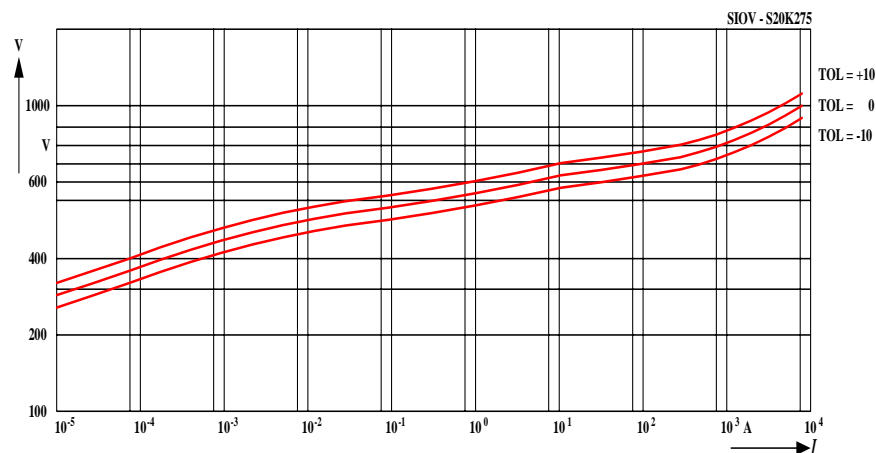


Figura 3.10. Curva V-I, del varistor SIOV S20K275, Parámetros del fabricante:
 $B_1 = 2.7233755$, $B_2 = 0.0258453$, $B_3 = -0.0005746$, $B_4 = 0.0046033$ [12].

En la figura 3.11. se presenta el voltaje de sujeción del varistor estándar de 10 mm. de diámetro, con una tolerancia del 10% y con un voltaje máximo de operación continua de 95 V.

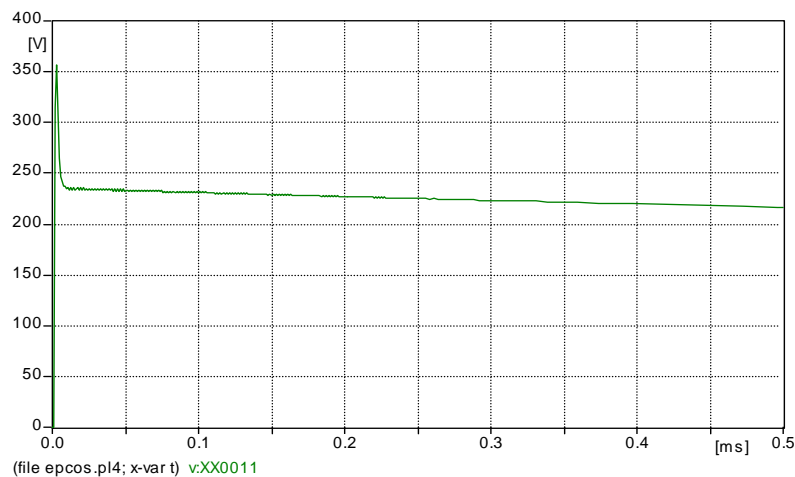


Figura 3.11. Voltaje de sujeción del varistor SIOV S10K95, durante un voltaje aplicado de 2 kV, 10/700 us. [70].

En las figuras 3.11. y 3.12. se presenta el diagrama de flujo y el modelo del varistor implementado en ATP-EMTP usando MODELS. R es una resistencia tipo 91 [74], [77], controlado por TACS y en la caja V-I es implementada la ecuación (3.5.) usando MODELS. Rc es la resistencia de contacto entre el cable de conexión y el circuito externo.

En la figura 3.12., se presenta el diagrama de flujo para representar la característica del supresor.

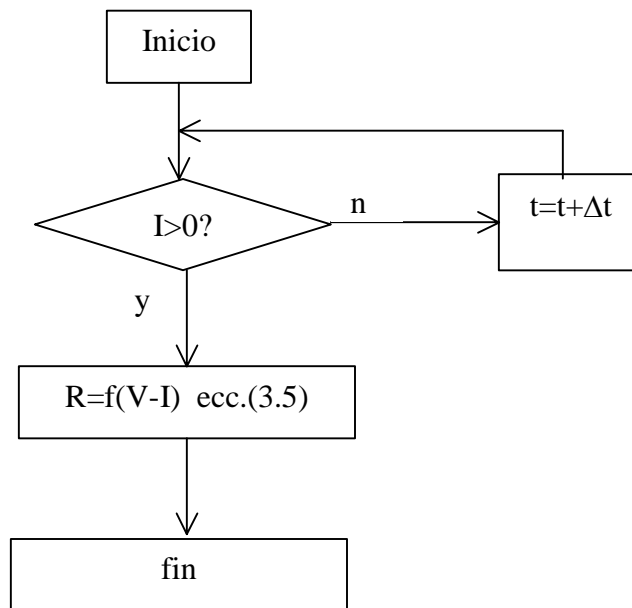


Figura 3.12. Diagrama de flujo que representa la característica del supresor.

En la figura 3.13., se presenta el varistor para la simulación en EMTP-ATP [8], [10], [12].

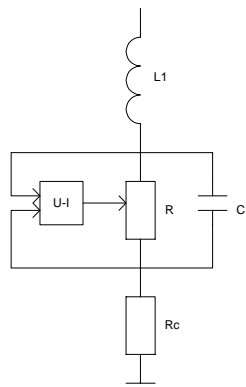


Figura 3.13. Representación del varistor para la simulación en EMTP-ATP.

3.8. Simulación del comportamiento de los dispositivos de protección.

Como ejemplo usamos un tubo protector de descarga en gas con un voltaje de disparo de 230 V, GDP CGZ/230VL [10]. El voltaje calculado a través del tubo de descarga en gas para diferentes amplitudes del voltaje aplicado es mostrado en las figuras 3.14. a 3.16. Debido al retraso de tiempo (sección 3.5.1) se obtienen diferentes formas de voltaje [6], [7], [10].

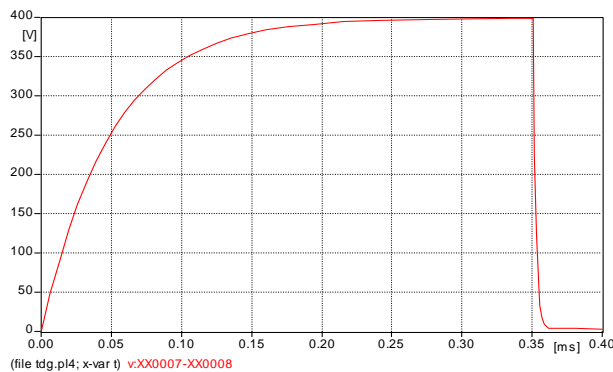


Figura 3.14. Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 800 V.

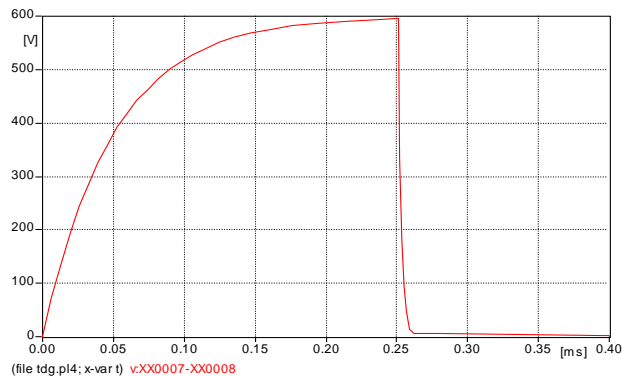


Figura 3.15. Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 1200 V.

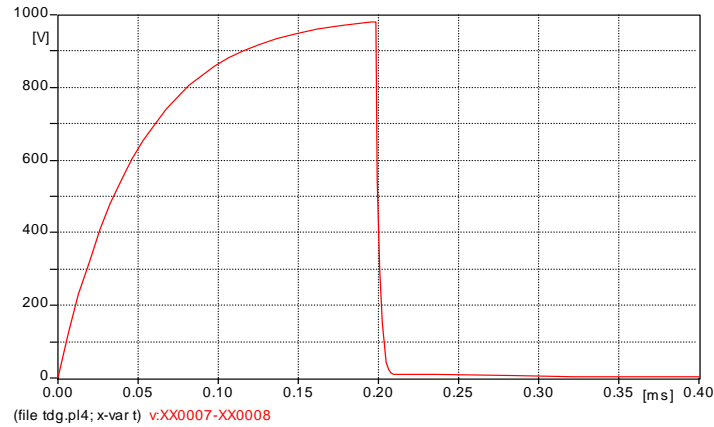


Figura 3.16. Voltaje a través del tubo de descarga para un voltaje aplicado de 1200 V.

Las figuras 3.17. y 3.18. muestran la característica voltaje-corriente (V-I) y resistencia-corriente (R-I) del supresor SIOV S20K275 [6] simulado en ATP.

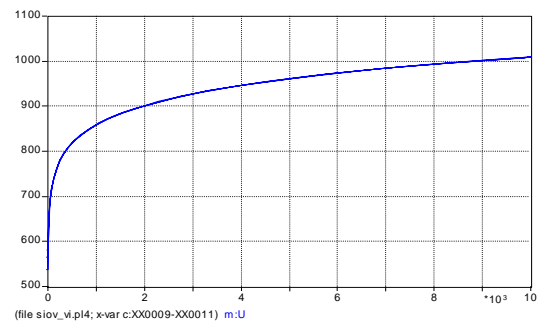


Figura 3.17. Curva V-I, del varistor SIOV S20K275 simulada en ATP DRAW.

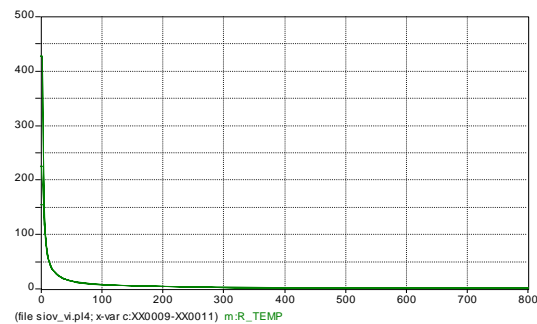


Figura 3.18. Curva R-I, del varistor SIOV S20K275 simulada en ATP DRAW.

3.9. Modelado del cable de la instalación.

El cable de la instalación se modela como una línea de transmisión considerando el efecto piel [10].

La distribución uniforme de la corriente en la sección del conductor solamente se presenta en la corriente continua. A medida que aumenta la frecuencia de la corriente alterna, se hace más pronunciada la diferencia entre las densidades de corriente de las distintas zonas de una sección transversal. Este fenómeno se llama *efecto piel*. Una descripción del modelo para el cable de instalación en el ambiente ATP-EMTP incluye una aproximación del efecto piel se presenta en [10] para una longitud del cable de la instalación de 20 m. como se muestra en la figura 3.19.

La figura 3.20 muestra una aproximación del perfil de las corrientes presentes en el conductor de la instalación.

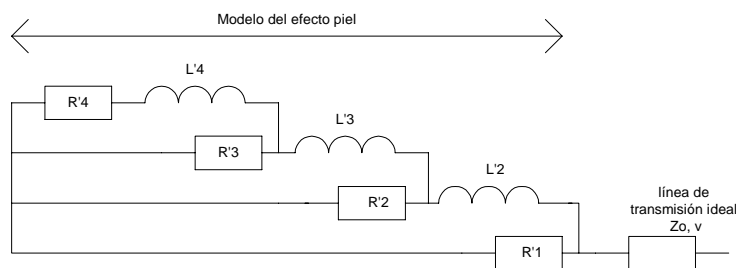


Figura 3.19. Representación del cable de la instalación para la simulación en EMTP-ATP [10], [22].

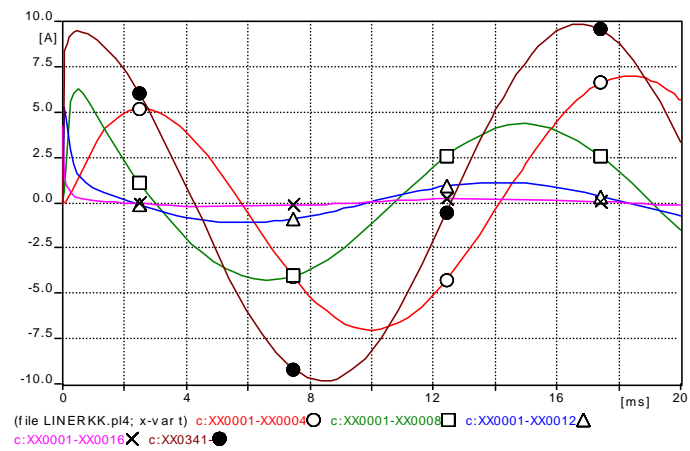


Figura 3.20. Efecto piel presente en el conductor, ● y ○ perfil de corriente en el interior del conductor, △ y □ perfil de corriente en la superficie del conductor [2].

CAPÍTULO 4

EL IMPACTO DE LAS SOBRETENSIONES EN LAS INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN.

4.1. Introducción.

Las corrientes transitorias asociadas con las descargas atmosféricas actúan con la impedancia del sistema de distribución creando sobretensiones transitorias. De esta manera, los efectos de los impactos por descarga atmosférica son transmitidos a varios puntos del sistema.

Cuando el equipo electrónico es expuesto a un transitorio, también lo está a daño o a mal funcionamiento. Un primer efecto sobre el equipo es que éste sufre una interrupción. Los datos del sistema se mutilan produciéndose un bloqueo. Esto es un inconveniente pero generalmente no hay daño.

Un segundo efecto es la degradación del equipo. Si la actividad transitoria es constante, entonces los componentes del sistema, tales como los circuitos integrados se deterioran. Significa que, aunque el equipo no se afecte en ese momento, está siendo estresado continuamente sin una causa aparente y se dañará mas tarde [63].

El tercero efecto es la destrucción de los componentes. Este es el más obvio, haciéndose visible el daño cuando el equipo humea al arrancar o hay ruido en él.

4.2. Representación de las sobretensiones producidas por las descargas atmosféricas.

Para instalaciones en baja tensión, en el punto de acometida se consideran niveles de flameo con formas de onda de 1.2/50 μ s., 10-20 kV., mientras que en el interior de la instalación se consideran niveles de flameo de 6 kV., entre fases o entre fase y tierra [26], [39].

Las descargas atmosféricas sobre líneas aéreas son representadas por una señal de voltaje de 1.2/50 μ s., y una señal de corriente de 8/20 μ s., [58]. Estas señales son una simplificación apropiada de la representación del medio ambiente cercano al punto de acometida conectado al sistema de distribución mediante una línea aérea. Autores como [52], [40], consideran para fines de estudio formas de onda de 8/100 μ s., y 10/100 μ s., para simular tiempos más largos y representativos la duración de la corriente de rayo.

4.3. La curva CBEMA.

Los fabricantes de equipos eléctricos especifican los límites de las variaciones de voltaje dentro de los cuales el equipo opera sin que sufra daño o produzca errores. La desviación momentánea del voltaje nominal es definido en términos de amplitud y duración [3], [18].

La curva CBEMA fue diseñada por varios fabricantes de equipo de cómputo para establecer los límites en que el equipo opera correctamente.

La curva CBEMA es un perfil de susceptibilidad del equipo. Existen varios tipos de disturbios que afectan al equipo electrónico. La curva CBEMA ayuda a entender como cada tipo de disturbio influye sobre la operación del sistema [38].

4.3.1. La curva ITIC.

La organización responsable de la curva CBEMA ha cambiado su nombre al de *Information Technology Industry Council (ITIC)*. Mientras que la curva CBEMA es aplicable únicamente a equipo de cómputo, la curva ITIC es aplicable a equipo con voltaje nominal de 120 V., obtenida de 120,208Y/120 V y 120/240 V. que contiene dispositivos de estado sólido ,incluyendo equipo de cómputo instalado es sistemas de 60 Hz. [20], [38].

Como se muestra en la figura 4.1., el eje vertical de la gráfica indica el porcentaje de voltaje que es aplicado al circuito, y el eje horizontal indica el tiempo involucrado (en microsegundos o segundos). El área dentro de la envolvente es considerada como aceptable, donde los equipos con dispositivos de estado sólido operan adecuadamente; el área fuera de ella es considerada no aceptable ó de daño para el equipo. En la tabla 4.1. se presentan los valores proporcionados por la curva ITIC como porcentajes de la tensión y duración aplicada al equipo sensible.

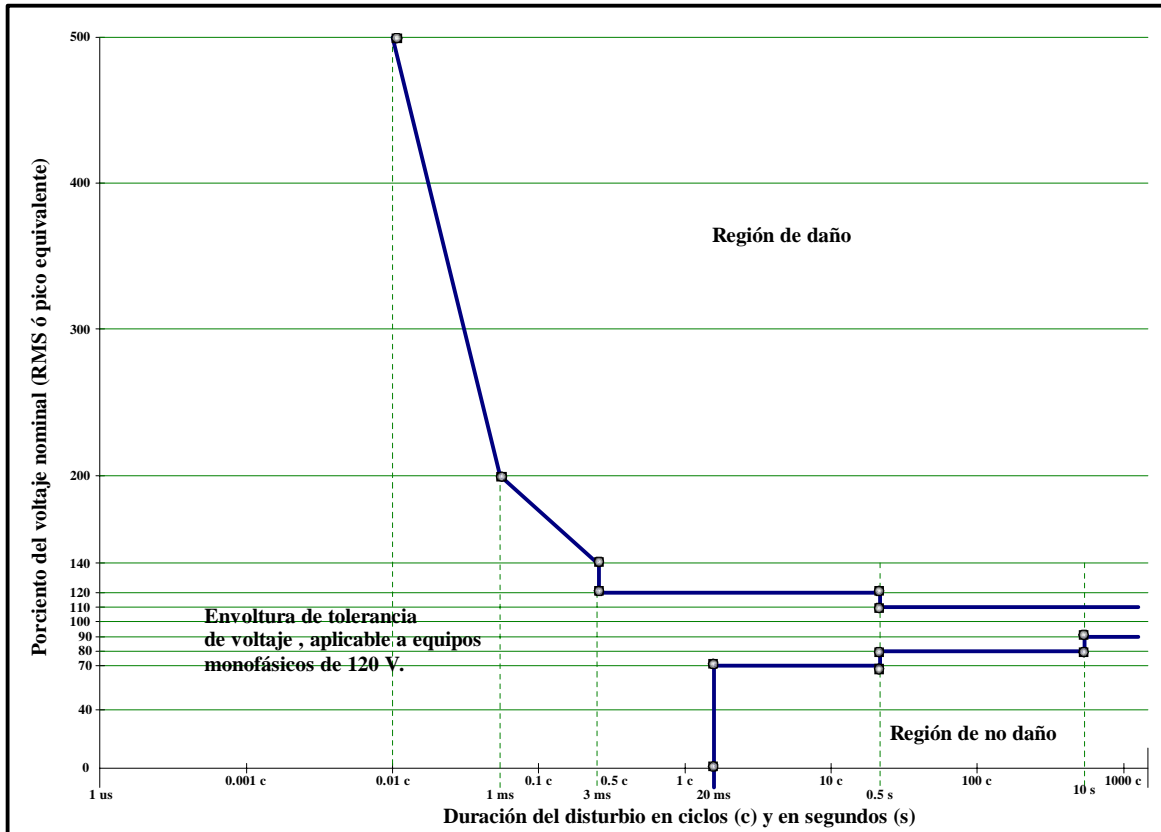


Figura 4.1. Information Technology Industry Council (ITIC) [20], [38].

Tabla 4.1. Valores proporcionados por la curva ITIC [31].

Interrupción momentánea	0 volts para 20 ms.
Sag de voltaje	70% volts para 0.5 s.
	80% volts para 10 s.
	90% volts continuos
Sobretensiones	500 % volts para 0.01 ciclo.
	200% volts para 1 ms.
	120% volts para 0.5 s.
	110% volts continuos.

La magnitud y duración típicas establecidas por los fabricantes de equipo de cómputo consideradas en la calidad de la energía como sobretensiones transitoria son mayores al 200% con una duración menor a medio ciclo de la forma de onda de voltaje fundamental [38].

Como ejemplo vemos en la figura 4.2. que el voltaje aplicado (punto A) alcanza el valor de 250% del voltaje nominal del equipo en menos de 1 ms., éste cae dentro de la curva y es considerado como tolerable. Pero cuando el mismo voltaje aplicado (punto B) permanece por un periodo más largo, causará daño o mal funcionamiento al equipo.

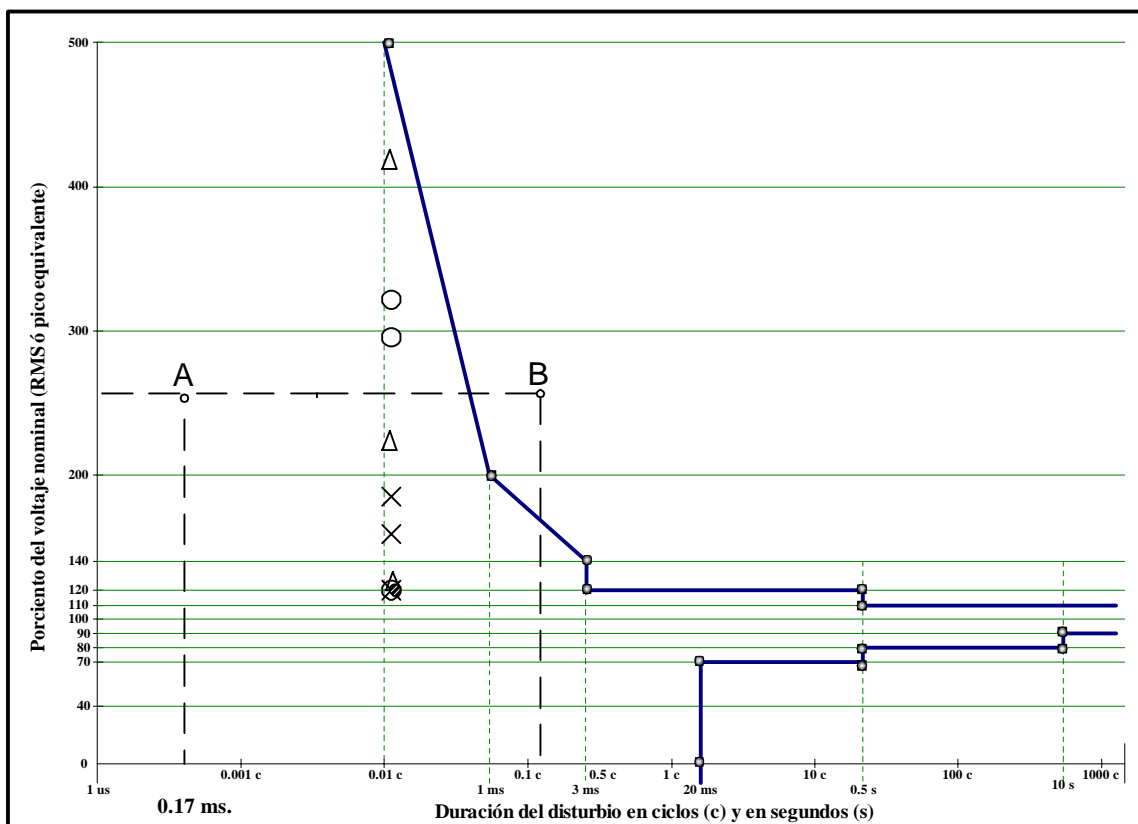


Figura 4.2. Ejemplo de aplicación de la curva ITIC. ●- figura 4.8., x- figura 4.9., o- figura 4.10., Δ- figura 4.11., magnitudes pico de las sobretensiones para 0.17 ms.

