



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

**ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA  
TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA  
UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP**

**Estuardo Roel Velásquez Soto**

Asesorado por el Ing. José Ernesto Villeda Guerra

Guatemala, mayo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA  
TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA  
UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ESTUARDO ROEL VELÁSQUEZ SOTO**  
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ERNESTO VILLEDA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MAYO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a. i.)
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Pérez Archila
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA  
TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA  
UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 02 de noviembre 2018.

**Estuardo Roel Velásquez Soto**

Guatemala, 22 de octubre de 2020

Ingeniero  
José Anibal Silva de los Angeles  
Coordinador del Área de Electrotecnia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

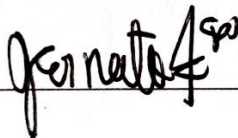
Estimado Ingeniero Silva:

Por medio de la presente, me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación elaborado por el estudiante Estuardo Roel Velásquez Soto, con número de carné 201212786, titulado: **“ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP”**, el cual he asesorado, revisado y corregido dicho trabajo.

Por lo que considero que dicho trabajo de graduación reúne los requisitos y alcances establecidos y doy la aprobación final de este.

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

Atentamente,  
“ID Y ENSAÑAD A TODOS”



---

José Ernesto Villeda Guerra  
Ingeniero Electricista  
Colegiado No. 14045  
Asesor

*José Ernesto Villeda Guerra*  
Ingeniero Electricista  
Colegiado 14045



REF. EIME 24112020b  
24 de Noviembre de 2020

Señor Director  
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

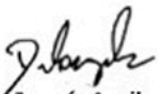
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP**, del estudiante; Estuardo Roel Velásquez Soto con numero de carnet 2335194080101, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
ID Y ENSEÑAD A TODOS

JOSE ANIBAL SILVA DE LOS ANGELES  
ING ELECTRONICO  
COLEGIADO No 5067

  
Ing. José Anibal Silva de los Angeles  
CC. Básicas Y Electrotecnia



REF. EIME 56. 2021.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **ESTUARDO ROEL VELÁSQUEZ SOTO** titulado; **ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP.** procede a la autorización del mismo.

Ing. **Armando Alonso Rivera Carrillo**


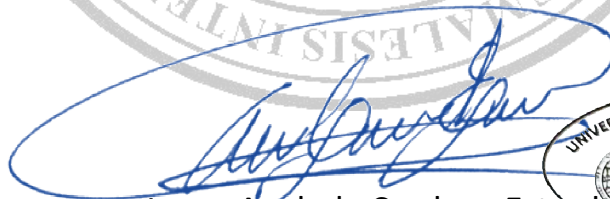


GUATEMALA, 25 DE MARZO 2,021.

DTG. 222-2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP**, presentado por el estudiante universitario: **Estuardo Roel Velásquez Soto**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana

Guatemala, mayo de 2021

AACE/asga



## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Dios**

Padre misericordioso.

**Mi madre**

Patricia Soto. Mi madre amada, que merece el reconocimiento y mi agradecimiento eterno por su amor y comprensión.

**Mi padre y hermana**

Fausto y Waleska Velásquez. Que también me brindaron su apoyo y cariño en todo momento para continuar mi carrera universitaria.

**Mi hijo**

Pablo Eduardo Velásquez. Mi inspiración y motivación para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudio.

**Facultad de Ingeniería**

Por haberme brindado los conocimientos para desarrollarme como profesional.

**Mis amigos de la  
Facultad**

Javier Valencia y Marco Recinos por compartir sus conocimientos, así como ser un equipo en mi formación académica.

**Mi asesor**

Ing. José Villeda. Mi sincero agradecimiento por el apoyo y conocimiento brindado.

**Personal TRELEC**

Por darme consejos y apoyo por este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS FENOMENOS DE SOBRETENSIÓN Y AISLAMIENTO EN BAJA TENSIÓN.....	1
1.1. Fundamento teórico .....	1
1.1.1. Caracterización de las sobretensiones transitorias .....	1
1.1.2. Comportamiento de las sobretensiones transitorias en baja tensión .....	3
1.1.3. Definición de descargas atmosféricas.....	3
1.1.4. Incidencia y conducción de descargas atmosféricas.....	5
1.1.5. Mecanismos de acoplamiento eléctrico .....	6
1.1.6. Formas de onda normalizadas de sobretensión .....	7
1.1.6.1. La onda combinada 1,2/50 $\mu$ s - 8/20 $\mu$ s .....	7
1.1.6.2. La onda 10/350 $\mu$ s.....	9
1.1.7. Modelos de tierra .....	11
1.1.7.1. Modelos de tierra para baja frecuencia.....	12

	1.1.7.2.	Modelos de tierra para alta frecuencia .....	12
	1.1.8.	Respuesta transitoria de los sistemas de tierra .....	12
1.2.		Coordinación de aislamiento respecto a sobretensiones transitorias .....	13
	1.2.1.	Control inherente .....	15
	1.2.2.	Control de protección.....	15
	1.2.3.	Criterios de coordinación de aislamiento en baja tensión .....	15
	1.2.3.1.	Metodología de cálculo de sobretensiones.....	16
	1.2.3.2.	Nivel de soportabilidad de aislamiento para equipos en baja tensión .....	17
1.3.		Protección en baja tensión por sobretensiones transitorias .....	19
	1.3.1.	Nivel de sobretensión por impacto del rayo.....	21
	1.3.2.	Zonas de protección contra rayos.....	23
2.		MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA FENÓMENOS DE SOBRETENSIÓN TRANSITORIA.....	25
	2.1.	Dispositivo de protección por sobretensiones transitorias.....	25
	2.1.1.	Características de aplicación .....	25
	2.1.2.	Parámetros fundamentales de acuerdo con normas internacionales.....	26
	2.1.3.	Tipos de supresor de sobretensión transitoria .....	27
	2.1.4.	Varistores de óxido metálico.....	28
	2.2.	Consideraciones de tipos de DPS .....	33
	2.2.1.	En cuanto a su ubicación.....	33