En la tabla 4.2. se presenta una lista de los efectos producidos por las sobretensiones transitorias cuando se rebasa el umbral de voltaje que tolera el equipo; también se presenta una lista de los dispositivos que son utilizados como medio de protección contra éste tipo de sobretensiones.

Tabla 4.2. Sobretensiones transitorias [27], [39], [78].

Disturbio de voltaje	Umbrales del disturbio	Duración del disturbio	Efectos sobre el equipo sensible	Dispositivo de protección
Sobretensión transitoria.	> 100 % del voltaje rms (medición instantánea arriba o debajo de la línea referencia de voltaje rms.)	< A medio ciclo.	Truncamiento de datos provocando errores, señalizaciones en falso, paro en el funcionamiento de equipo y el procesamiento de información. Daño al equipo electrónico, rompimiento del aislamiento en transformadores y motores.	Transformadores de aislamiento, supresores de transitorios, apartarrayos en línea, mejoramiento en el sistema de aterrizamiento.

4.4. Metodología para el análisis transitorio en equipos sensibles.

El método propuesto para determinar el efecto de las sobretensiones transitorias en el punto de instalación del equipo sensible consiste en el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar un evento. Un evento es considerado como la aplicación de una forma de onda, magnitud y duración que representa a una descarga atmosférica aplicada en algún punto del sistema.
2. Simular la condición. Tal condición es simulada en el paquete *ATP/EMTP*.
3. Sobreponer la magnitud y duración del disturbio en la curva *ITIC*.
4. Determinar, por inspección y en acuerdo con el criterio de aceptabilidad de la curva *ITIC*, el efecto del disturbio en el equipo sensible.
5. Aplicar dispositivos de protección y evaluar la condición previa a partir del punto dos del procedimiento.

4.5. Esquema de protección.

Cuando se diseña un esquema de protección contra descargas atmosféricas para sistemas de potencia de baja tensión, diversas condiciones deben ser simuladas para representar para el punto de impacto de la descarga atmosférica. Considerando el siguiente orden de severidad: impacto directo a la instalación, impacto directo a la línea aérea de baja tensión, impacto directo a objetos cercanos a la instalación, descargas atmosféricas de nube a tierra lejos de la instalación, y finalmente descargas entre nubes [14].

En esta investigación se utiliza el ATP/EMTP para la realización de las simulaciones debido a un impacto directo a la línea aérea de baja tensión.

Por razones de simplicidad al igual que en [22], [53], sólo la protección en modo diferencial entre el conductor de fase (L) y tierra es mostrada en ésta investigación.

Algunos de los modelos de transformadores de distribución son presentados en [69] y [71]. Pero debido a que esos modelos son más apropiados para el estudio de fallas internas en el transformador se ha seleccionado en esta investigación el postulado en [32] que presenta el modelado del secundario del transformador.

4.6. Aplicación de la metodología propuesta para el análisis de transitorios a un caso de estudio (CASO DE ESTUDIO A).

El caso de estudio consiste de un transformador de distribución que alimenta a tres usuarios en un arreglo radial como se muestra en la figura 4.3. Los conductores entre las instalaciones B y C, C y D así como el de la instalación B al transformador (punto A) son modelados como una inductancia en serie, que corresponde a un conductor de aluminio de 34 mm^2 de sección transversal (# 2 AWG) con los parámetros dados en la referencia [14]. La separación entre los usuarios es de 100 m y entre la instalación B al transformador es de 20 m.

Se asume que la descarga atmosférica tiene una magnitud de 500 A y una duración de 8/20 μ s., e impacta en cada una de las instalaciones de los usuarios B, C y D respectivamente.

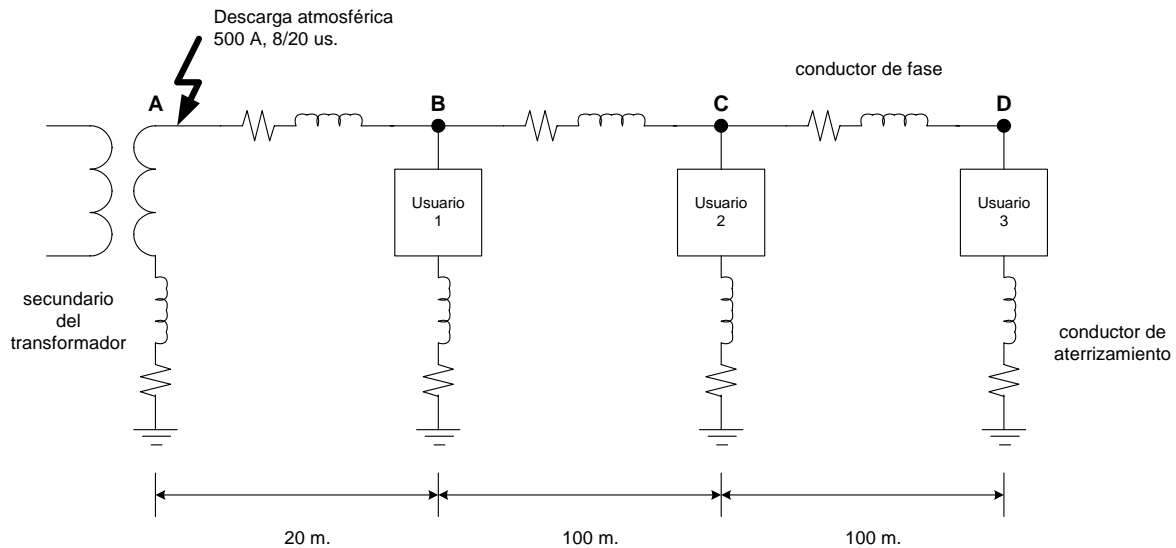


Figura 4.3. Arreglo utilizado para determinar las sobretensiones transitorias en diferentes puntos de impacto (A, B, C, D).

El arreglo mostrado en la figura anterior es modelado en ATP/EMTP mediante el circuito mostrado en la figura 4.4.

Las figuras 4.5. a 4.12. muestran los perfiles de voltaje debido al impulso de corriente aplicado en los diferentes puntos. Un resumen de las sobretensiones transitorias en los diferentes puntos del arreglo del caso de estudio A se presenta en la tabla 4.3.

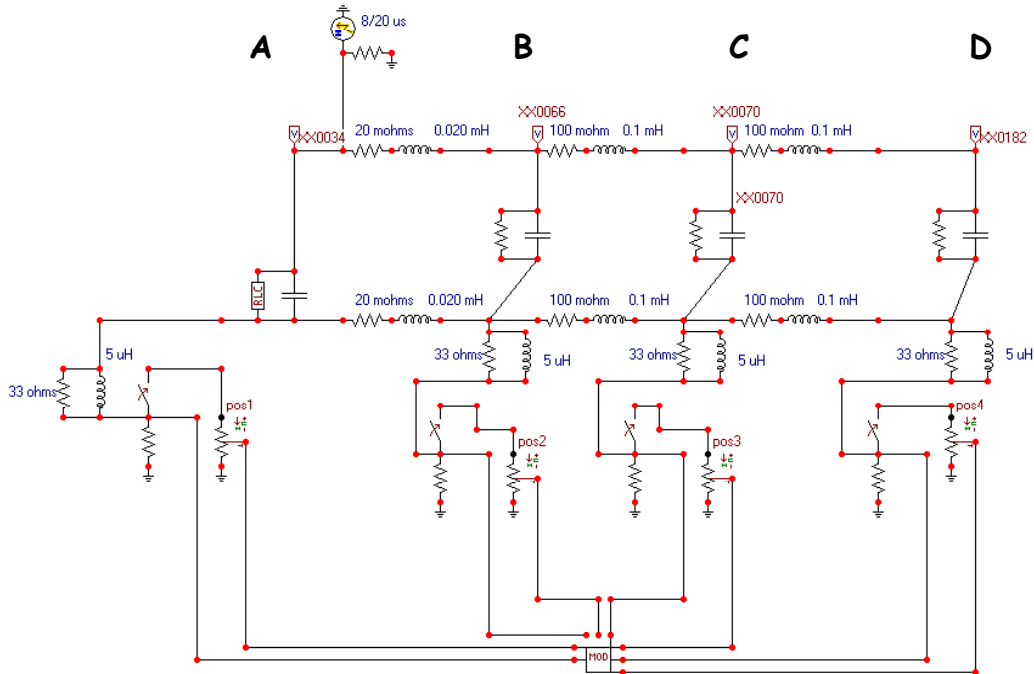


Figura 4.4. Modelo en ATP/EMTP del arreglo utilizado para determinar las sobretensiones transitorias en diferentes puntos de impacto (A, B, C, D).

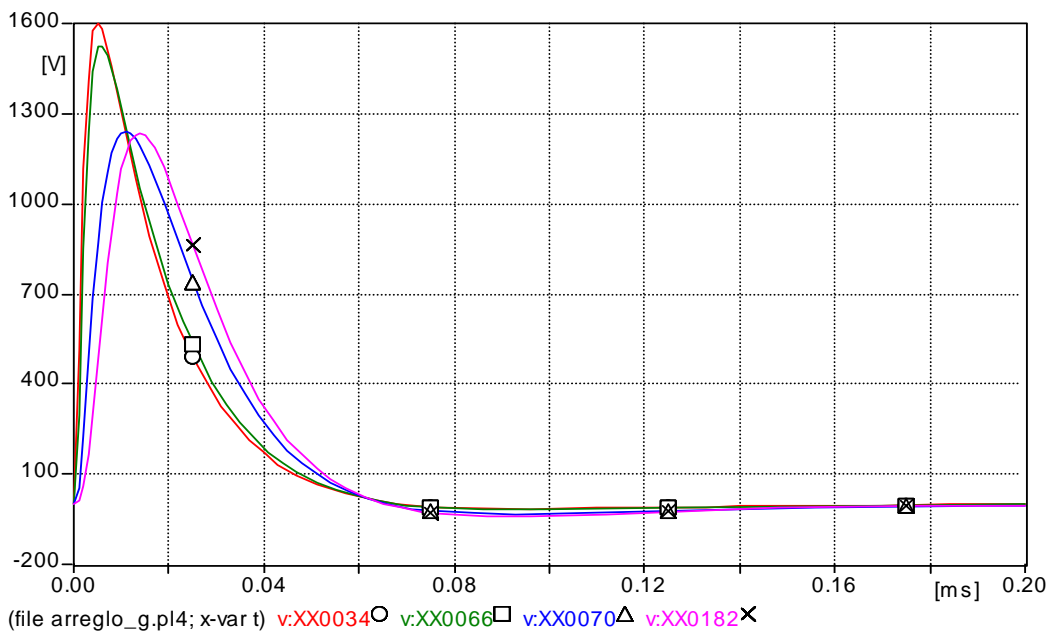


Figura 4.5. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto A del arreglo de la figura 4.3., 500 A, 8/20 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

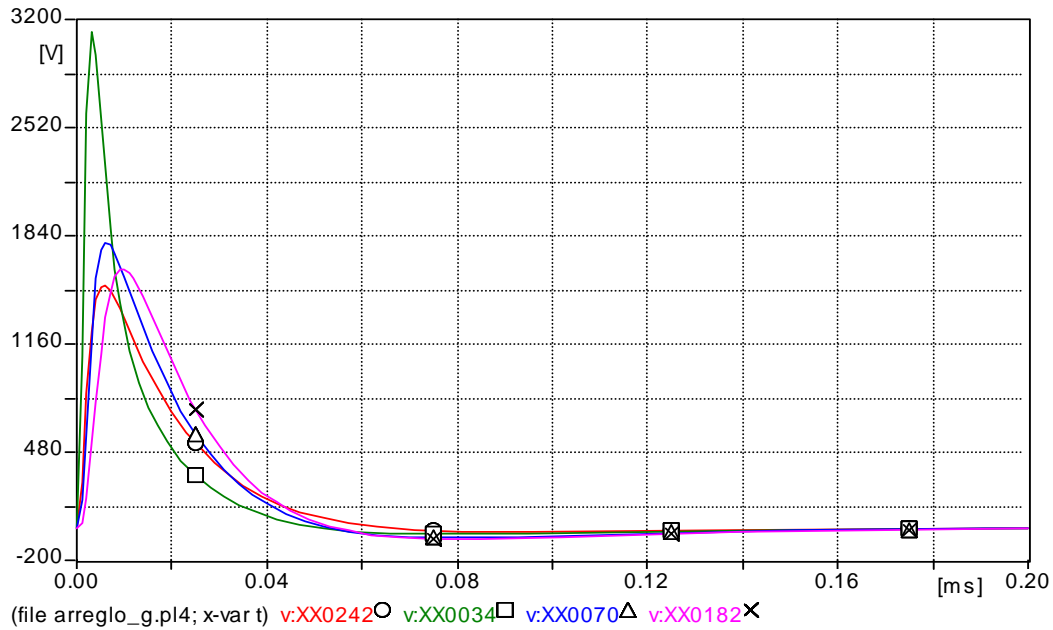


Figura 4.6. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto **B** del arreglo de la figura 4.3., 500 A, 8/20 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

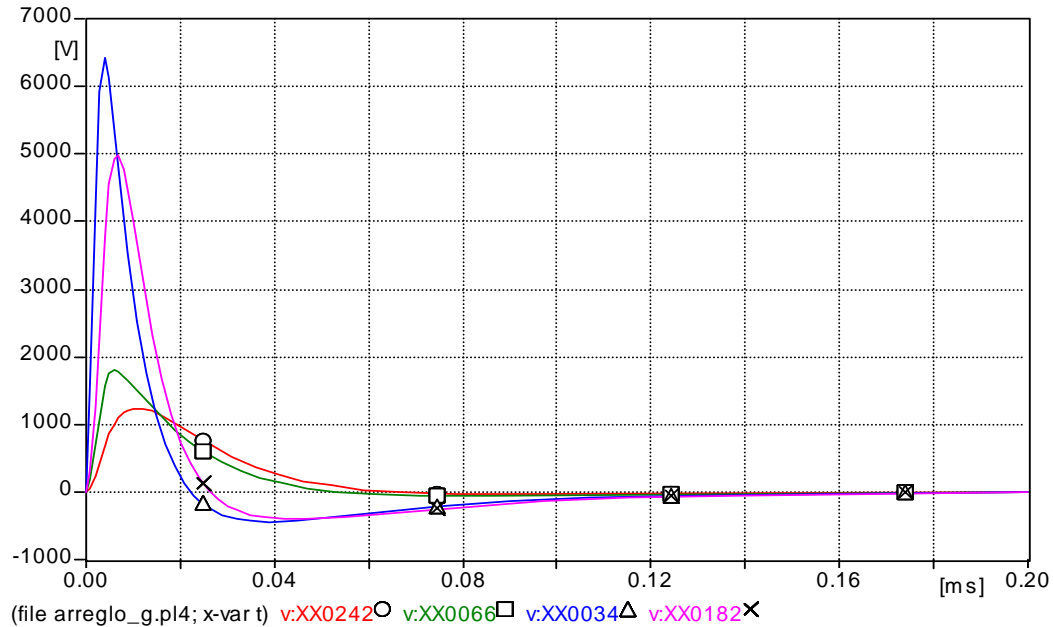


Figura 4.7. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto **C** del arreglo de la figura 4.3., 500 A, 8/20 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

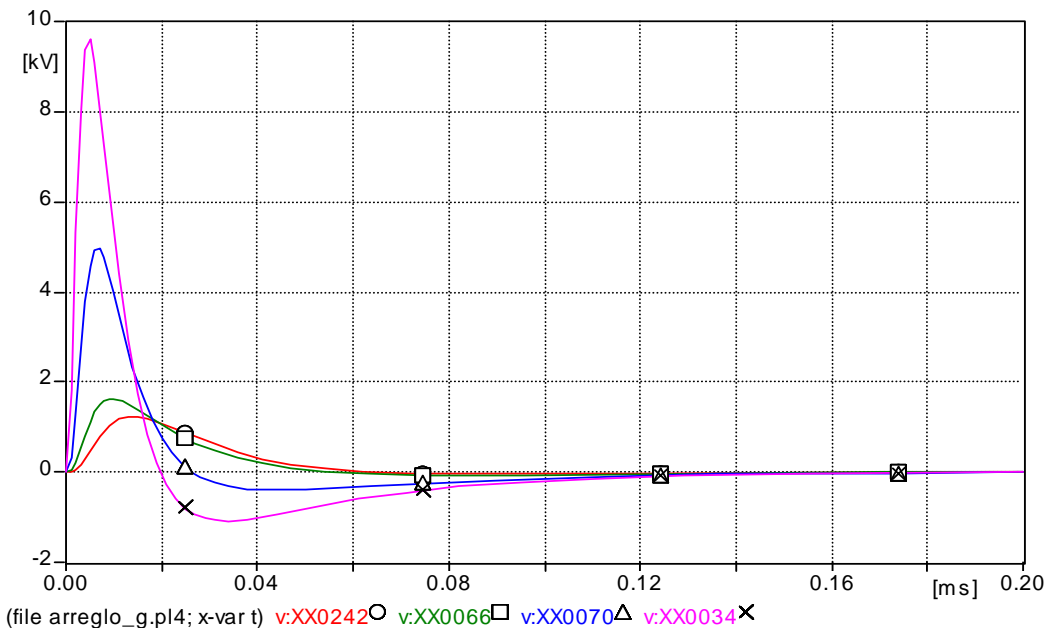


Figura 4.8. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto D del arreglo de la figura 4.3., 500 A, 8/20 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

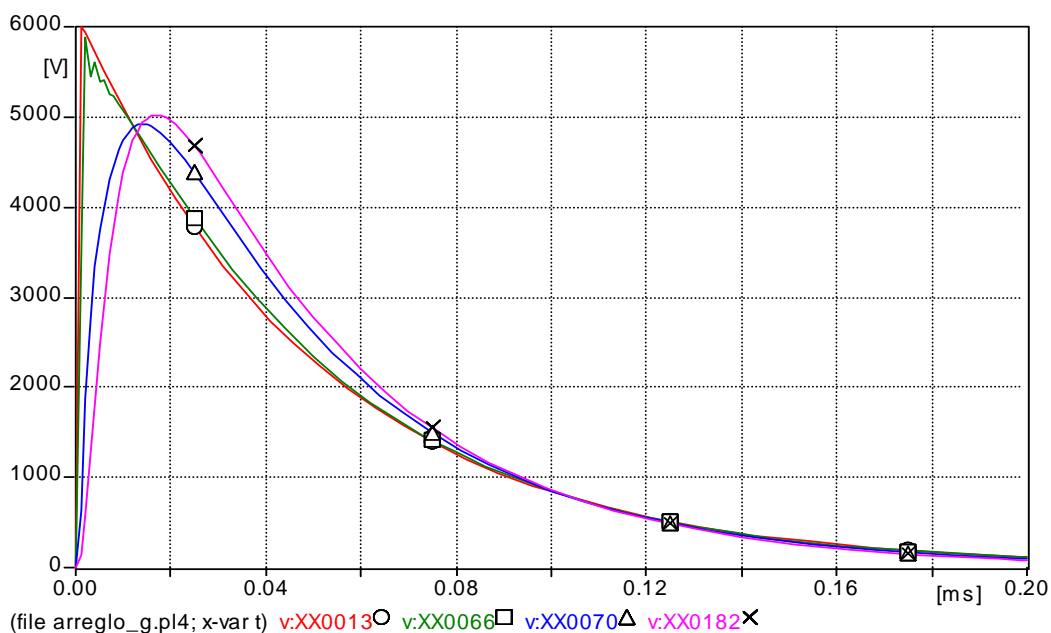


Figura 4.9. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto A del arreglo de la figura 4.3., 6000 V, 1.2/50 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

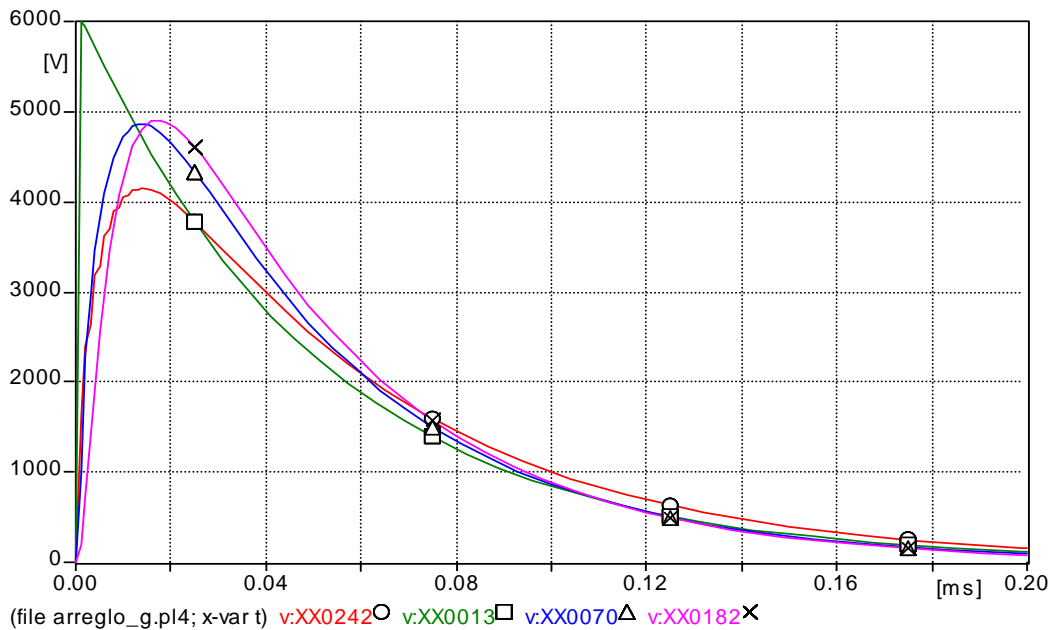


Figura 4.10. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto B del arreglo de la figura 4.3., 6000 V, 1.2/50 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

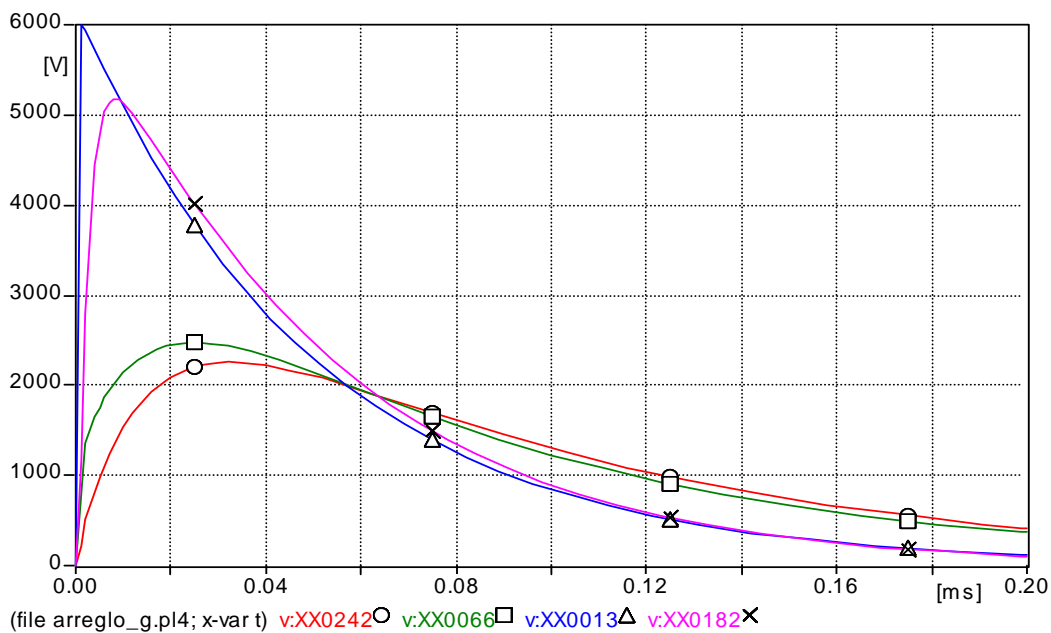


Figura 4.11. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto C del arreglo de la figura 4.3., 6000 V, 1.2/50 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, △- Punto C, x- Punto D.

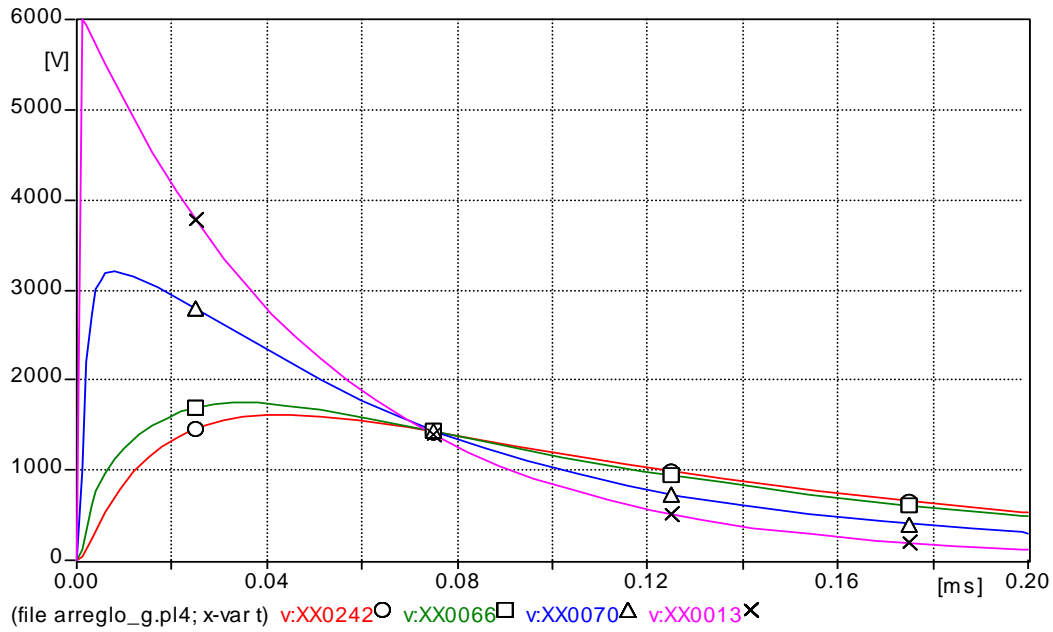


Figura 4.12. Perfil de voltajes debido a un impacto de corriente en el punto D del arreglo de la figura 4.3., 6000 V, 1.2/50 us., 5, 10,10, 10 ohms, 30 ohms metro, 0- Punto A, □- Punto B, Δ- Punto C, x- Punto D.

Tabla 4.3. Sobretensiones transitorias en diferentes puntos del arreglo.

FORMA DE ONDA APLICADA Y RESISTIVIDAD DEL TERRENO	PUNTO DE IMPACTO	PUNTO DE MEDICIÓN			
		A Volts/P.U.	B Volts/P.U.	C Volts/P.U.	D Volts/P.U.
500 A, 8/20 US, 30 Ω -m.	A	1598.9/9.4	1524.5/8.9	1240.9/7.3	1234.3/7.2
	B	1524.7/8.9	3122.7/18.4	1800.7/10.6	1630.6/9.6
	C	1240.9/7.3	1800.7//10.6	6416.5/37.8	4967.4/29.2
	D	1234.0/7.2	1630.3/9.6	4966.1/29.2	9592.5/56.5
6000 V, 1.2/50 US, 30 Ω -m.	A	5992.4/35.3	5882.6/34.6	4920.3/29.0	5023.4/29.6
	B	4147.6/24.4	5992.4/35.3	4862.4/28.6	4904.4/28.9
	C	2256.9/13.3	2472.7/14.5	5992.4/35.3	5183.6/30.5
	D	1619.9/9.54	1747.9/10.3	3211.6/18.9	5992.4/35.3

$$1P.U. = 120\sqrt{2} = 169.705 \text{ Vpico.}$$

La resistencia de conexión a tierra en las instalaciones A, B, C y D es 5, 10, 10, 10 ohms respectivamente [14].

El estándar de IEEE C62.41-1991 [47], establece cuando, de acuerdo con el nivel de sobretensión transitoria aplicada, el equipo sufre un *bloqueo* o una falla.

4.7. Análisis de resultados.

Para el sistema analizado en el caso de estudio A de la sección 4.6., el efecto de los transitorios de voltaje es inspeccionado de manera visual, sobreponiendo la magnitud y duración de los disturbios sobre la curva de susceptibilidad ITIC. Cuando no se tiene instalado algún dispositivo de supresión, las sobretensiones transitorias en el sistema son mayores a 2.0 P.U., como se muestra en la tabla 4.3., exponiendo al equipo del usuario a un posible daño.

Estos resultados permiten tener una aproximación de la magnitud y duración de las sobretensiones transitorias en diferentes puntos de la instalación para una posterior selección y aplicación de los dispositivos de protección.

CAPÍTULO 5

LA FORMA DE PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES EN BAJA TENSIÓN Y EL EFECTO DE LA CONEXIÓN A TIERRA.

5.1. Introducción.

Actualmente el equipo electrónico es más vulnerable a las sobretensiones transitorias; para prevenir daños al equipo sensible, se deben instalar dispositivos no lineales que lo protejan [5].

Para que sea adecuada la protección, debe estar formada por una combinación de dispositivos diferentes, por ejemplo, protectores de descarga en gas y varistores [31], [36]. La adecuada selección de estos dispositivos es importante para tener un buen comportamiento del sistema de protección. En el capítulo tres se presenta el modelado de dos dispositivos, el tubo protector de descarga en gas y el varistor de óxido metálico.

El programa de simulación ATPDRAW y el lenguaje de programación MODELS forman una excelente herramienta para la simulación de la protección contra transitorios que contiene componentes extremadamente no lineales.

En esta tesis se presenta un módulo del varistor y un módulo de tubo de descarga en gas para ser usados en simulaciones en ATP-EMTP, utilizando el lenguaje de programación MODELS. El módulo incluye dos cajas MODELS en el cual el tiempo de retardo entre la señal de voltaje y la señal de voltaje de disparo y la resistencia de arco dependiente del tiempo son modelados.

5.2. La necesidad de instalar dispositivos de supresión.

La columna vertebral de las sociedades modernas posee grandes sistemas de información. Una avería, ó la falla de alguno de estos sistemas tiene consecuencias catastróficas.

Las causas de las averías son múltiples, pero las alteraciones y perturbaciones electromagnéticas juegan un papel importante. En un entorno con una gran cantidad de equipos sensibles que contienen dispositivos de estado sólido, no resulta aconsejable esperar a que se produzcan influencias y perturbaciones en los equipos y sistemas electrónicos y una vez producidas las fallas, intentar subsanarlas. Por ello es recomendable adoptar medidas que eviten o disminuyan considerablemente el riesgo de perturbaciones, averías y destrucción de equipos [41],[79].

5.2.1. Circuitos combinados y la protección en cascada.

Si los problemas no son resueltos con la instalación de un solo dispositivo de protección, como un varistor, es necesario combinar diferentes dispositivos aprovechando sus respectivas ventajas. La figura 5.1. ilustra el principio de protección [61], [70]. El voltaje de 10 kV es limitado mediante dos barreras:

- _ "burda": protector de descarga en gas
- _ "estándar": varistor

También se llega a incluir una tercer barrera "fina" mediante un diodo normal o un diodo *zener* (no mostrado).

5.3. Protección mediante varistores de óxido metálico y protectores de descarga en gas.

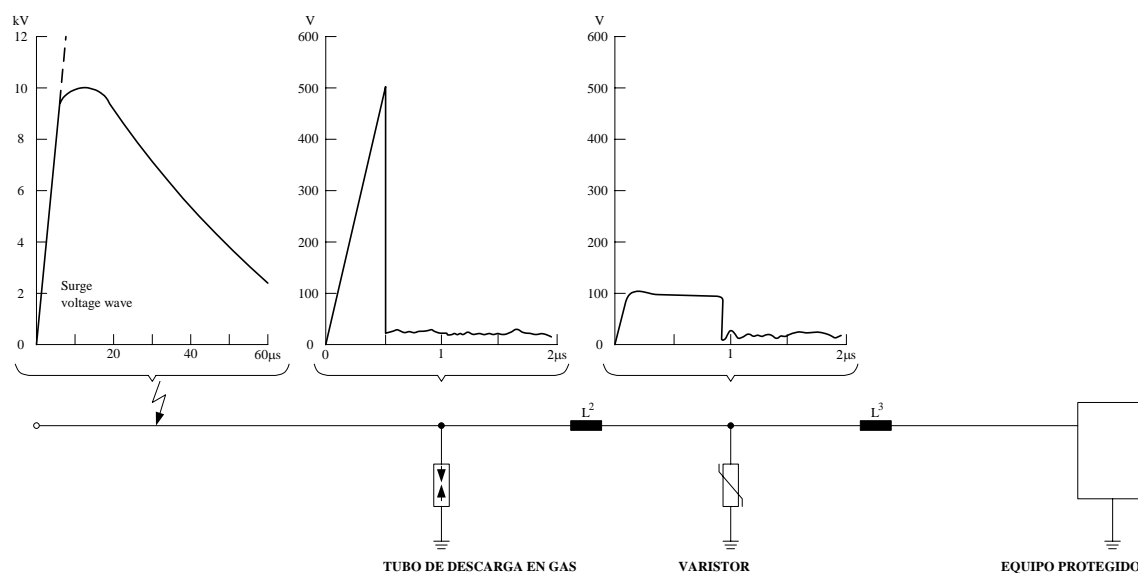


Figure 5.1. Principio de protección mediante varistores de óxido metálico y protectores de descarga en gas.

La figura 5.2 muestra la forma de onda de voltaje de circuito abierto aplicada a diferentes varistores.

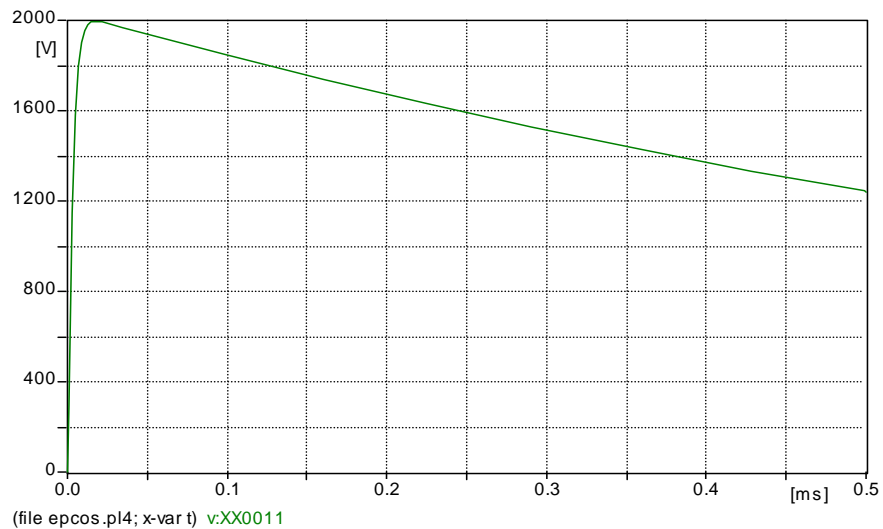


Figura 5.2. Forma de onda de 10/700 us., 2 kV de circuito abierto aplicada a diferentes varistores.

En las figuras 5.3. a 5.18. se presenta la respuesta de diferentes varistores cuando se les aplica un impulso de voltaje con las características mostradas en la figura 5.2.

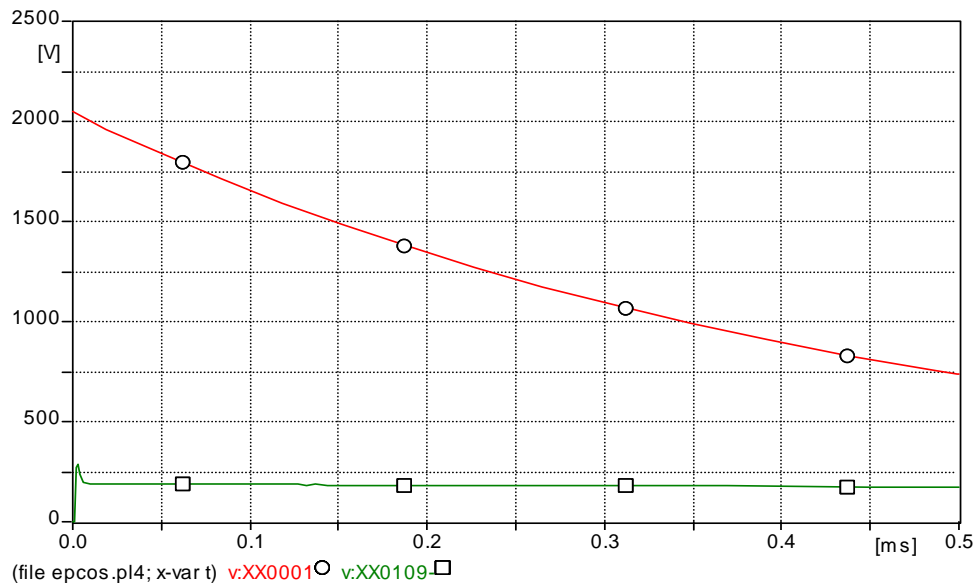


Figura 5.3. Operación del SIOV- S10K75 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

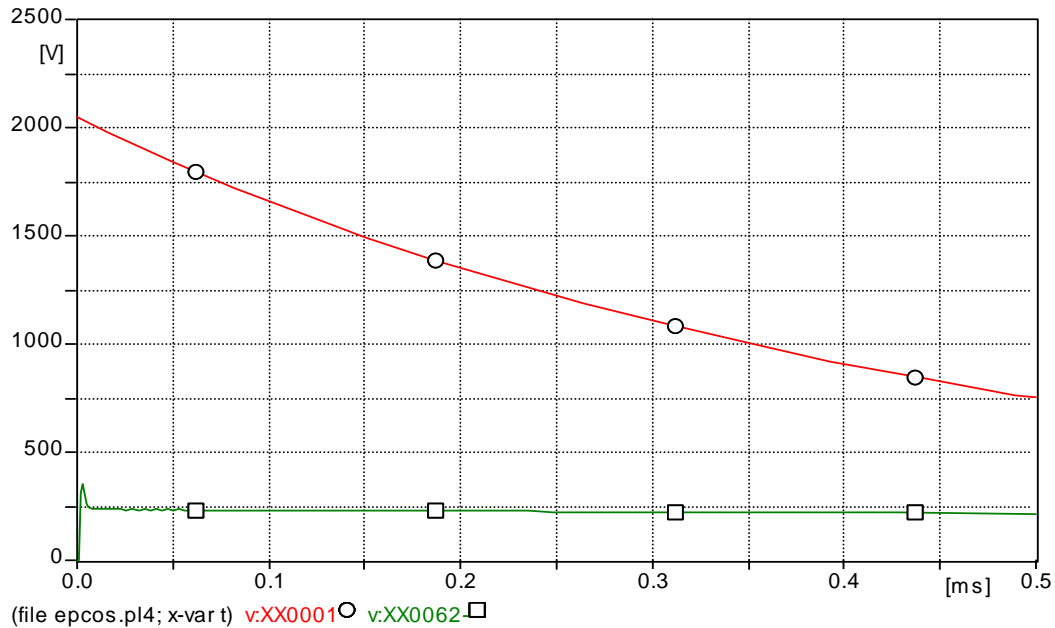


Figura 5.4. Operação do SIOV- S10K95 durante uma sobretensão de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensão aplicada, □- Operação do dispositivo.

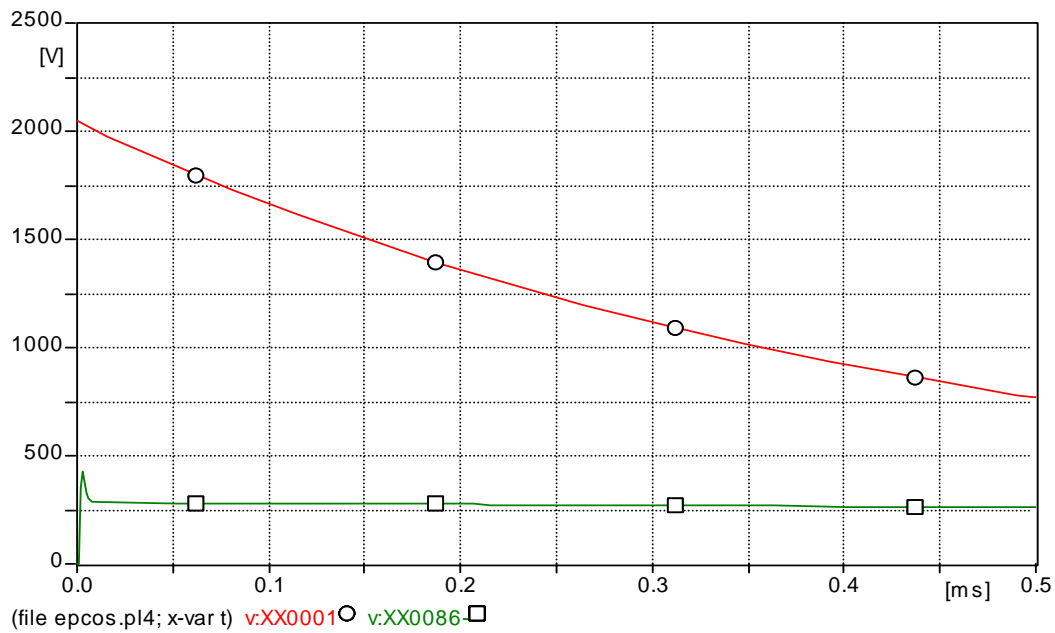


Figura 5.5. Operação do SIOV- S10K115 durante uma sobretensão de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensão aplicada, □- Operação do dispositivo.

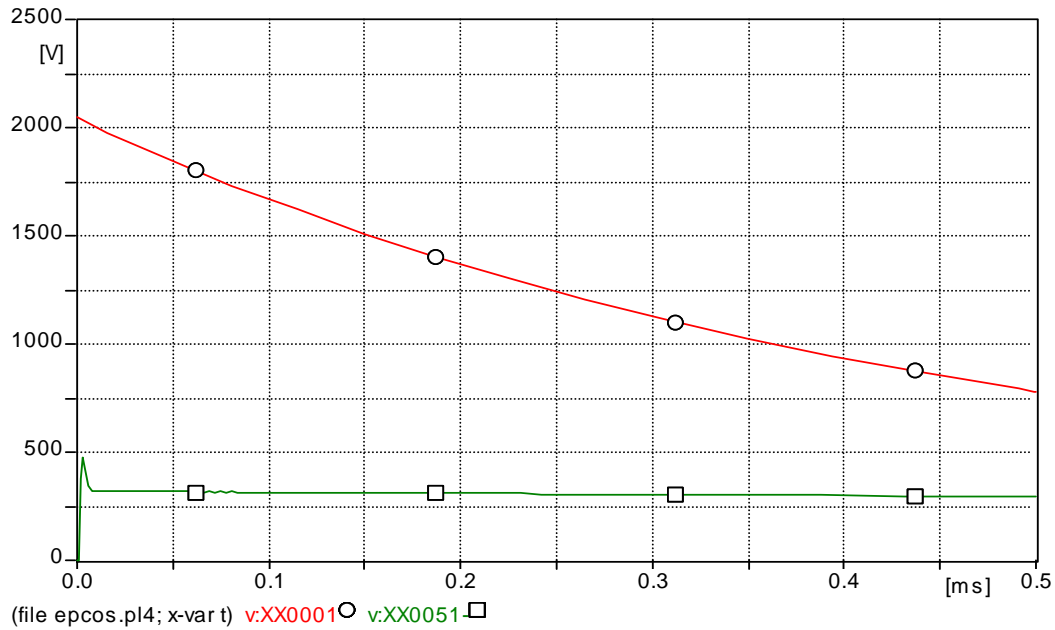


Figura 5.6. Operación del SIOV- S10K130 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

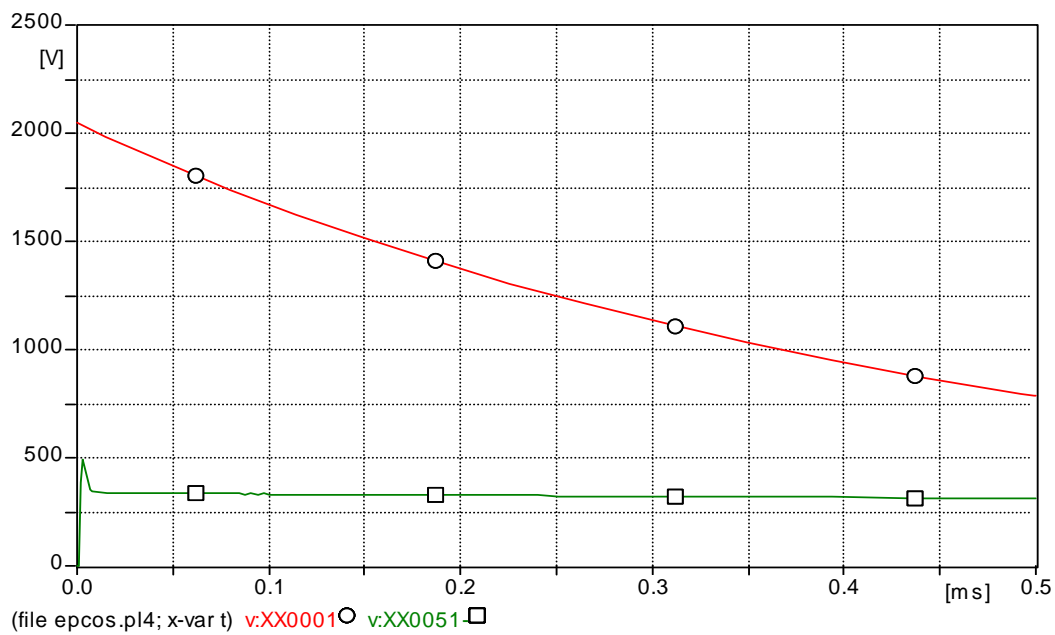


Figura 5.7. Operación del SIOV- S10K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

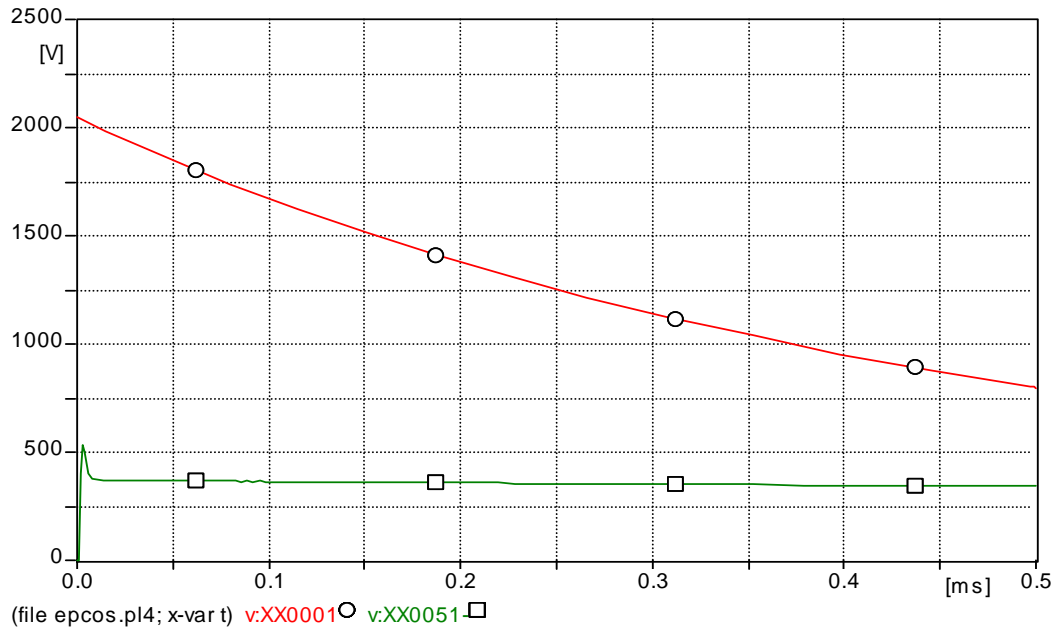


Figura 5.8. Operação do SIOV- S10K150 durante uma sobretensão de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensão aplicada, □- Operação do dispositivo.

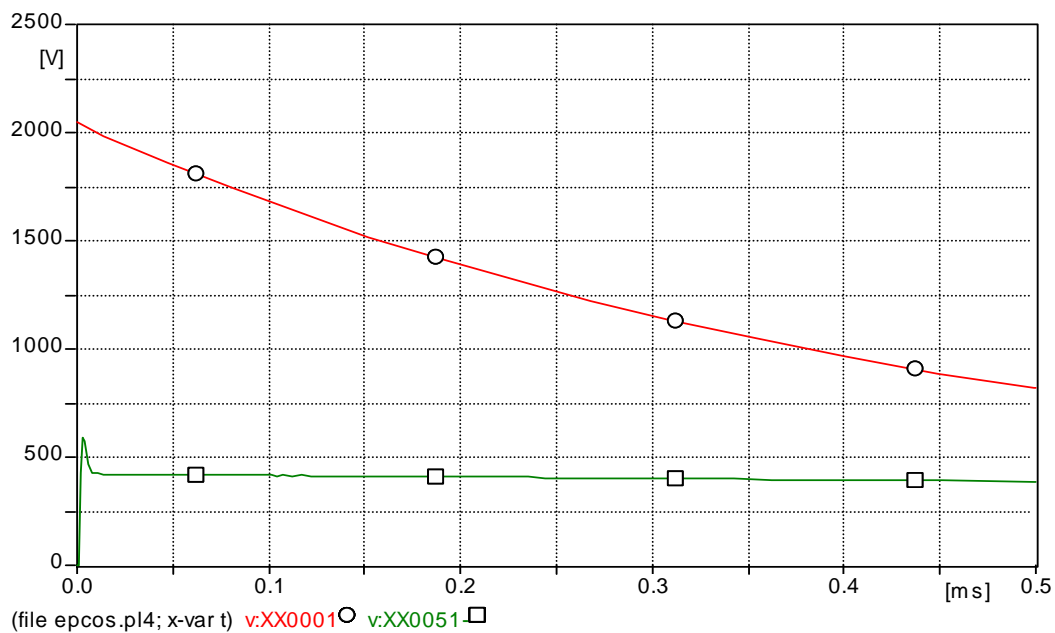


Figura 5.9. Operação do SIOV- S10K175 durante uma sobretensão de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensão aplicada, □- Operação do dispositivo.

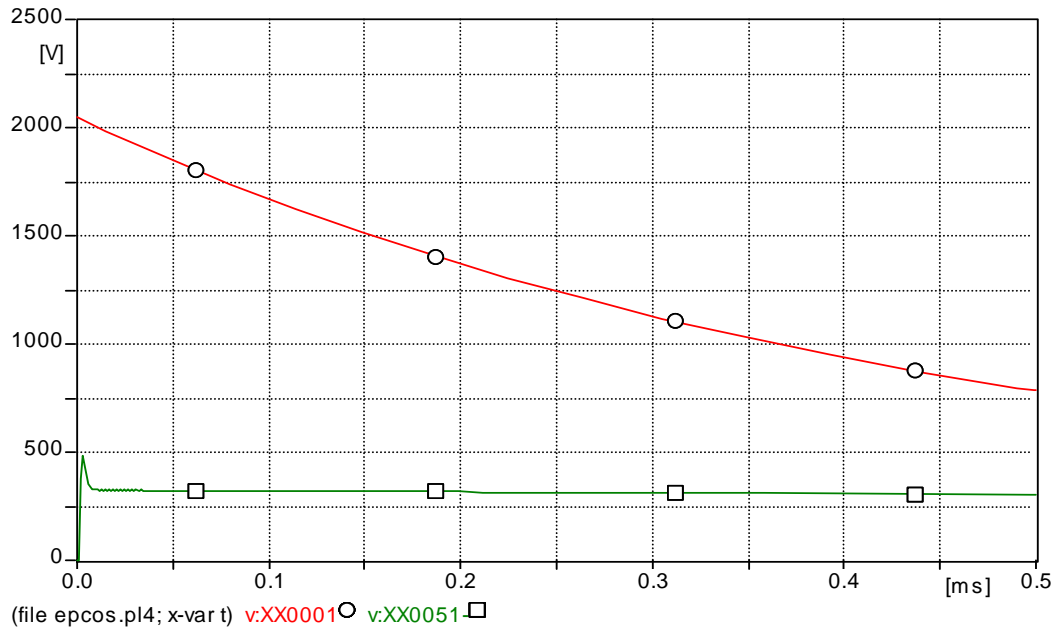


Figura 5.10. Operación del SIOV- S14K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

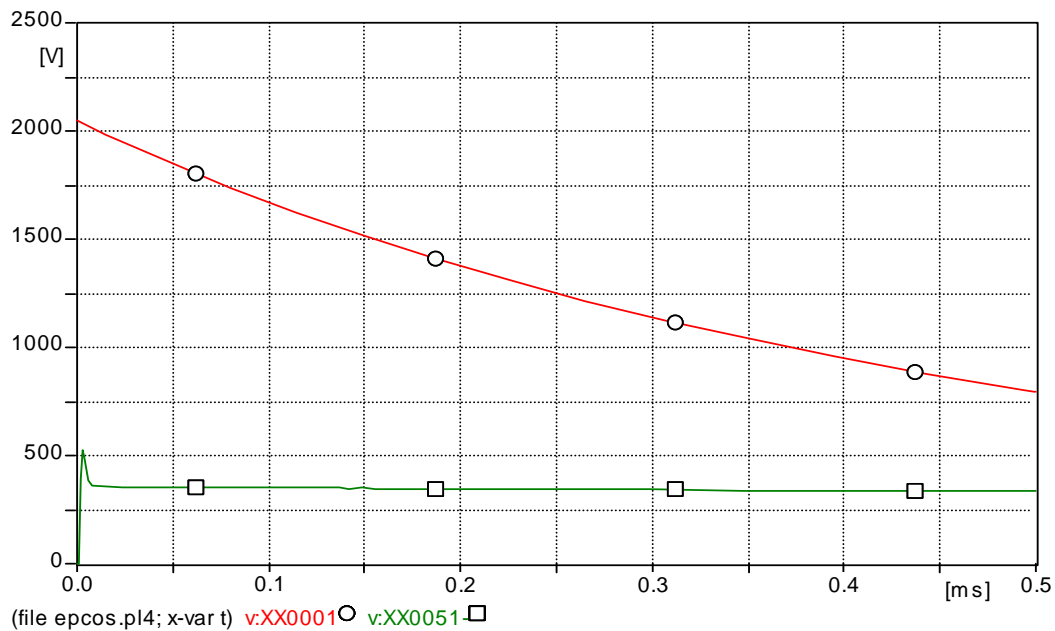


Figura 5.11. Operación del SIOV- S14K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 355 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

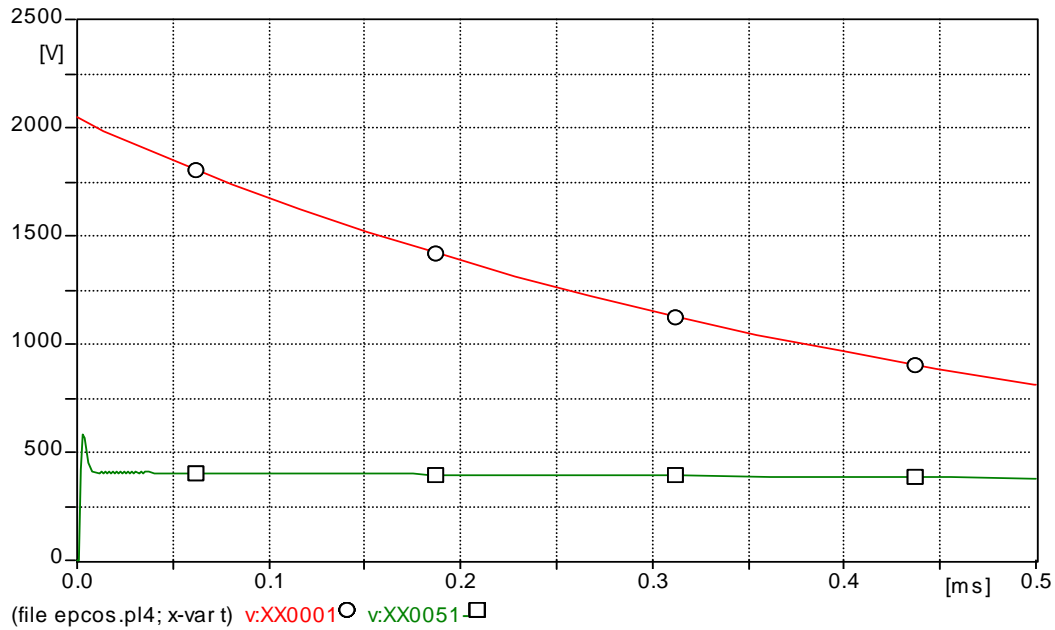


Figura 5.12. Operación del SIOV- S14K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 400 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

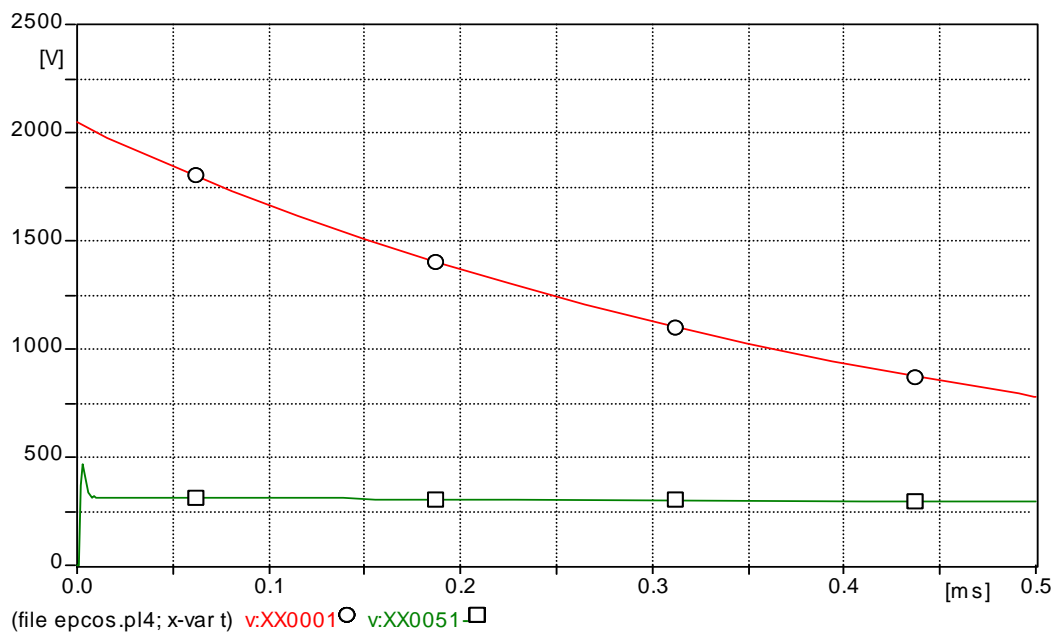


Figura 5.13. Operación del SIOV- S18K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 310 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

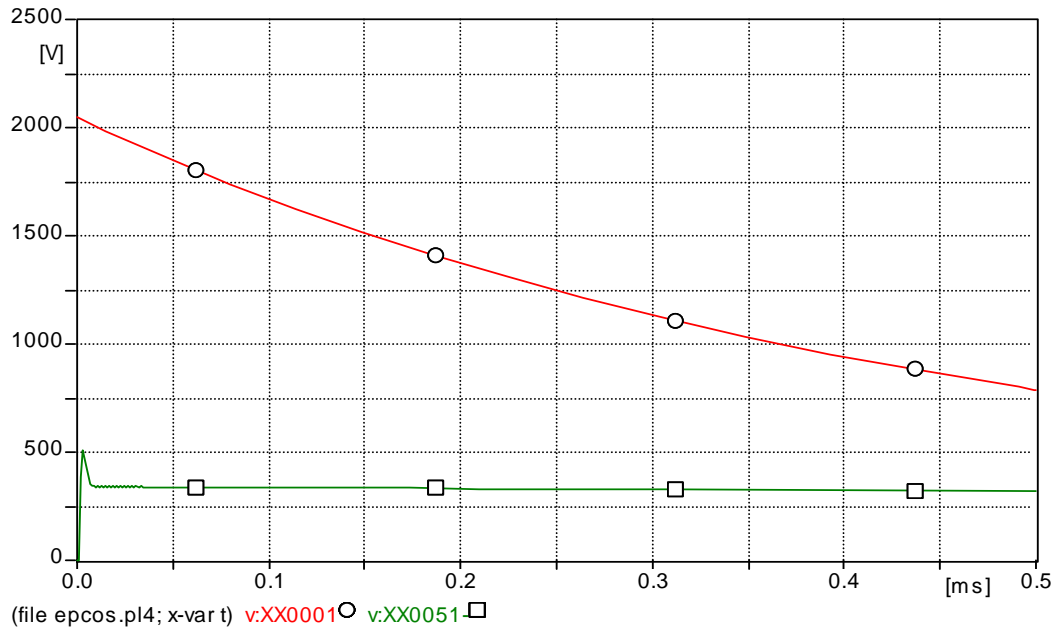


Figura 5.14. Operación del SIOV- S18K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 340 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

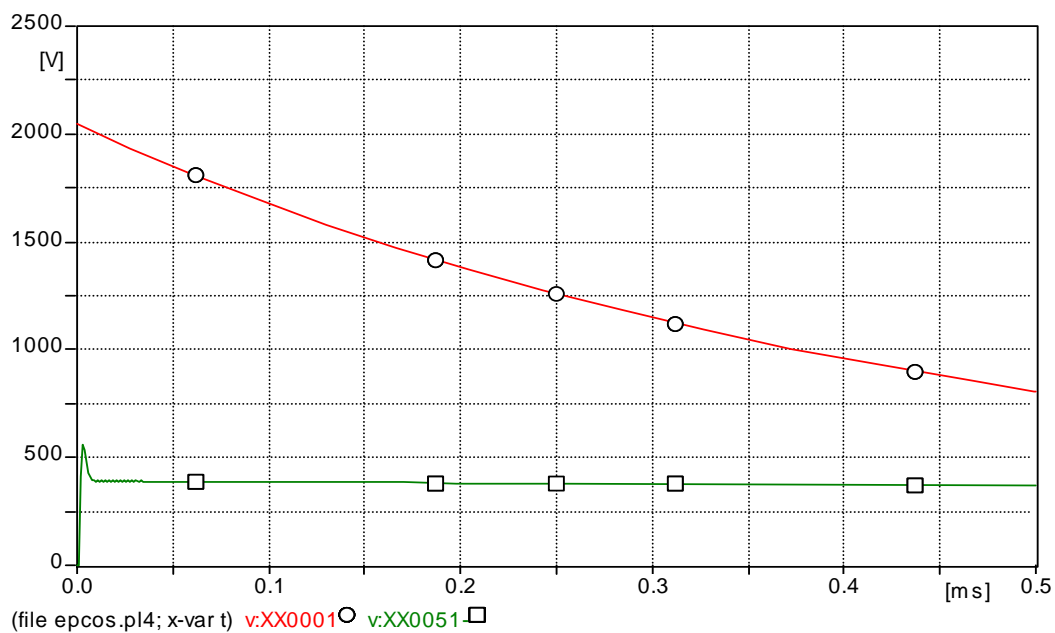


Figura 5.15. Operación del SIOV- S18K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 390 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

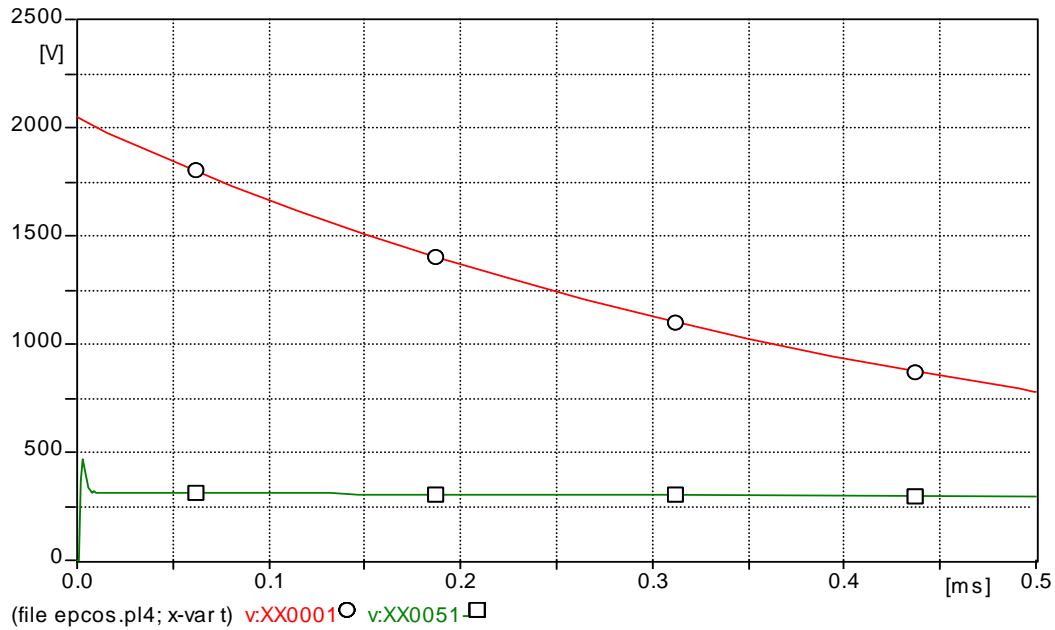


Figura 5.16. Operación del SIOV- S20K140 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 310 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

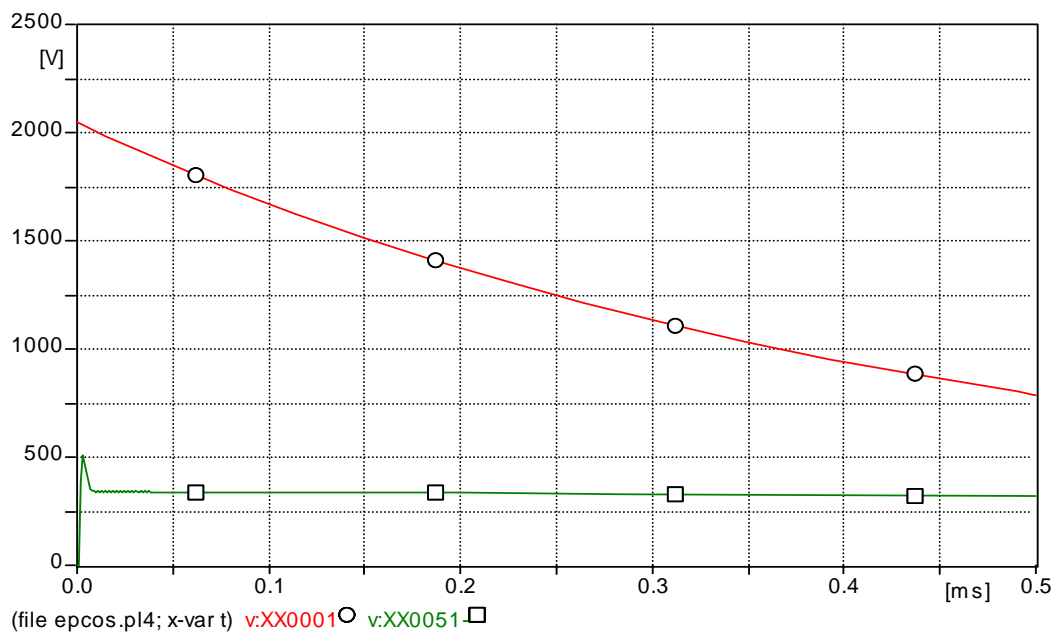


Figura 5.17. Operación del SIOV- S20K150 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 337 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

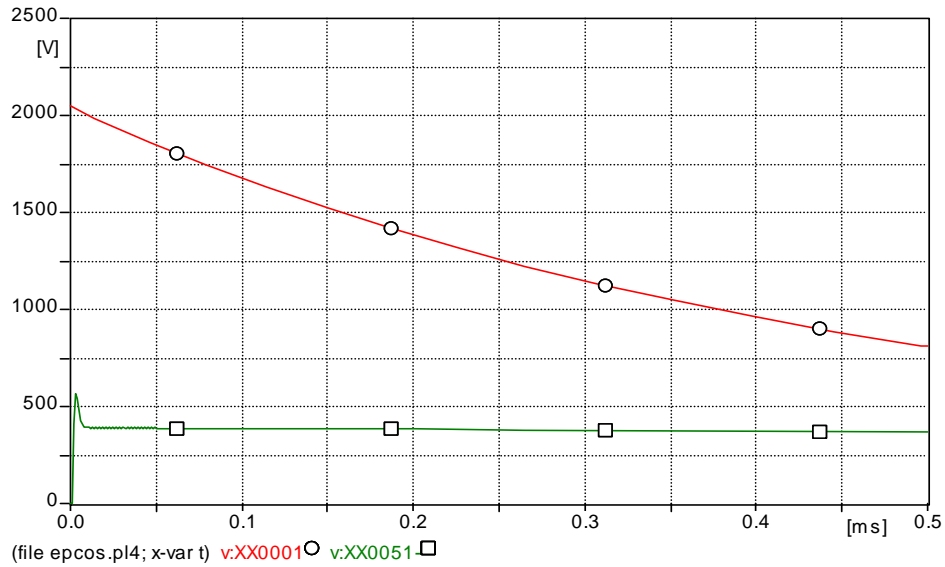


Figura 5.18. Operación del SIOV- S20K175 durante una sobretensión de 2kV, 10/700 us., SVR 388 V, 0-Sobretensión aplicada, □- Operación del dispositivo.

En la tabla 5.1 se presenta una comparación entre las capacidades de supresión de voltaje de los varistores simulados y los de la referencia [70].

Tabla 5.1. Comparación entre los SVR de la referencia [70] y los de esta investigación.

MODELO	SVR _[70] [kV].	SVR _{simulada} [kV].	MODELO	SVR _[70] [kV].	SVR _{simulada} [kV].
S10K75	200	190	S14K150	395	355
S10K95	250	235	S14K175	455	400
S10K115	300	285	S18K140	360	310
S10K130	340	320	S18K150	395	340
S10K140	360	335	S18K175	455	390
S10K140	395	370	S20K140	360	310
S10K175	455	420	S20K150	395	337
S14K140	360	320	S20K175	455	388

En la figura 5.19 se presenta el arreglo completo de la protección híbrida desarrollada en esta investigación; formada por un tubo protector de descarga en gas y un varistor de óxido metálico. La primer sección del lado izquierdo representa la fuente de impulso de voltaje, la siguiente sección representa el al tubo protector de descarga en gas. La penúltima sección representa al cable de la instalación y la última sección representa al varistor de óxido metálico.

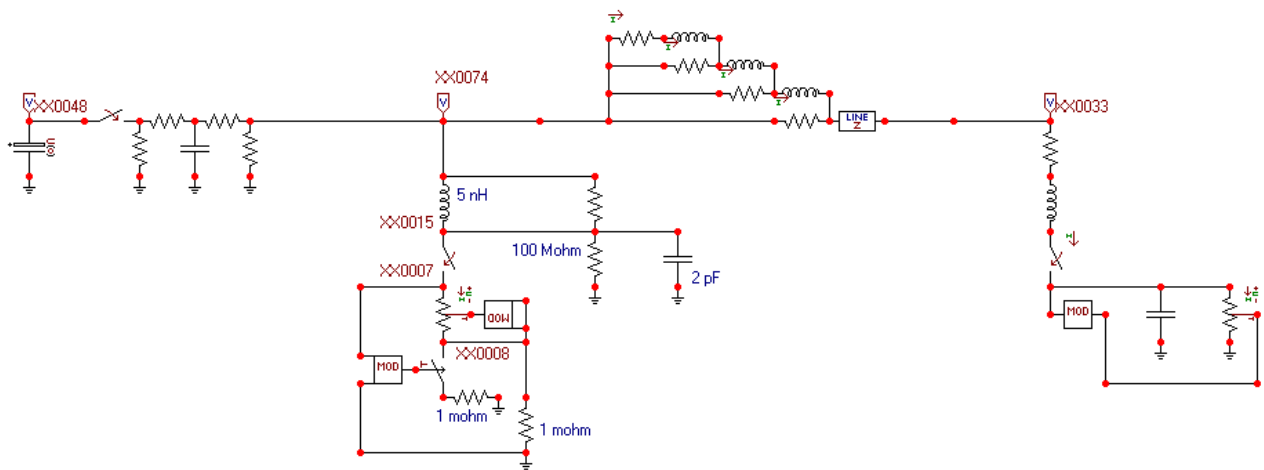


Figura 5.19. Arreglo completo de la protección, simulado en ATPDRAW.

En la figura 5.20 se presentan los perfiles de voltaje durante la operación de los dispositivos de la protección híbrida cuando se aplica un impulso de voltaje de 2 kV con una duración de 10/700 μ s.

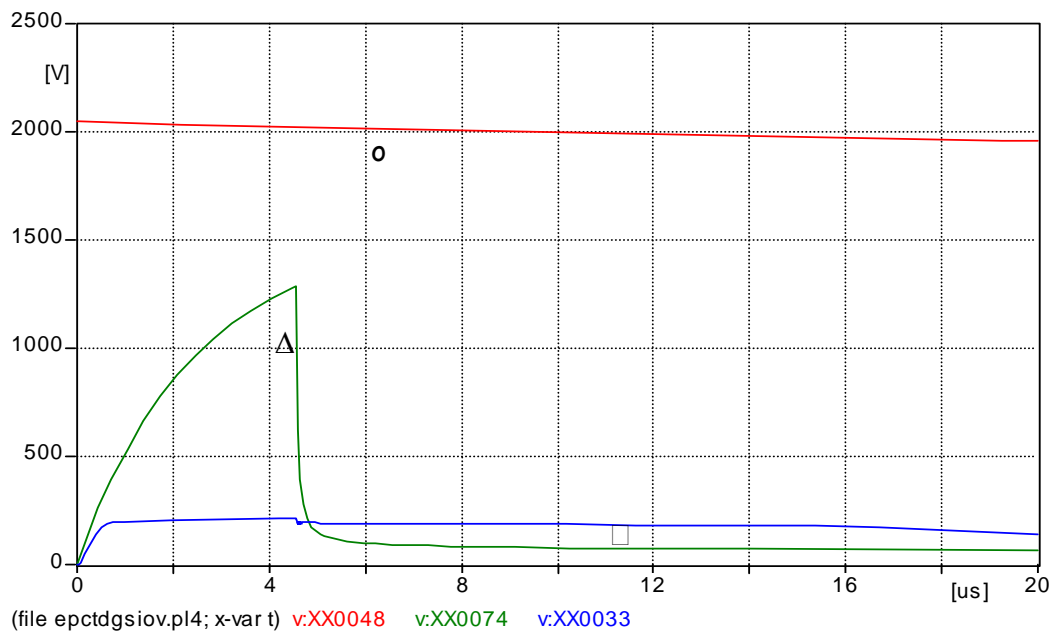


Figura 5.20. Perfil de voltajes obtenidos durante la operación del tubo de descarga en gas CGZ/230 VL (GDP) y el varistor SIOV S10K95 obtenido con ATP/EMTP.
o- Sobretensión aplicada, Δ - operación del tubo de descarga en gas, \square - operación del varistor.

En las figuras 5.21 y 5.22 se presenta a manera de ejemplo algunos de los esquemas de protección en los que se aplica la protección híbrida.

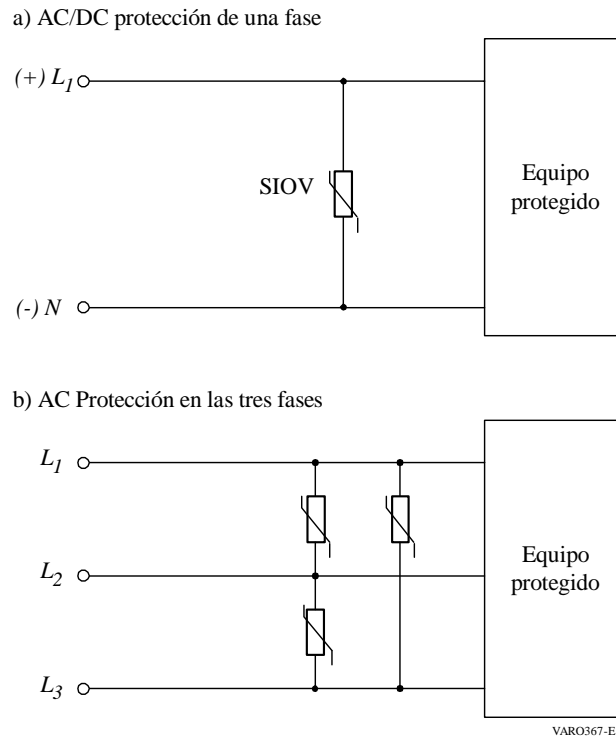


Figura 5.21. Ejemplos de esquemas de protección.

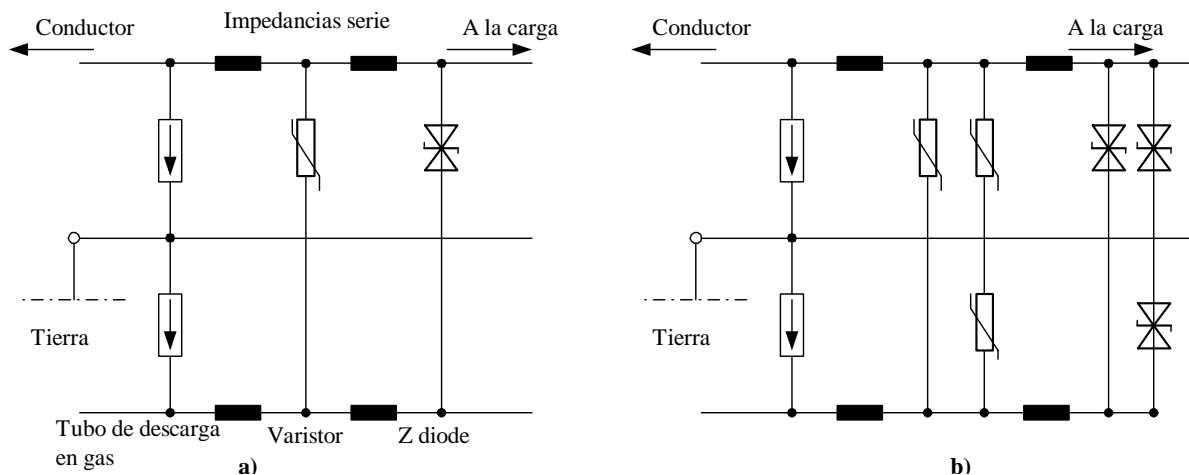


Figure 5.22. Ejemplo de aplicación de los dispositivos de protección en cascada.

5.4. Selección de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

La entrada de la línea debe ser protegida mediante un dispositivo de supresión, por ejemplo un tubo de descarga en gas, o por un apartarrayos de óxido metálico [80], [81].

La selección del dispositivo de sujeción debe realizarse dependiendo del tipo de aplicación. El dispositivo debe tener un voltaje mínimo de operación continuo mayor al voltaje del sistema. La capacidad no debe ser menor al 115 % respecto al voltaje nominal rms. [79].

5.5. Estándares UL 1449 y ANSI/IEEE C62.41.

La capacidad de supresión de voltaje (SVR) no debe exceder los siguientes límites (UL 1449) [25], [37]:

Tabla 5.1. Voltajes de supresión UL 1449.

Voltaje	L-N	L-G
208Y/120	400 V	400 V
480y/277	800 V	800 V

El voltaje de paso no debe exceder los límites especificados en la tabla 5.2., categoría C3, (10 kA/20 kV) [47].

Tabla 5.2. Voltajes de paso ANSI/C62.41.

Voltaje	L-N	L-G
208Y/120	950	950
480y/277	1350	1350

5.6. La aplicación de los dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (CASO DE ESTUDIO B).

En éste caso de estudio se presenta la aplicación de los dispositivos de supresión contra sobretensiones transitorias en un sistema eléctrico de baja tensión. El sistema estudiado es una línea de 120 V. conectada al secundario del transformador de potencia, donde tres dispositivos de supresión son ubicados en diferente puntos a lo largo de la línea. Esto es, a la entrada del servicio, en el tablero de distribución y en la carga. La longitud total de la línea bajo estudio es de 30 metros, con el tablero de distribución ubicado a la mitad de la línea [52].

Para la simulación dos tramos de conductor de 15 metros y uno de 9 metros de longitud, #12 AWG, son considerados. Como se muestra en la figura 5.23., en el extremo del conductor ubicado en la entrada del servicio es instalado un dispositivos de supresión de 40 mm. de diámetro, de 250 V. En el extremo donde se ubica el tablero se instala un supresor de 20 mm. de diámetro, de 150 V. Los siguientes 15 metros de longitud de conductor son conectados al final de la primer sección en este punto. Un supresor de 20 mm. de diámetro de 130 V.,

es conectado en el extremo final del segundo tramo de conductor para representar la supresión en la carga [12], [70].

5.6.1. Configuraciones de prueba.

Siete configuraciones de prueba son simuladas:

- 1) Dispositivos de supresión instalados en las tres localidades.
- 2) Sin supresor en el tablero.
- 3) Sin supresor en la carga.
- 4) Sin supresores.
- 5) Supresor sólo en la acometida.
- 6) Supresor sólo en el tablero.
- 7) Supresor sólo en la carga.

En la figura 5.23 se muestra el arreglo general de las configuraciones de prueba.

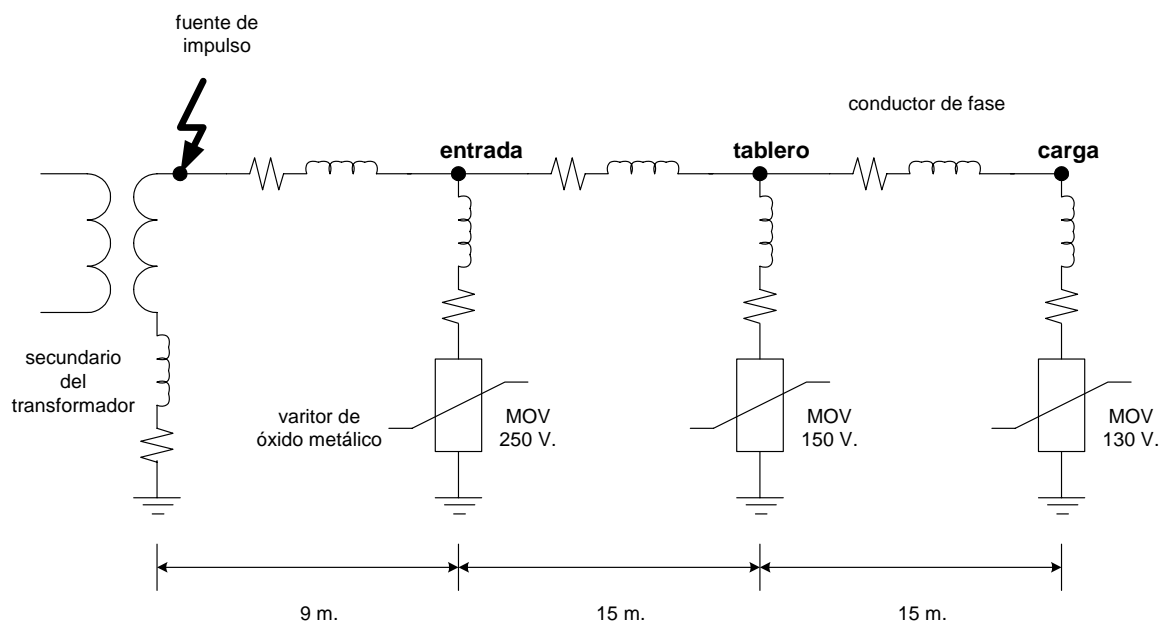


Figura 5.23. Configuración general.

En la figura 5.24 se muestra la implementación del circuito en ATP/EMTP donde una descarga atmosférica de tipo impulso de 1.2/50 us., 6 kV, [47] es aplicada sobre el cable de la instalación, a la entrada del servicio. La respuesta de los supresores para cada configuración es resumida en la tabla 5.3.

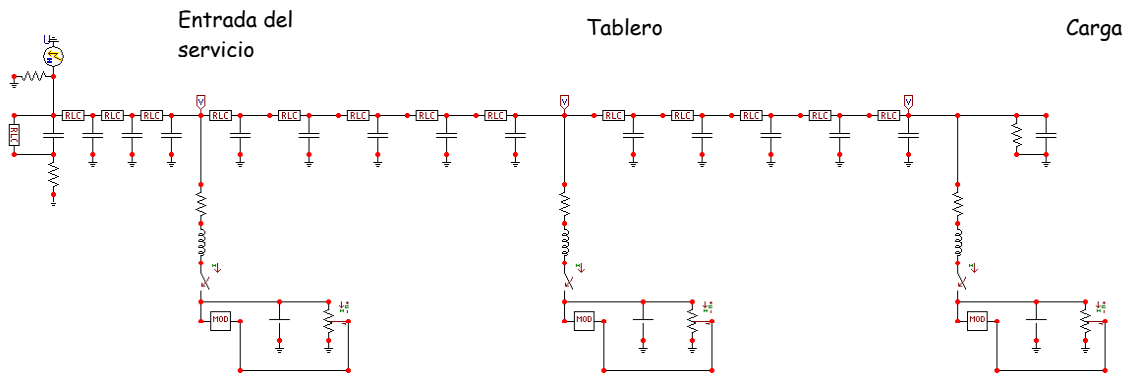


Figura 5.24. Implementación del circuito en ATP/EMTP utilizando un supresor en cada punto de la instalación [61].

En la figura 5.25 se muestran los perfiles de corriente para la primer configuración cuando se aplica un impulso de corriente de 10 kA y de 8/100 us de duración sugerida por [52].

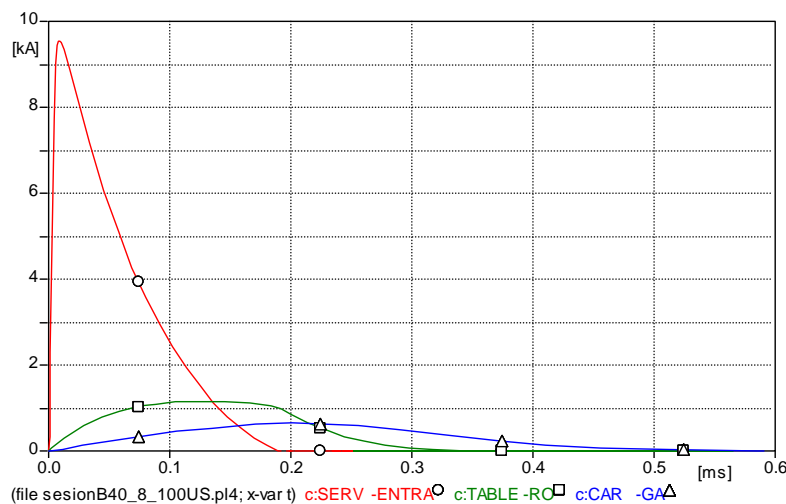


Figura 5.25. Supresores en los tres puntos, 0- Entrada del servicio, □- Tablero, Δ- Carga.

Para cada configuración, las sobretensiones transitoria de línea a tierra en el punto de entrada del servicio, en el tablero de distribución, y en la carga son presentadas en las figuras 5.26 a 5.31.

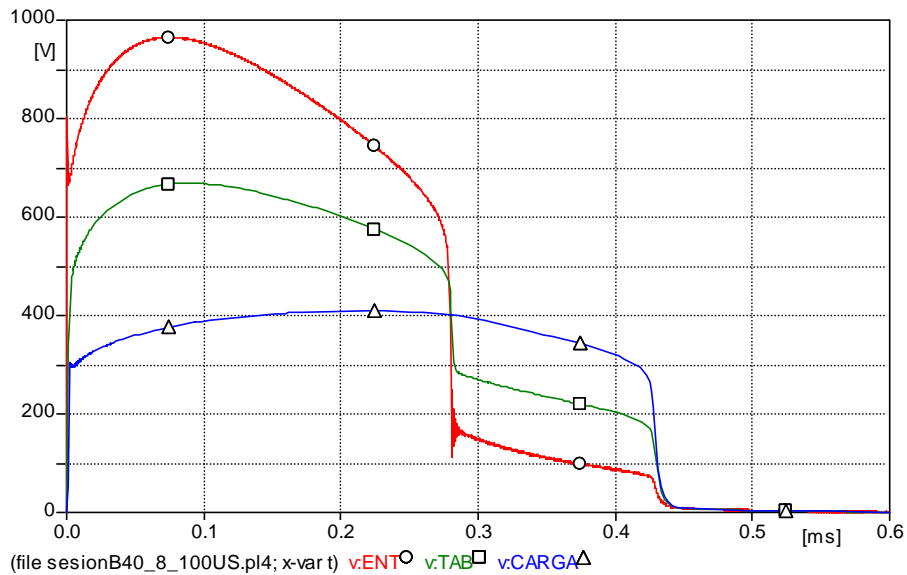


Figura 5.26. Sin supresor en el tablero, 0- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

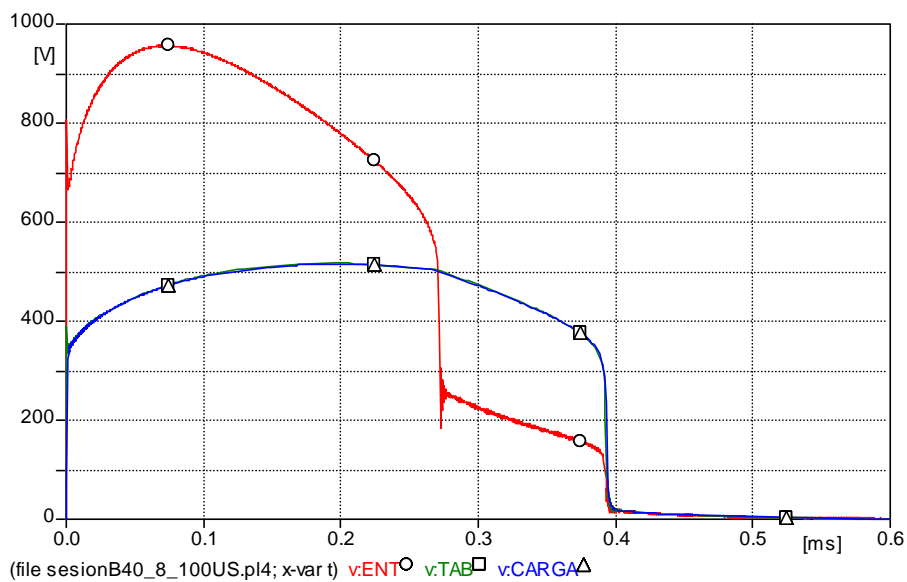


Figura 5.27. Sin supresor en la carga, 0- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

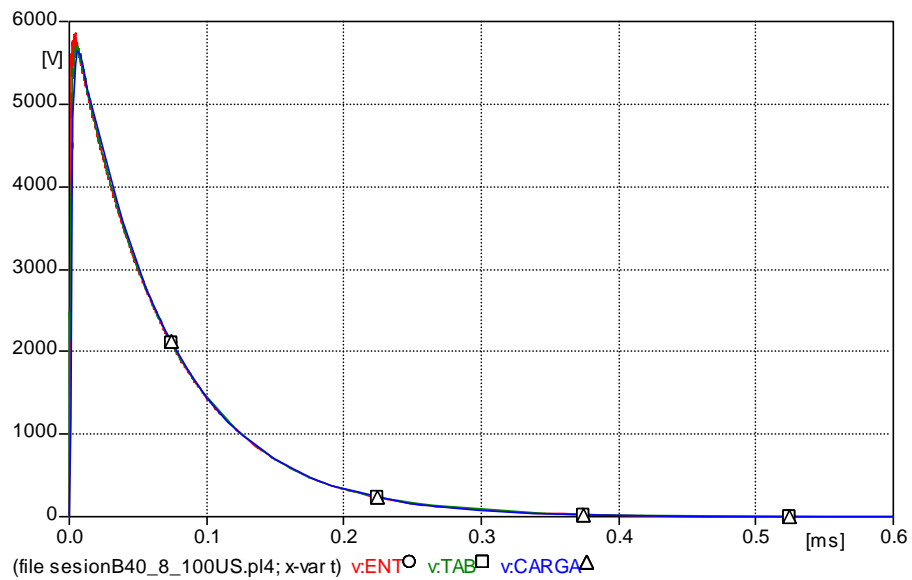


Figura 5.28 Sin supresores, 0- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

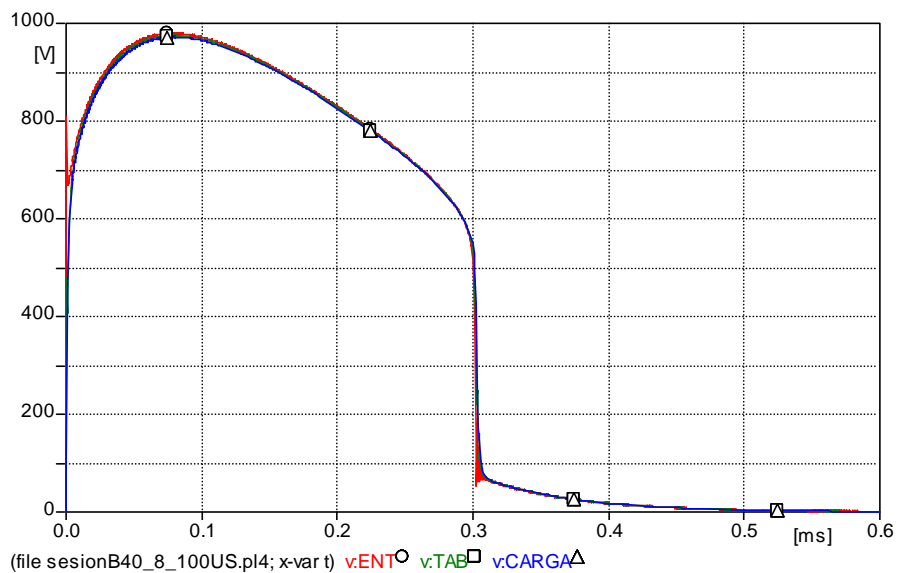


Figura 5.29. Supresor solo en la acometida, 0- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

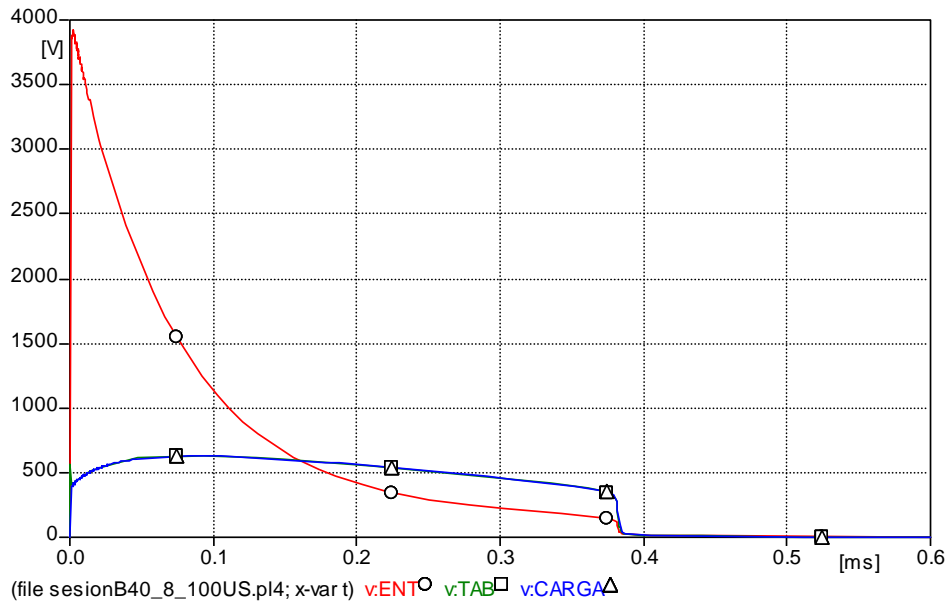


Figura 5.30. Supresor solo en el tablero, ○- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

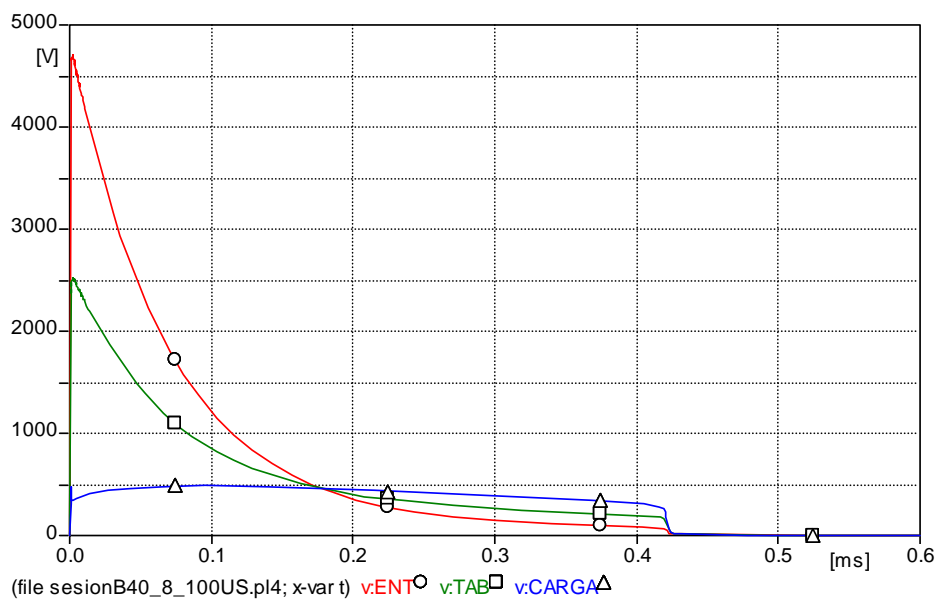


Figura 5.31. Supresor sólo en la carga, ○- Entrada del servicio, □- Tablero, △- Carga.

Tabla 5.3. Sobretensiones transitorias obtenidas en la simulación, para una onda de voltaje aplicada de 6 kV, 1.2/50 us.

Configuración	Voltaje en la entrada del servicio [V]/P.U.	Voltaje en el tablero [V]/P.U.	Voltaje en la carga [V]/P.U.
1. Supresores en los tres puntos	1088/6.4	465/2.7	340/2.0
2. Sin supresor en el tablero	1108/6.5	750/4.4	414/2.4
3. Sin supresor en la carga	1089/6.4	482/2.8	480/2.8
4. Sin supresores	6000/35.3	6000/35.3	6000/35.3
5. Supresor sólo en la acometida	1129/6.6	-	-
6. Supresor sólo en el tablero	-	547/3.2	-
7. Supresor sólo en la carga	-	-	468/2.7

$$1P.U. = 120\sqrt{2} = 169.705 \text{ Vpico.}$$

En la tabla 5.4 se presenta una comparación entre los valores obtenidos por el autor en [52] y los obtenidos en esta investigación para la configuración uno en particular.

Tabla 5.4. Comparación entre las sobretensiones transitorias obtenidas en [52] y las de esta investigación, para una onda de corriente de 10 kA, 8/100 us.

Configuración: Supresores en los tres puntos	Entrada del servicio [V]	Tablero [V]	Carga [V]
Voltaje en V.	972 950*	451 439*	359 307*
Corriente en A.	9602 9000*	1110 697*	606 423*
Energía en J.	540 630*	60 61*	92 43*

* Valores obtenidos en [52].

$$1P.U. = 120\sqrt{2} = 169.705 \text{ Vpico.}$$

Los valores mostrados en la tabla 5.3 son sobrepuestos en la curva ITIC como se muestra en la figura 5.32.

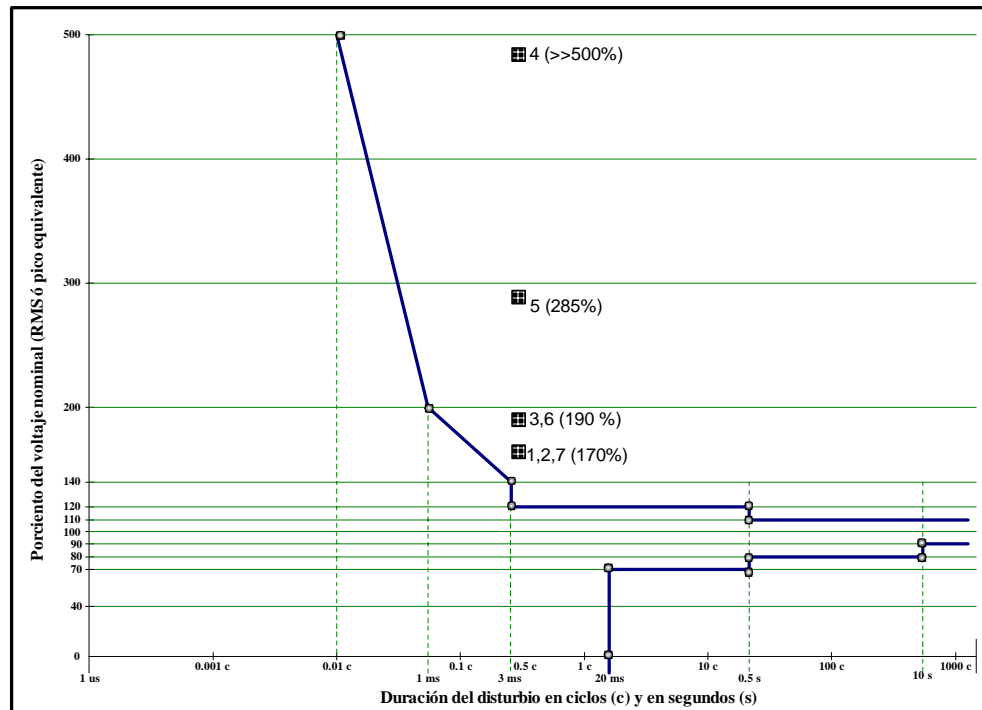


Figura 5.32. Porcentaje de sobretensión de cada una de las configuraciones indicadas en la tabla 5.3.

En la tabla 5.5 se presenta una comparación entre las características de los supresores para la configuración uno y las utilizadas por el autor en [52].

Tabla 5.5. Tabla comparativa de los varistores utilizados en esta investigación y los utilizados en [52].

Punto de instalación	Configuración figura 5.23.	Referencia [52]
Entrada del servicio	MOV de 40 mm., de diámetro, 250 V.	1 MOV de 40 mm., de diámetro, 250 V.*
Tablero	MOV de 20 mm., de diámetro, 150 V.	3 MOV's. de 20 mm., de diámetro, 150 V.**
Carga	MOV de 20 mm., de diámetro, 130 V.	3 MOV's. de 20 mm., de diámetro, 130 V.**

* Protección de fase a tierra.

** Protección entre fases, neutro y tierra.

5.7. Impedancia de aterrizamiento en función del tiempo y de la corriente.

Algunos autores mencionan el hecho de que el valor exacto de la impedancia de aterrizamiento está en función del tiempo y de la corriente [11], [14]. Por ejemplo, [32] propone un modelo que involucra la resistencia, la capacitancia y la inductancia.

5.8. El rol del aterrizamiento.

Con un aterrizamiento inadecuado, la descarga atmosférica que impacta sobre una línea de distribución somete al equipo a un posible daño debido a la elevación del potencial. Si el conductor de puesta a tierra cercano al punto de impacto de la descarga tiene un valor de impedancia alto, la mayor parte del transitorio fluirá sobre la línea, exponiendo al equipo a una posible sobretensión [4], [19], [30].

La resistencia de la puesta a tierra de las varillas ó electrodos de tierra se calculan en función de la corriente se según la expresión:

$$R = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_i}}} \quad \text{ecuación (5.1.)}$$

Donde

R_o = resistencia (a 60 Hz.) de la varilla de tierra en Ohms.

R = resistencia de puesta a tierra en Ohms.

I_i = intensidad de corriente para la cual se inicia la ionización en Amperes.

I = corriente de descarga a través de la conexión a tierra en Amperes.

La corriente límite para la cual se inicia la ionización esta función de la resistividad del terreno y se calcula como:

$$I_i = \frac{1}{2\pi} \frac{E_o \rho}{R_o^2} \quad \text{ecuación (5.2.)}$$

Donde

ρ es la resistividad del terreno en Ohms-metro [17].

E_o es el gradiente de ionización (300 kV/m) [19].

Cuando se instalan supresores de transitorios, algunos fabricantes recomiendan conectarlos a una tierra física con una resistencia máxima de 5 ohms. En la práctica este valor es difícil de lograr, pues la resistencia del sistema de tierra no depende únicamente del conductor de bajada y de la varilla de tierra; también depende de las uniones y de la resistividad del terreno. El correcto desempeño de los supresores depende de la impedancia del sistema de tierra, y si este parámetro es de un valor alto, la protección no será adecuada.

Paralelamente al desarrollo de los supresores de transitorios, los sistemas de tierra han sido más profundamente estudiados y perfeccionados. Actualmente se logran resistencias del sistema de tierra cercanas a un ohm, valor perfectamente aceptable para la instalación de supresores. La Norma Oficial Mexicana acepta un valor de resistencia de los sistemas de tierra de hasta de hasta 25 ohms [55], [56].

Los modelos de la resistencia de puesta a tierra de parámetros concentrados no lineales son utilizados para bajas frecuencias y magnitudes de corriente elevadas donde las dimensiones de los electrodos no son muy grandes y están ligadas al comportamiento de ionización del suelo. En la figura 5.33 se muestra la implementación en ATP/EMTP de las ecuaciones 5.1. y 5.2 proporcionando el valor de la resistencia controlada por TACS.

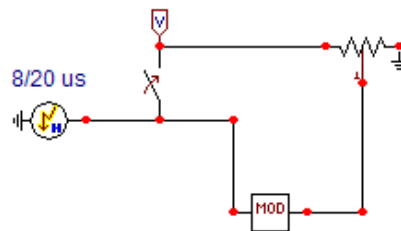


Figura 5.33. Implementación de un electrodo de puesta a tierra en ATP/EMTP.

En la figura 5.34 se muestra la forma de onda de corriente de 10 kA y de 8/20 us. de duración aplicada al electrodo de puesta a tierra indicada en la figura anterior.

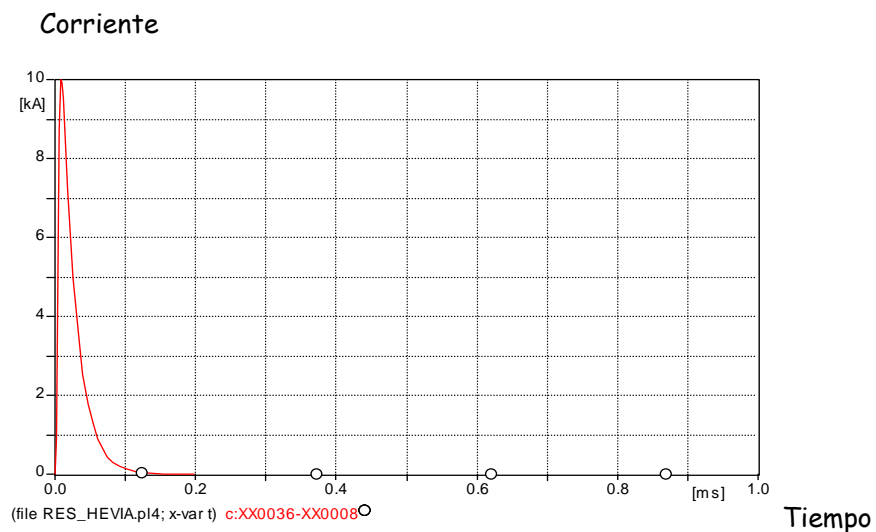


Figura 5.34. Onda de corriente de 10 kA@8/20 us, aplicada a la conexión a tierra.

En la figura 5.35 se muestra el perfil de la magnitud de la resistencia del electrodo de puesta a tierra.

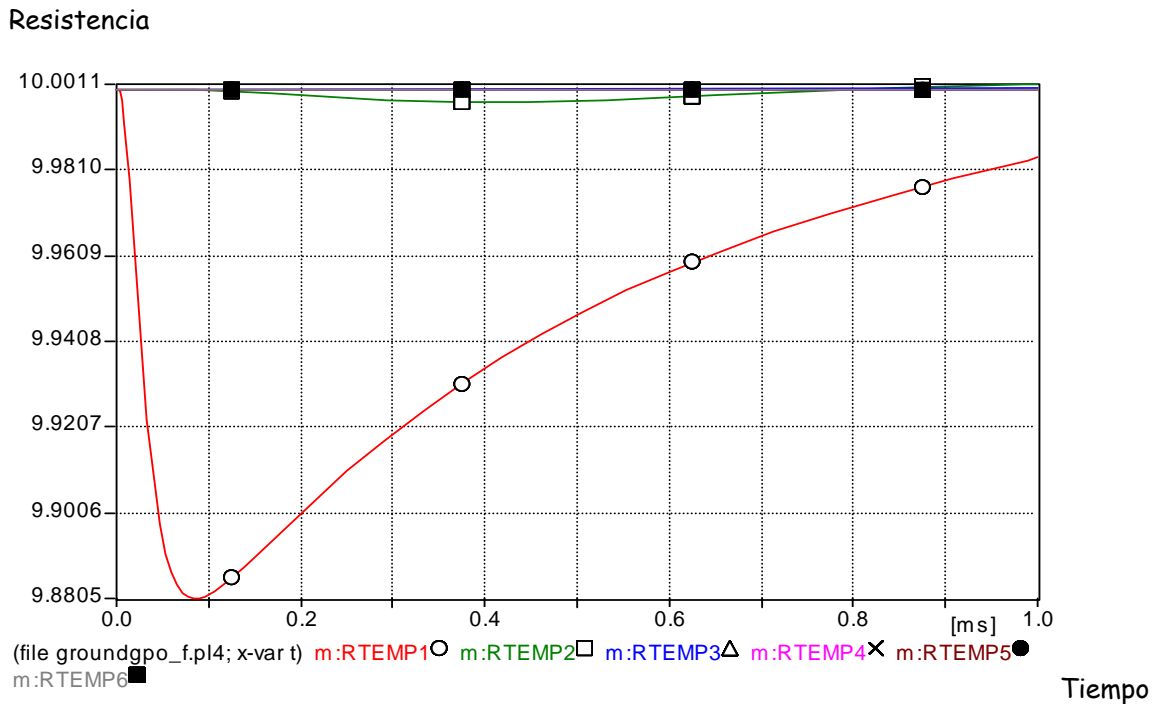


Figura 5.35. Comportamiento en el tiempo de la resistencia del electrodo de tierra, resistividad del terreno $30 \Omega\text{-m}$, $r_0=10 \text{ ohms}$, 300 kV/m. , 10 kA , $8/20 \text{ us}$.

Comportamiento resistivo del: 0-Primer elemento, □- Segundo elemento, △- Tercer elemento.

Los modelos de los electrodos de puesta a tierra de parámetros distribuidos no lineales son utilizados para altas frecuencias y magnitudes de corriente elevadas donde las dimensiones de los electrodos son grandes. Un ejemplo de ello es presentado en la figura 5.36. En esta figura se incluyen tres electrodos de puesta a tierra modelada con parámetros distribuidos no lineales, con un valor de resistencia a 60 Hz. diferente para cada una.

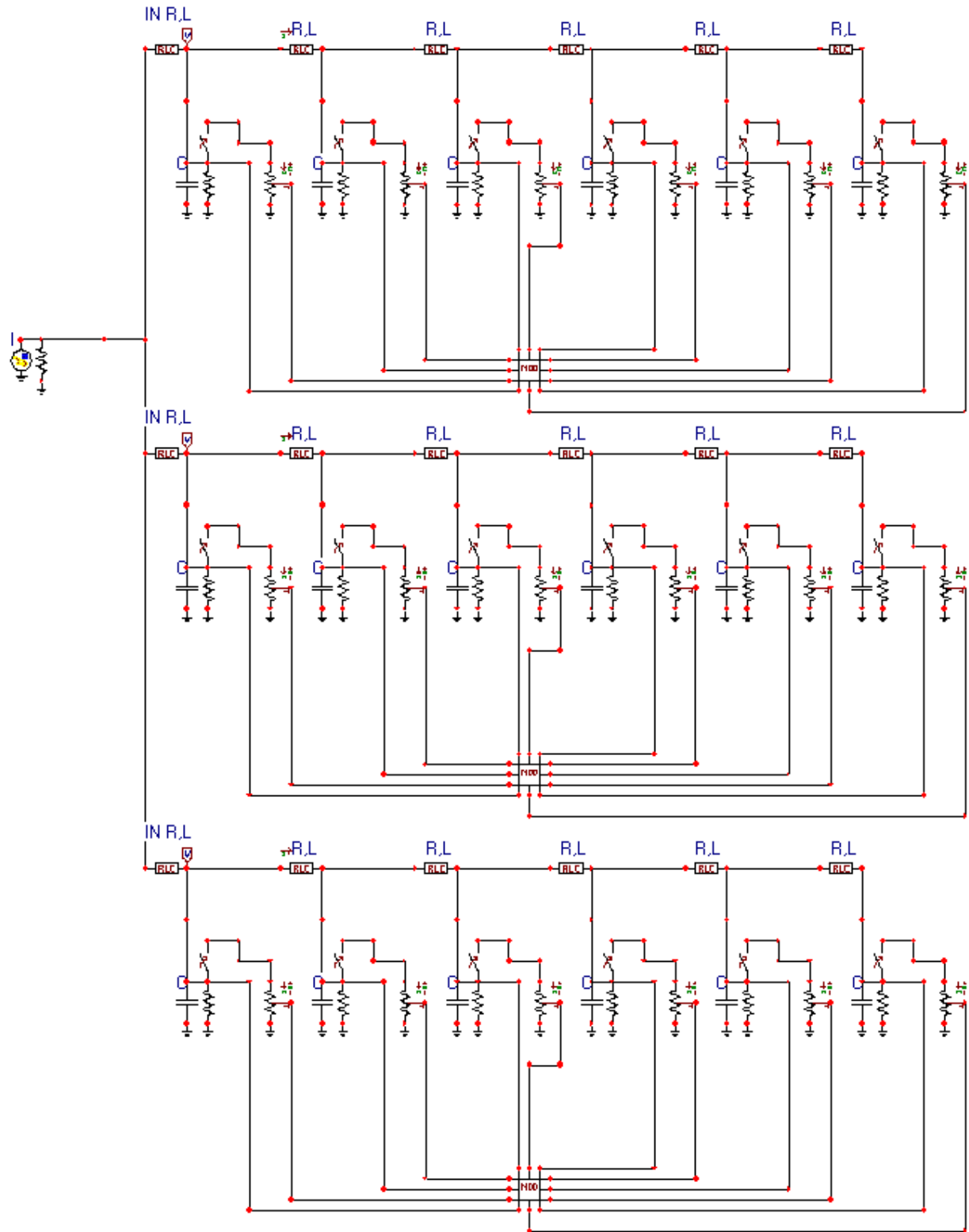


Figura 5.36. Arreglo de la conexión a tierra en ATPDRAW [15].

Las figuras 5.37 y 5.38 muestran los perfiles de voltaje y de corriente cuando se le aplica una onda de corriente de 500 A y de 8/20 μ s., de duración al conjunto de electrodos de la figura 5.36.

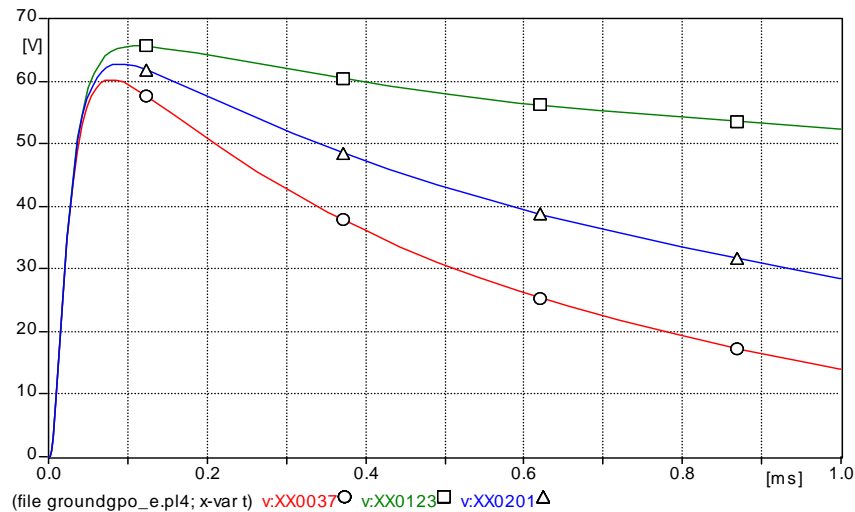


Figura 5.37. Perfil de la onda de voltaje para diferentes valores de resistencia a tierra, resistividad del terreno 30 ohms-m, $r_o=10 - \circ$, 157 - Δ y 20 - \square ohms, 300 kV/m., 500 A, 8/20 μ s.

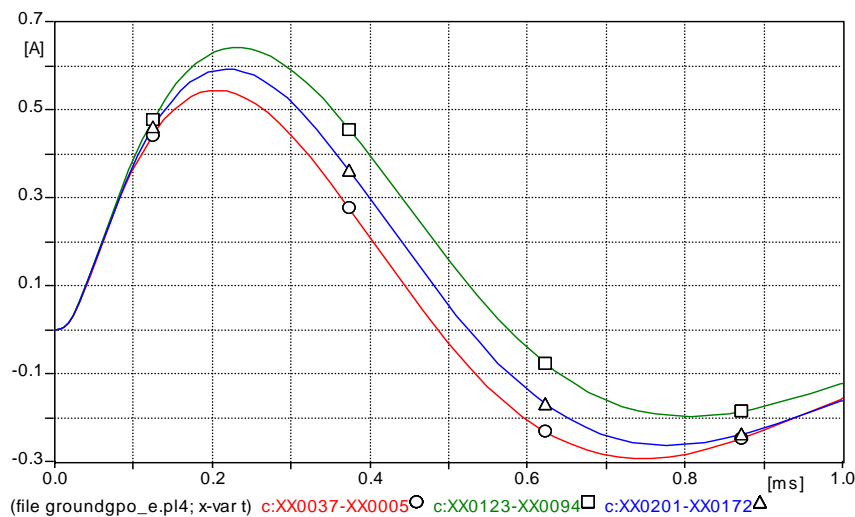


Figura 5.38. Perfil de la onda de corriente en el electrodo de tierra, resistividad del terreno 30 ohms-m, $r_o=10 - \circ$, 157 - Δ y 20 - \square ohms, 300 kV/m., 500 A, 8/20 μ s.

5.9. Análisis de resultados

Para el sistema analizado en el caso de estudio B, de la sección 5.6., cuando se instalan varistores de óxido metálico (MOV's.), las sobretensiones alcanzadas rebasan los límites permitidos en la curva ITIC [20], estos valores son mostrados en la figura 5.32. Esto último hace visible la necesidad de instalar una combinación de al menos dos dispositivos de supresión; por ejemplo, un tubo de descarga en gas y un varistor de óxido metálico, ya que un grupo de MOV's., no es suficiente para proteger al equipo sensible instalado en el punto de carga. Los valores obtenidos mostrados en la tabla 5.4., comparados con los de la referencia [52], muestran una diferencia en la magnitud de voltaje, corriente y energía; la diferencia que existe se debe a la configuración utilizada por el autor en [52] y la utilizada en esta investigación. Para la configuración de prueba con tres supresores instalados en los tres puntos, el autor en [52], presenta resultados para un varistor instalado en la entrada del servicio de 40 mm. de diámetro de 250 V.; en el tablero tres varistores de 20 mm. de diámetro de 150 V., y finalmente en la carga de tres varistores de 20 mm. de diámetro de 130 V., conectados de fase a neutro, de fase a tierra y de neutro a tierra. Es por ello, que los valores de las magnitudes de voltaje, corriente y de energía son mayores en la tabla 5.4., ya que en la presente investigación se modeló sólo un supresor en cada punto de la instalación. Aunque estos resultados difieren, son muy aproximados y permiten determinar si la capacidad de los dispositivos de supresión en el esquema de protección es adecuada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1. Conclusiones.

Se desarrollaron dos de los dispositivos de supresión contra sobretensiones transitorias, el varistor de óxido metálico y el tubo protector de descarga en gas y se introdujeron al ATP, se hicieron las corridas correspondientes y se obtuvieron resultados aceptables, lo que permite ahora disponer de una herramienta de aplicación y de una metodología de análisis para estudios de este tipo de transitorios orientados hacia el análisis de la calidad de la energía en usuarios de equipos sensibles.

Se demostró que el lenguaje de programación MODELS es una herramienta poderosa en el desarrollo de nuevos modelos, ya que relaciona la descripción y la documentación del modelo así como la verificación del funcionamiento del modelo completo.

También se demostró que la correcta operación de un dispositivo de protección parte de un adecuado sistema de conexión a tierra, siendo éste la base del sistema de protección.

6.2. Trabajos futuros.

Partiendo de la consideración de que existe una estrecha relación entre los equipos que se desean proteger y el costo de los dispositivos de protección es necesario aplicar sistemáticamente éste tipo de estudios para determinar la solución económica de las soluciones encontradas [41], específicamente en instalaciones industriales y comerciales.

Es necesario evaluar el comportamiento del sistema y de los dispositivos de protección mediante un método estadístico donde se refleje el efecto que tiene la variación de la pendiente del frente de la onda por el switcheo de bancos de capacitares y de las propias cargas dentro de la instalación en baja tensión [35], [68].

Aplicar la metodología a otros modelos de dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

6.3. Aportaciones.

1. Una metodología para el análisis de estudios transitorios en equipos sensibles.
2. El modelado en ATP/EMTP de dos dispositivos de supresión de sobretensiones transitorias: el varistor de óxido metálico y el tubo protector de descarga en gas, así como del electrodo de puesta a tierra utilizando el lenguaje de programación MODELS.

REFERENCIAS

- [1] F.A. Larmier, *Data circuit surge protection*, Citel America, Inc., Miami Lakes, Florida, 1990.
- [2] Cigre WG 33.02, *Guidelines for representation of network elements when calculating transients*, Technical Brochure 39, 1990.
- [3] Lisa M. Anderson, *The effects of power line disturbances on consumer electronic equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, no. 2, April 1990.
- [4] T.E. McDermott, V.J. Longo, *Advanced Computational Methods in Lightning Performance – The EPRI Lightning protection Design Workstation*, IEEE 2000
- [5] Larsson A., Tang H., Scuka V., *A gas discharge tube module based on discharge Physics for use in ATP-EMTP simulations*, EEUG News, November 1995.
- [6] Dubé L., Bonfanti I., *MODELS: A new simulation tool in the EMTP*, ETEP vol. 2, no. 1, January/February 1992.
- [7] Tseng K.J. and Wang Y., *Dynamic electric arc model for electronic circuit simulation*, ELECTRONIC LETTERS, vol. 32, 11th April, 1996.
- [8] Larsson A., *A low voltage varistor module for use within ATP-EMTP simulations*, EEUG News, November, 1997.
- [9] Larsson A., Scuka V., Borgeest K., Haseborg J. L., *Numerical simulation of gas discharge protectors – A review*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, no. 2, April 1999.
- [10] Larsson A., Tang H., Scuka V., *Numerical simulation of transient protector coordination*, ETEP, vol. 9, no. 1, January/February 1999.
- [11] Lorentzou M.I., *Overview of grounding electrode models and their representation in digital simulations*, IPST New Orleans, USA, 2003.
- [12] Holzer M., Zapsky W., *Modeling varistors with PSpice: Simulation beats trial and error*, Siemens Matsushita Components.
- [13] Cigre WG 13.01, *Applications of black box modeling to circuits breaker*, Electra, no. 149, August 1993.

-
- [14] Mansoor A., Martzloff F., *The effect of the neutral earthing practices on lightning current dispersion in a low voltage installation*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, no. 3, July 1998.
- [15] Teiga F. J., De Ressurreiçao M., De Oliveira F., Sepúlveda A., *Aplicação do EMTP-ATP ao estudo comportamental dos electrodos de terra em sistemas eléctricos de energia – Utilização de diversos modelos bibliográficos*.
- [16] Martinez J.A., *The ATP package. An environment for power quality analysis*, IEEE 2001.
- [17] T. Mata C., I. Fernandez M., A. Harkov V., *EMTP modeling of a triggered – lightning strike to the phase conductor of an overhead distribution line*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, no. 4, October 2000.
- [18] Cumbria N., DeRegt M., Rao N.D., *Effects of power disturbances on sensitive loads*, Proceedings of the 1999 IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering Shaw conference center, Edmonton, Alberta, Canada, May 9-12 1999.
- [19] Hevia O., *Programa para generar datos de resistencia de pie de torre*, Grupo de Investigación de Sistemas Eléctricos de Potencia.
- [20] *ITIC (CBEMA) Curve application note*, <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>.
- [21] Larsson A., Tang H., Scuka V., *Mathematical simulation of a gas discharge protector using ATP-EMTP.*, EMC International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Roma, 1996.
- [22] Larsson A., Tang H., Scuka V., Högberg R., *Simulation of transient protector co-ordination in a low voltage power installation network using ATP-EMTP*, EMC International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Roma, 1996.
- [23] Carpenter Roy B. Jr., Tu Y., *The secondary effects of lightning activity*, Lightning Eliminators and Consultants, Inc., Boulder, Colorado, U.S.A.
- [24] W. Durbak., Daniel, *Surge arrester modeling*, IEEE 2001.
- [25] R. Sverko, Elvis, *A performance look at UL 1449 standard for transient voltage suppressors second edition*, ERCO, Inc. Facility Electrical Protection, U.S.A., February 15, 1999.

- [26] Beach, W., *How to select the best value transient voltage surge suppressor for your equipment*, ERCO, Inc. Facility Electrical Protection, U.S.A.
- [27] Paul, D., *Low voltage power systems surge overvoltage protection*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, January/February 2001.
- [28] *Calidad del suministro eléctrico*,
http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/CEE/articulos/1_PQ.pdf
- [29] CHEN, Q., HE, J., ZHOU, W., SU, Q., *Overvoltage protection for computer serial communication*, IEEE 2000.
- [30] Imece, A. F., W. Durback D., et al., *Modeling guidelines for fast front transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, no. 1, January 1996.
- [31] Oliver, J.A., Lawrence R., Basubed Ben Banergee, *How to specify power quality tolerant process equipment*, IEEE 2000.
- [32] Rakotomalala A. and Cegely A., Rousseau A., *Lightning distribution through earthing systems*, IEEE 1994.
- [33] Goedde G.L., Kojovic Lj. A., Woodworth J.J., *Surge arresters characteristics that provide reliable overvoltage protection in distribution and low voltage systems*, IEEE 2000.
- [34] Pereira M. P., Claudio S. Fonseca, Dourival S. Carvalho, Dubé L., *Análise transitória de sistemas de controle e modelagem de sistemas nao convencionais no Programa ATP*, Informe técnico apresentado no XIII SNPTEE, Camboriú, Brasil, 1995.
- [35] Sakis M., A.P., Jalali S., Henneberry S., Cokkinides G. J., *Power quality assessment via physically based statical simulation method.*, IEEE 2000.
- [36] Standler, R. B., *Protection of electronic circuits from overvoltages*, A Wiley Interscience publication, Jhon Willey & Sons, Inc., U.S.A., 1989.
- [37] *UL Standard for safety for transient voltage surge suppressors*, UL 1449, Second Edition, August 15, 1999.
- [38] Waggoner R. M., *Practical guide to quality power for sensitive electronic equipment*, 2nd edition, EC&M Book, Intertec Publishing Corporation, Overland Park, Kansas, 1997.

-
- [39] Kazibwe Wilson E. and Sendaula Musoke H., *Electric power quality control techniques*, Van Nostrand Reinhold ED., New York 1993.
- [40] Standler R. B., *Transmission line models for coordination of surge protective devices*, IEEE 1993.
- [41] *A low cost Insurance Policy*, Consulting Specifying Engineer, June 2002.
- [42] Dugan, Roger C., *Electrical Power Systems Quality*, McGraw Hill, U.S.A., 1996.
- [43] IEEE Std. 1100-1992, *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Equipment*.
- [44] Greenwood, Alan. *Electrical Transient in Power Systems*, New York, John Wiley & Sons, 1971.
- [45] IEEE Std. C62.45-1992, *IEEE Guide on Surge Testing for Equipment connected to low voltage AC Power Circuits*.
- [46] IEEE Std. C62.22-1997, *IEEE Guide for the application of metal oxide surge arresters for Alternating Current Systems*.
- [47] IEEE Std. C62.41-1991, *IEEE recommended Practice on Surge Voltage in low voltage AC power Circuits*.
- [48] IEEE Std. C62.48-1995, *IEEE Guide on Interactions between Power Systems Disturbances and surge protective devices*.
- [49] IEEE Std. C62.42-1992, *IEEE Guide for the Application of Gas tube and Air Gaps arrester low voltage (equal to or less than 1000 Vrms o 1200 Vdc.) surge protective devices*.
- [50] IEEE Std. C62.33-1982, *IEEE Standard test specifications for varistor surge protective devices*.
- [51] IEEE Std. C62.11-1993, *IEEE Standard for Metal Oxide surge arresters for alternating current power circuits*.
- [52] Stringfellow, Michel F., *Coordination of surge suppressors in low voltage AC power circuits*, IEEE, 1991. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 1991.

- [53] Rousseau A. and Hunt a., *Safe coordination between power and communication surge protection*, Erico Inc., France and Telecom Protection Technologies Ltd. UK.
- [54] Hileman, Andrew R., *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Dekker, Inc, New York, 1999.
- [55] García Hernández José M y Torres Bribiesca Marco A., *Protección de equipos electrónicos contra descargas atmosféricas*, <http://omega2.inin.mx/publicaciones/documentospdf/protecci%c3%93n.pdf>
- [56] NOM-001-SEDE-1999, *Norma Oficial Mexicana-Instalaciones Eléctricas*.
- [57] Short Tom A., *Electric Power Distribution Handbook*, CRC Press LLC, New York, 2004.
- [58] IEEE Std. C62.1-1989, *IEEE Standard for gapped silicon carbide surge arresters for ac power circuits*.
- [59] Hey John C. And Kram William P., *Transient Voltage Suppression manual*, General Electric, 2nd. Ed., U.S.A., 1978.
- [60] Enríquez Harper G., *El ABC de protección de las instalaciones eléctricas contra los transitorios electromagnéticos, Parte I: El efecto del rayo*, U.I.E.-C.F.E., E.S.I.M.E.-I.P.N., México.
- [61] Enríquez Harper G., *El ABC de protección de las instalaciones eléctricas contra los transitorios electromagnéticos, Parte II: Protección contra sobretensiones*, U.I.E.-C.F.E., E.S.I.M.E.-I.P.N., México.
- [62] *Filtros supresores*, <http://www.monografias.com/trabajos3/sais/sais.shtml>
- [63] *Transient Symtoms*, <http://cipco.apogee.net/pq/qrbtdef.asp>
- [64] Martinez Juan A., *Catálogo de aplicaciones del ATP*, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [65] Martinez Juan A., *The ATP package. An environment for power quality analysis*, IEEE Barcelona, Spain, 2000.
- [66] Long W., et. al., *EMTP a power tool for analyzing power system transients*, IEEE Computer applications in power, 1990.
- [67] *Productos de distribución y control*, Schneider Electric, S.A., Francia, Mayo 2005.

- [68] Nucci Carlo A., *Mini-Tutorial: Advanced Computational Methods in Lightning Performance*, IEEE 2000.
- [69] Ocón Valdez R., Cancino Quiroz A., *Desarrollo Histórico y Estado del Arte del Análisis de respuesta en frecuencia (FRA) en Transformadores de Potencia*, RVP.AI/2005-TRO-12.
- [70] <http://www.siemens.com>
- [71] V. Venegas R., et al., *Modelado de transformadores para el cálculo de la distribución de sobretensiones transitorias*, RVP.AI/2005-TRO-14.
- [72] Durban Marcus O., *A Performance evaluation of Transient Voltage Surge Suppression designs*, IEEE Industry Applications Magazine, Sept/Oct. 2002, www.ieee.org/ias.
- [73] *CRITEC Surge Protection Products Catalog*, ERICO 2003.
- [74] Høidalen H.K. and Prikler L., *ATPDRAW, version 3.5 for Windows, 9x/NT/2000/XP, Users' Manual*, October 2002.
- [75] H.W. Dommel, *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [76] Lauren Dube, *MODELS in ATP, Language manual*, February 1996.
- [77] H.W. Dommel, *ATP-EMTP Rule Book*, Canadian-American EMTP Users Group, 1997.
- [78] IEEE Std. 446-1987, *Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*.
- [79] *Technical Note*, www.ericom.com.
- [80] *Transient Suppression Devices and Principles*, http://www.littelfuse.com/data/en/Application_Notes/an9768.pdf.
- [81] *Combining GDTs and MOVs for surge Protections of AC Power Lines*, http://www.littelfuse.com/data/en/Application_Notes/EC640.pdf.
- [82] Gilberto Enríquez Harper, *Notas sobre transitorios electromagnéticos*, S.E.P.I.-E.S.I.M.E., I.P.N.

Apéndice A

DESCRIPCIÓN BREVE DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN MODELS

A.1. Introducción.

MODELS es un programa de simulación con una interfase a EMTP. Permite la descripción de componentes que no son fácilmente representados usando únicamente los elementos eléctricos de EMTP y el conjunto de bloques de control disponibles en TACS [34], [76].

El desarrollo del lenguaje de MODELS y su método de solución asociado fue establecido en 1985 por Laurent Dubé, el autor de TACS. Aunque MODELS ha sido identificado originalmente como "los nuevos TACS", es aparente que no reemplaza a TACS. MODELS proporciona una alternativa para la representación y simulación de nuevos componentes y de sistemas de control en el EMTP.

A.2. Simulación en el EMTP.

Un sistema eléctrico es realizado en EMTP como una red de componentes individuales (ramas R-L-C, líneas de transmisión, etc.). Cada componente describe la relación entre los valores de voltaje y corriente presentes en sus terminales durante un tiempo de simulación. Aunque los componentes son descritos de manera separada uno de otro, los valores de voltaje y corriente en las terminales de los componentes son determinados simultáneamente en instantes sucesivos de la simulación.

Las variaciones en la operación del sistema son representadas por la variación en la topología del circuito (usando la apertura y cierre de interruptores y la activación o desactivación de fuentes), o por variaciones en la función de operación de ciertos componentes (usando fuentes de voltaje y corriente variables y funciones de impedancia variable). Los tipos de variaciones con esos componentes son fijos y pre-programados; sólo sus parámetros son determinados por el usuario.

La adición del control dinámico al EMTP (usando TACS o MODELS) da al usuario la posibilidad de especificar variaciones en la operación de los componentes eléctricos del sistema de acuerdo a reglas arbitrarias. Las variaciones (apertura/cierre de interruptores, valores de operación de fuentes, control de máquinas, y valores de elementos no lineales) son determinadas mediante circuitos de control (en TACS) o algoritmos (en MODELS), los cuales son hechos dependientes de los valores de voltaje, de corriente y del estado de interruptores y máquinas en el sistema eléctrico durante la simulación.

A.3. Simulación en el EMTP con MODELS.

En MODELS, todos los aspectos de la representación, solución, e inicialización del componente modelado o del sistema de control son completamente bajo control del usuario.

El usuario representa de manera explícita cualquier sistema eléctrico, desarrollando el algoritmo que describe su operación. Esto hace posible especificar como los componentes o subsistemas están interrelacionados, y como la estructura de esta composición por si misma varía durante la operación del sistema.

El sistema se define mediante un conjunto de variables lógicas y numéricas, funciones, sub-models, y algoritmos los cuales adquieren su valor durante la simulación de la operación del sistema, con la posibilidad explícita de establecer las condiciones que regulan tanto la asignación de dichos valores como la secuencia del procedimiento.

La iniciación de un sistema y de sus subsistemas también se especifica por medio de algoritmos completos (variables, condiciones, etc.), permitiendo al usuario construir procedimientos que definen el estado del sistema antes del comienzo de la simulación con una historia detallada.

A.4. Instrucciones principales en MODELS.

BEGIN NEW DATA CASE

Instrucciones iniciales en ATP

Instrucciones Opcionales

Instrucciones Misceláneas

MODELS

Instrucciones iniciales en MODELS

MODEL

Instrucciones del grupo MODEL

ENDMODEL

USE

Instrucciones del grupo USE

ENDUSE

RECORD

Instrucciones del grupo RECORD

ENDMODELS

A.5. Estructura.

MODELS proporciona un mecanismo de fácil estructuración del sistema en sub-componentes separados. Esto permite desacoplar cada sub-función con nombramientos locales internos, para fácil construcción, prueba, modificación, y uso.

A.6. Representación.

Adicionalmente a la aproximación del diagrama de bloques de TACS, MODELS acepta la descripción de componentes en términos de procedimiento, funciones y algoritmos. El usuario no está limitado a un conjunto pre-definido de componentes, ya que tiene la ventaja de construir librerías de componentes y sub-models como lo requiera cada aplicación. Similarmente, el usuario no está limitado a la representación de una señal de flujo de entrada y salida, porque tiene la ventaja de combinar esto con manipulaciones lógicas y numéricas de variables dentro del algoritmo simbólico.

A.7. Instrucciones del grupo MODELS.

Una clara distinción es hecha en MODELS entre la descripción de un modelo y su uso. La descripción contiene una parte de declaración (especificación de entradas, variables, sub-models) y una parte de la ejecución define como opera el modelo. Una vez que el modelo ha sido declarado, este es usado tantas veces como sea requerido, cada simulación tiene su propio conjunto de entradas, su propio historial, y aún su propio paso de integración. Además, se tiene la opción de aplicación del mecanismo "use" de MODELS para modelos escritos en un lenguaje diferente (por ejemplo Fortran, C,...).

A.8. Autodiagnóstico.

El autodiagnóstico es importante especialmente cuando grandes modelos son establecidos, dibujados, y sintonizados. La detección del problema es construida dentro del modelo por el usuario. Warnings (avisos de advertencia) y otras observaciones son almacenadas durante la simulación para posteriores análisis.

A.9. Herramientas.

Hay herramientas explícitas para facilitar la construcción de un modelo. El lenguaje es de alto nivel y describe la operación de modelos de una manera muy cercana a la pensada por el usuario. Esto permite al usuario, junto con el formato de reglas, concentrarse en la lógica del modelo. Hay herramientas para definir la lógica del flujo de operaciones (IF, WHILE, FOR,...) y para expresiones matemáticas no triviales usando ecuaciones diferenciales (DIFFEQ), integrales (INTEGRAL), polinomiales y derivativas (DERIVPOL), funciones de Laplace (LAPLACE) junto con muchas otras.

A.10. Arreglos.

Junto con muchas herramientas disponibles en MODELS, existe la posibilidad del manejo de variables por arreglos, evitando la repetición del mismo procedimiento aplicado a "n" variables de interés. Un caso típico es un componente eléctrico fácilmente representado en una forma compacta y fácil de leer.

A.11. Reglas de formato.

Opuesto a TACS, MODELS no depende de códigos de identificación, formatos de columnas fijas y reglas de descripción crípticas para la representación individual de los componentes y su interconexión, lo cual facilita su lectura y entendimiento. Sólo son necesarias pocas palabras clave y un grupo de funciones (INPUT, OUTPUT, VAR, DAT,...). El formato libre de la descripción y la posibilidad de usar nombres largos facilita la documentación. Comentarios e ilustraciones son introducidos en la descripción del modelo por una clara documentación.

A.12. Uso de MODELS en el EMTP.

La interacción entre MODELS y EMTP es idéntica a la interacción entre TACS y el sistema eléctrico en todos los aspectos. Cualquiera de las cantidades observadas en el EMTP por TACS, si se requiere, es usada como entradas a MODELS (nodos de voltaje, interruptores de corriente, estado de los interruptores, variables de las máquinas). Cualquier variable de salida de MODELS si se requiere, es usada en el EMTP de la misma manera que en TACS, para el control de las fuentes de voltaje y corriente, la operación de interruptores, la operación de máquinas, y en la versión de ATP, el control de elementos no lineales. Finalmente, cualquier variable en MODELS es almacenada e impresa en el EMTP, cuando es declarada en RECORD en MODELS.

A.13. Estructura del lenguaje MODELS.

El código del archivo es al mismo tiempo la descripción del modelo.

MODELS es un lenguaje estructurado, que requiere de un código para ser preparado de acuerdo a las reglas de grupo en el archivo.

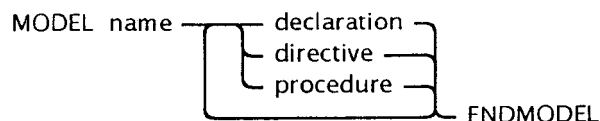
Los archivos MODELS son codificados en un formato libre, lo cual permite al usuario leer fácilmente el archivo. Palabras clave, declaraciones, directivas, nombres de funciones que el usuario identifica fácilmente de su estado.

A.14. Principales grupos en MODELS.

La sección MODELS del archivo de ATP-EMTP debe tener al menos tres grupos: MODELS, MODEL y USE. La palabra MODELS inicia la parte del archivo. Los grupos MODEL y USE son terminados por las palabras ENDMODEL y ENDUSE respectivamente. Después de ENDUSE un grupo encabezado por la palabra RECORD es insertado con el propósito de graficar las variables. El archivo MODELS es terminado con la palabra ENDMODELS.

A.15. Definición de MODEL.

Un model escrito en el lenguaje MODELS incluye declaraciones, directivas de simulación, y procedimientos de operación. La sintaxis usada para la definición de un model es la siguiente:



MODEL (nombre del modelo)

-- comentarios

DATA

-- definición de las variables

-- valores de entrada

CONST

-- definición de las variables

-- valores de entrada

HISTORY

-- definición de las variables

-- valores de entrada

DELAY CELLS

-- definición de las variables

-- valores de entrada

VAR

-- definición de las variables

-- valores de entrada

INIT

-- definición de las variables

-- valores de entrada

ENDINIT

-- comentarios

EXEC

-- definición del algoritmo del componente

ENDEXEC

ENDMODEL

A.16. Declaraciones.

CONST especifica el nombre, longitud del arreglo, y valor de las constantes del modelo (valores de las constantes asignadas de manera interna);

DATA especifica el nombre, longitud del arreglo, y el valor opcional default de los datos de los parámetros del model (valores de las constantes asignadas de manera externa);

VAR especifica el nombre y longitud de del arreglo de las variables del model (valores de las variables asignadas de manera interna);

INPUT especifica el nombre, longitud del arreglo, y el valor opcional default de los valores de entrada del model (valores de las variables asignadas de manera externa);

OUTPUT especifica cual de los elementos del model es usado como salidas del model;

FUNCTION especifica la descripción de las funciones usadas en el Medel;

MODEL especifica la descripción del sub-model usado en el model.

A.17. Directivas de simulación.

TIMESTEP especifica el valor opcional default de los límites del mínimo y máximo paso de simulación para el model;

INTERPOLATION especifica el grado de interpolación aplicado a las entradas del model si este es utilizado con pasos intermedios al paso de simulación externo;

DELAY especifica el tamaño default del valor almacenado asociado con el retardo de tiempo (función en el model);

HISTORY especifica el nombre de las variables del model para las cuales una función de historial debe ser definida cuando se está usando el model; son usadas de manera opcional para asignar funciones de historial a cualquiera de las variables de entrada del model;

EXEC describe la ejecución del algoritmo del model;

INIT describe la iniciación del algoritmo del model.

Apéndice B

PARÁMETROS DE VARISTORES DE ÓXIDO METÁLICO [70].

A continuación se presenta la nomenclatura y los valores de los parámetros de los varistores utilizados en la investigación.

S XX K YY

S Serie estándar, varistor de óxido de zinc en forma de disco.

XX Diámetro del varistor.

K Tolerancia, $\pm 10\%$.

YY Voltaje máximo de operación continua.

B.1. PARÁMETROS DE LA SERIE S10K75, 95, 115, 130, 140, 150 Y 175.

S10K75

C=720pF L=12.0nH B1=2.1710704 B2=0.0281334 B3=-0.0005233

B4=0.0113985

S10K95

C=530pF L=12.0nH B1=2.2729921 B2=0.0295867 B3=-0.0005049

B4=0.0096611

S10K115

C=445pF L=12.0nH B1=2.3592175 B2=0.0320133 B3=-0.0005068
B4=0.0083473

S10K130

C=400pF L=12.0nH B1=2.4114817 B2=0.0305728 B3=-0.0005263
B4=0.0085723

S10K140

C=370pF L=12.0nH B1=2.4375254 B2=0.0284444 B3=-0.0005790
B4=0.0088050

S10K150

C=350pF L=12.0nH B1=2.4781404 B2=0.0296020 B3=-0.0005610
B4=0.0086033

S10K175

C=300pF L=12.0nH B1=2.5357266 B2=0.0313843 B3=-0.0005399
B4=0.0079626

B.2. PARÁMETROS DE LA SERIE S14K140, 150 Y 175.

S14K140

C=610pF L=12.0nH B1=2.4354614 B2=0.0275140 B3=-0.0005581
B4=0.0061743

S14K150

C=570pF L=12.0nH B1=2.4765367 B2=0.0288457 B3=-0.0005453
B4=0.0054718

S14K175

C=490pF L=12.0nH B1=2.5347728 B2=0.0312601 B3=-0.0004695
B4=0.0050557

B.3. PARÁMETROS DE LA SERIE S18K140, 150 Y 175.

S18K140

C=1210pF L=12.0nH B1=2.4282100 B2=0.0250687 B3=-0.0005805
B4=0.0051624

S18K150 TOL=0

X1 1 2 SIOV T={1+TOL/100} C=1130pF L=12.0nH B1=2.4649784 B2=0.0245109
B3=-0.0005757 B4=0.0053951

S18K175

C=980pF L=12.0nH B1=2.5240211 B2=0.0268731 B3=-0.0005917
B4=0.0050225

B.4. PARÁMETROS DE LA SERIE S20K130, 140, 150 Y 175.

S20K130

C=1340pF L=13.0nH B1=2.4011200 B2=0.0253150 B3=-0.0005975
B4=0.0051090

S20K140

C=1240pF L=13.0nH B1=2.4280498 B2=0.0250040 B3=-0.0005812
B4=0.0051925

S20K150

C=1160pF L=13.0nH B1=2.4654363 B2=0.0246959 B3=-0.0005738
B4=0.0053090

S20K175

C=1000pF L=13.0nH B1=2.5243725 B2=0.0270150 B3=-0.0005903
B4=0.0049564

B.5. PARÁMETROS DE LA SERIE B40K250.

B40K250

C=2900pF L=19.0nH B1=2.6729928 B2=0.0244592 B3=-0.0003903
B4=0.0032354

Apéndice C

LISTADO DE LOS PROGRAMAS REALIZADOS EN EMTF.

C.1. Programa que simula el comportamiento del protector de descarga en gas CGZ/230 VL.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW mayo, lunes 30, 2005
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C Programado por Ernesto Meléndez Meléndez
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
   5.E-8   .0004
   500     1     1     1     1     0     0     1     0
MODELS
/MODELS
INPUT
  IX0001 {i(XX0008)}
  IX0002 {switch(XX0008)}
  IX0003 {v(XX0007)}
OUTPUT
  XX0003
  XX0006
MODEL arcol
comment *****
*
*   Función: representa el comportamiento de la conductancia de arco
*
*               del protector de descarga en gas
*
***** endcomment
INPUT
  crrent
  status
OUTPUT
  arcres
DATA
  power   {DFLT:30.}
  imax    {DFLT:4.8}

```

```

    tau      {DFLT:5.E-6}
CONST
    minconduc {VAL:1.E-7}
VAR
    conductance
    arcres
    driving
    i
TIMESTEP MAX: tau/8
EXEC
    i:=crrrent
    IF status=closed THEN
        write(' status = ',status)
        driving:=imax**2/power
        write(' driving = ',driving)
        DIFFEQ( 1.0|D0 + tau|D1 )|conductance:=driving
        write(' conductance = ',conductance)
        arcres:=recip(conductance)
    else
        write(' status = ',status)
        conductance:=minconduc
        write(' conductance = ',conductance)
        arcres:=recip(minconduc)
    ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL retime
comment *****
*
*   Función: establece el tiempo de retardo para accionar al interruptor
*
***** endcomment
INPUT
    UP
    UN
OUTPUT
    CLOSE
DATA
    U0      {DFLT:230.}
    S       {DFLT:1.}
VAR
    CLOSE
    U
    TD
INIT
    CLOSE:=0
    TD:=10**(1.283-0.82*LOG10(S*1E3))
ENDINIT
EXEC
    U:=-ABS(UP-UN)
    IF (U>U0) AND T>TD THEN
        CLOSE:=1
    ENDIF

```



```
XX0010 .001
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
13XX0010XX0008
XX0006 0
XX0015XX0007 -1. 1.
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART ><
TSTOP >
/INITIAL
2XX0049 2.E3
3XX0049 2.E3
/OUTPUT
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

C.2. Programa que simula el comportamiento del supresor SIOV.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW mayo, lunes 30, 2005
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C Programado por Ernesto Meléndez Meléndez
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
   1.E-6   .0005
   500     1     1     1     1     0     0     1     0
MODELS
/MODELS
INPUT
  IX0001 {i(XX0049)}
  IX0002 {i(XX0061)}
OUTPUT
  XX0053
  XX0065
MODEL siov
comment *****
*
*   Función: valor de la resistencia variable del elemento no lineal
*
***** endcomment
INPUT
  i
OUTPUT rsiov
DATA B1,B2,B3,B4
VAR rsiov,u
history
rsiov
init
rsiov:=0
u:=500
endinit
EXEC
  if (i>0) then
    u:=10**((B1+B2*log10(i)+B3*exp(-log10(i))+B4*exp(log10(i))))
    rsiov:=u*recip(i)
  endif
ENDEXEC
ENDMODEL
USE siov AS siov
INPUT
  i:= IX0001
DATA
  B1:= 2.272992
  B2:= 0.029587
  B3:= 5.049E-4

```

```

    B4:= 0.009661
OUTPUT
    XX0053:=rsiov
ENDUSE
USE siov AS siov
INPUT
    i:= IX0002
DATA
    B1:= 2.272992
    B2:= 0.029587
    B3:= 5.049E-4
    B4:= 0.009661
OUTPUT
    XX0065:=rsiov
ENDUSE
RECORD
    siov.rsiov AS rsiov
    siov.u AS u
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
67890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
XX0001      20.
0
XX0004      50.
0
XX0007XX0004      15.
0
XX0007      .2
0
XX0011XX0007      25.
0
XX0011      1.E7
0
91XX0049      TACS  XX0053
3
XX0011XX0024      .0001
0
XX0024XX0021      1.2E-5
0
XX0049      .00053
0
91XX0061XX0075TACS  XX0065
2
XX0073XX0039      .0001
0
XX0039XX0036      1.2E-5
0
XX0061      .00053
0

```

```
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  XX0001XX0004          1.
0
  XX0021XX0049        -1.    1.
1
  XX0036XX0061        -1.    1.
1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART ><
TSTOP >
/INITIAL
  2XX0001          2050.
  3XX0001          2050.
/OUTPUT
  XX0011XX0001
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```


C.3. Programa que simula el comportamiento del tubo de descarga en gas y del supresor de sobretensiones transitorias TVSS en un arreglo en cascada.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW mayo, lunes 30, 2005
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C. Programado por Ernesto Meléndez Meléndez
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  5.E-9 .0004
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
MODELS
/MODELS
INPUT
  IX0001 {i(XX0008)}
  IX0002 {switch(XX0008)}
  IX0003 {v(XX0007)}
  IX0005 {i(XX0105)}
OUTPUT
  XX0003
  XX0006
  XX0109
MODEL arcol
comment *****
*
*
*   Función: representa el comportamiento de la conductancia de arco
*
*               del protector de descarga en gas
*
***** endcomment
INPUT
  crrent
  status
OUTPUT
  arcres
DATA
  power {DFLT:30.}
  imax  {DFLT:4.8}
  tau   {DFLT:5.E-6}
CONST
  minconduc {VAL:1.E-7}
VAR
  conductance
  arcres
  driving
  i
TIMESTEP MAX: tau/8

```

```

EXEC
  i:=crrrent
  IF status=closed THEN
    write(' status = ',status)
    driving:=imax**2/power
    write(' driving = ',driving)
    DIFFEQ( 1.0|D0 + tau|D1 )|conductance:=driving
    write(' conductance = 'conductance)
    arcres:=recip(conductance)
  else
    write(' status = ',status)
    conductance:=minconduc
    write(' conductance = ',conductance)
    arcres:=recip(minconduc)
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL retime
comment *****
*
*
*   Función: establece el tiempo de retardo para operar al interruptor
*
*
***** endcomment
INPUT
  UP
  UN
OUTPUT
  CLOSE
DATA
  U0      {DFLT:230.}
  S       {DFLT:1.}
VAR
  CLOSE
  U
  TD
INIT
  CLOSE:=0
  TD:=10**(1.283-0.82*LOG10(S*1E3))
ENDINIT
EXEC
  U:=ABS(UP-UN)
  IF (U>U0) AND T>TD THEN
    CLOSE:=1
  ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL siov
comment *****
*
*
*   Función: valor de la resistencia variable del elemento no lineal
*
*

```

```

***** endcomment
INPUT
  i
OUTPUT rsiov
DATA B1,B2,B3,B4
VAR rsiov,u
history
rsiov
init
rsiov:=0
u:=500
endinit
EXEC
  if (i>0) then
    u:=10**(B1+B2*log10(i)+B3*exp(-log10(i))+B4*exp(log10(i)))
    rsiov:=u*recip(i)
  endif
ENDEXEC
ENDMODEL
USE arcol AS ARCOL
INPUT
  crrent:= IX0001
  status:= IX0002
DATA
  power:=      30.
  imax:=       4.8
  tau:=        5.E-7
OUTPUT
  XX0003:=arcres
ENDUSE
USE retime AS RETIME
INPUT
  UP:= IX0003
  UN:= 0.0
DATA
  U0:=      10.
  S:=      1.2E5
OUTPUT
  XX0006:=CLOSE
ENDUSE
USE siov AS siov
INPUT
  i:= IX0005
DATA
  B1:= 2.272992
  B2:= 0.029587
  B3:= 5.049E-4
  B4:= 0.009661
OUTPUT
  XX0109:=rsiov
ENDUSE
RECORD
  ARCOL.arcres AS arcres
  ARCOL.i AS i
  RETIME.TD AS TD

```

```

ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
67890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
91XX0007XX0008TACS  XX0003
3
  XX0013XX0068          .66666
0
  XX0068XX0013          .005
0
  XX0013                  2.E-6
0
  XX0013                  1.E5
0
  XX0008                  .001
0
  XX0010                  .001
0
91XX0105      TACS  XX0109
3
  XX0027XX0036          .0001
0
  XX0036XX0033          1.2E-5
0
  XX0105                  .00053
0
  XX0042                  20.
0
  XX0068XX0045          .66
1
  XX0045XX0049          6.
0
  XX0068XX0049          3.8
1
  XX0049XX0053          3.56
0
  XX0068XX0053          23.8
1
  XX0053XX0057          1.96
0
  XX0068XX0057          140.
1
-1XX0057XX0027          100.  2.E8  1. 1 0
0
  XX0061                  50.
0
  XX0064XX0061          15.
0
  XX0064                  .2
0

```

```
XX0068XX0064          25.
0
XX0068          1.E7
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
13XX0010XX0008
XX0006  0
XX0013XX0007      -1.      1.
0
XX0033XX0105      -1.      1.
1
XX0042XX0061          1.
0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART ><
TSTOP >
/INITIAL
2XX0042          2050.
3XX0042          2050.
/OUTPUT
XX0027XX0068XX0042
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```

C.4. Programa que simula el comportamiento de la conexión a tierra.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW junio, lunes 13, 2005
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C Programado por Ernesto Meléndez Meléndez
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-6      .001
    500      1      1      1      1      0      0      1      0
MODELS
/MODELS
INPUT
  IX0001 {i(XX0210)}
  IX0002 {i(XX0214)}
  IX0003 {i(XX0216)}
  IX0004 {i(XX0252)}
  IX0005 {i(XX0244)}
  IX0006 {i(XX0236)}
  IX0007 {i(XX0330)}
  IX0008 {i(XX0334)}
  IX0009 {i(XX0336)}
  IX0010 {i(XX0372)}
  IX0011 {i(XX0364)}
  IX0012 {i(XX0356)}
  IX0013 {i(XX0452)}
  IX0014 {i(XX0456)}
  IX0015 {i(XX0458)}
  IX0016 {i(XX0494)}
  IX0017 {i(XX0486)}
  IX0018 {i(XX0478)}
OUTPUT
  XX0296
  XX0304
  XX0322
  XX0316
  XX0310
  XX0286
  XX0416
  XX0424
  XX0442
  XX0436
  XX0430
  XX0406
  XX0538
  XX0546
  XX0564
  XX0558
  XX0552
  XX0528
MODEL hevgpo

```

```

comment *****
*
*   Función: establece el valor de la resistencia en función de la
corriente          *
*
***** endcomment
INPUT
  i1
  i2
  i3
  i4
  i5
  i6
OUTPUT
  rtemp1
  rtemp2
  rtemp3
  rtemp4
  rtemp5
  rtemp6
DATA
  Ec
  rho
  r0
VAR
  Ii
  rtemp1
  rtemp2
  rtemp3
  rtemp4
  rtemp5
  rtemp6
INIT
  Ii:=(1/(2*PI))*(Ec*rho/(r0**2))
ENDINIT
EXEC
  rtemp1:=(r0)*((1+(i1/Ii))**(-0.5))
  rtemp2:=(r0)*((1+(i2/Ii))**(-0.5))
  rtemp3:=(r0)*((1+(i3/Ii))**(-0.5))
  rtemp4:=(r0)*((1+(i4/Ii))**(-0.5))
  rtemp5:=(r0)*((1+(i5/Ii))**(-0.5))
  rtemp6:=(r0)*((1+(i6/Ii))**(-0.5))
ENDEXEC
ENDMODEL
USE hevgpo AS hevgpo
INPUT
  i1:= IX0001
  i2:= IX0002
  i3:= IX0003
  i4:= IX0004
  i5:= IX0005
  i6:= IX0006
DATA

```

```
Ec:=      3.E4
rho:=     10.
r0:=     157.
OUTPUT
XX0296:=rtemp1
XX0304:=rtemp2
XX0322:=rtemp3
XX0316:=rtemp4
XX0310:=rtemp5
XX0286:=rtemp6
ENDUSE
USE hevgpo AS hevgpo
INPUT
i1:= IX0007
i2:= IX0008
i3:= IX0009
i4:= IX0010
i5:= IX0011
i6:= IX0012
DATA
Ec:=      3.E4
rho:=     10.
r0:=     20.
OUTPUT
XX0416:=rtemp1
XX0424:=rtemp2
XX0442:=rtemp3
XX0436:=rtemp4
XX0430:=rtemp5
XX0406:=rtemp6
ENDUSE
USE hevgpo AS hevgpo
INPUT
i1:= IX0013
i2:= IX0014
i3:= IX0015
i4:= IX0016
i5:= IX0017
i6:= IX0018
DATA
Ec:=      3.E4
rho:=     10.
r0:=     10.
OUTPUT
XX0538:=rtemp1
XX0546:=rtemp2
XX0564:=rtemp3
XX0558:=rtemp4
XX0552:=rtemp5
XX0528:=rtemp6
ENDUSE
RECORD
hevgpo.rtemp1 AS rtemp1
hevgpo.rtemp2 AS rtemp2
hevgpo.rtemp3 AS rtemp3
```



```

hevgpo.rtemp4 AS rtemp4
hevgpo.rtemp5 AS rtemp5
hevgpo.rtemp6 AS rtemp6
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345
67890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  XX0017XX0015      50.  10.  3.
0
  XX0015      70.
0
91XX0210      TACS  XX0296
0
  XX0015XX0026      50.  10.  3.
1
  XX0026      70.
0
91XX0214      TACS  XX0304
0
  XX0026XX0033      50.  10.  3.
0
  XX0033      70.
0
91XX0236      TACS  XX0286
0
  XX0033XX0040      50.  10.  3.
0
  XX0040      70.
0
91XX0244      TACS  XX0310
0
  XX0040XX0047      50.  10.  3.
0
  XX0047      70.
0
  XX0047XX0055      50.  10.  3.
0
  XX0055      70.
0
91XX0252      TACS  XX0316
0
91XX0216      TACS  XX0322
0
  XX0017XX0084      50.  10.  3.
0
  XX0084      70.
0
91XX0330      TACS  XX0416
0

```

XX0084XX0095			50.	10.	3.
1					
XX0095					70.
0					
91XX0334	TACS	XX0424			
0					
XX0095XX0102			50.	10.	3.
0					
XX0102					70.
0					
91XX0356	TACS	XX0406			
0					
XX0102XX0109			50.	10.	3.
0					
XX0109					70.
0					
91XX0364	TACS	XX0430			
0					
XX0109XX0116			50.	10.	3.
0					
XX0116					70.
0					
XX0116XX0124			50.	10.	3.
0					
XX0124					70.
0					
91XX0372	TACS	XX0436			
0					
91XX0336	TACS	XX0442			
0					
XX0017XX0151			50.	10.	3.
0					
XX0151					70.
0					
91XX0452	TACS	XX0538			
0					
XX0151XX0162			50.	10.	3.
1					
XX0162					70.
0					
91XX0456	TACS	XX0546			
0					
XX0162XX0169			50.	10.	3.
0					
XX0169					70.
0					
91XX0478	TACS	XX0528			
0					
XX0169XX0176			50.	10.	3.
0					
XX0176					70.
0					
91XX0486	TACS	XX0552			
0					

```

    XX0176XX0183          50.  10.  3.
0
    XX0183                  70.
0
    XX0183XX0191          50.  10.  3.
0
    XX0191                  70.
0
91XX0494      TACS  XX0558
0
91XX0458      TACS  XX0564
0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie   ><Vf/CLOP >< type >
  XX0015XX0210                      MEASURING
1
  XX0026XX0214                      MEASURING
1
  XX0033XX0236                      MEASURING
1
  XX0040XX0244                      MEASURING
1
  XX0047XX0252                      MEASURING
1
  XX0055XX0216                      MEASURING
1
  XX0208XX0017                      MEASURING
1
  XX0084XX0330                      MEASURING
1
  XX0095XX0334                      MEASURING
1
  XX0102XX0356                      MEASURING
1
  XX0109XX0364                      MEASURING
1
  XX0116XX0372                      MEASURING
1
  XX0124XX0336                      MEASURING
1
  XX0151XX0452                      MEASURING
1
  XX0162XX0456                      MEASURING
1
  XX0169XX0478                      MEASURING
1
  XX0176XX0486                      MEASURING
1
  XX0183XX0494                      MEASURING
1
  XX0191XX0458                      MEASURING
1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART ><
TSTOP  >

```

```
15XX0208-1      1.E4      8.E-6      2.E-5      2.
1.
/INITIAL
/OUTPUT
  XX0055XX0124XX0191XX0151XX0015XX0084
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
```