2.2.2.	En cuanto a su capacidad para resistir la sobretensión .....	33
2.3.	Clasificación de los dispositivos de protección en baja tensión .....	34
2.3.1.	Clasificación de DPS, fundamentado en la norma IEC 61643-1 .....	34
2.3.1.1.	Clase I: Ensayo con forma de onda de corriente típica 10/350 $\mu$ s .....	34
2.3.1.2.	Clase II: Ensayo con forma de onda de corriente típica 8/20 $\mu$ s .....	35
2.3.1.3.	Clase III: Ensayo con forma de onda combinada .....	36
2.3.2.	Clasificación de DPS, fundamentado en la norma ANSI IEEE C62.41 .....	37
2.3.2.1.	Escenario I .....	38
2.3.2.1.1.	Categoría A .....	40
2.3.2.1.2.	Categoría B .....	40
2.3.2.1.3.	Categoría C .....	41
2.3.2.2.	Escenario II .....	42
2.4.	Metodología final de selección de DPS para baja tensión .....	43
2.4.1.	Modos de protección .....	45
2.4.2.	Voltaje de operación continuo .....	47
2.4.3.	Sobretensión temporal .....	47
2.4.4.	Corriente nominal o impulso .....	48
2.4.5.	Distancia de protección .....	49
2.4.6.	Nivel de protección .....	50
2.4.7.	Protección contra cortocircuito .....	50

3.	CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN BAJA TENSIÓN PARA EL CASO DE ESTUDIO...	51
3.1.	Introducción .....	51
3.1.1.	Criterios de evaluación óptimas para Guatemala ...	52
3.1.1.1.	Magnitud de la corriente de rayo.....	53
3.1.1.2.	Vulnerabilidad de los equipos en baja tensión caso de estudio.....	53
3.2.	Implementación del programa de simulación Alternative Transient Program (ATP).....	53
3.2.1.	Consideraciones técnicas del modelo optimo en el programa ATPDRAW.....	54
3.2.2.	Modelo del transformador .....	54
3.2.3.	Modelo de líneas .....	56
3.2.4.	Modelo de descargadores de sobretensión .....	57
3.2.5.	Modelo de una sobretensión tipo atmosférica .....	59
3.3.	Información de entrada del caso de estudio .....	61
3.3.1.	Localización de análisis de exposición .....	61
3.3.2.	Características técnicas y físicas de la zona de análisis.....	63
3.3.3.	Resistividad y Resistencia de puesta a tierra .....	64
3.4.	Simulación del modelo de caso estudio en ATPDRAW.....	66
3.4.1.	Circuito simulado 1 con protección del transformador monofásico y el impulso de onda 10/350 $\mu$ s – 10 kA.....	68
3.4.1.1.	Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 1 .....	73

3.4.2.	Circuito simulado 2 con protección del transformador monofásico y el impulso de onda 10/350 $\mu$ s – 10 kA, con puesta a tierra en baja tensión .....	74
3.4.2.1.	Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 2 .....	78
4.	COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES EN BAJA TENSIÓN .....	81
4.1.	Generalidades.....	81
4.2.	Análisis de sensibilidad en baja tensión 120/240 V .....	81
4.2.1.	Premisas de medidas de protección .....	82
4.2.1.1.	Evaluación de fallas de aislamiento ...	82
4.2.1.2.	Análisis del sistema de puesta a tierra .....	82
4.2.2.	Consideraciones técnicas de sistema de protección en 240 V .....	83
4.2.2.1.	Determinación de zona de protección.....	83
4.2.2.2.	Selección de protección contra sobretensión en 240 V.....	84
4.3.	Evento simulado con protección en el tablero principal 120/240 V.....	86
4.3.1.1.	Circuito simulado 3 con protección en el tablero general monofásico 120/240 V y a un impulso de onda 8/20 $\mu$ s – 10 kA, con puesta a tierra ...	87

4.3.1.2.	Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 3.....	91
4.4.	Premisas económicas para implementación del sistema de protección.....	92
4.4.1.	Consignación de materiales .....	92
4.4.2.	Valoración de sobrecostos .....	95
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES .....	99
	BIBLIOGRAFIA.....	101
	APÉNDICES.....	103
	ANEXO. ....	109



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Onda sinusoidal nominal durante la sobretensión.....	2
2.	Ilustración del campo eléctrico debajo de una nube de tormenta electrificada. ....	4
3.	Impacto de rayo en línea de alimentación.....	5
4.	Acoplamiento capacitivo en los devanados del transformador.....	6
5.	Onda de tensión - circuito abierto .....	7
6.	Onda de corriente - cortocircuito .....	8
7.	Forma de onda 10/350 $\mu$ s .....	10
8.	Sobretensión transitoria de una onda de rayo 1,2/50 de cresta de 1 kA: a) Dependiente de la frecuencia; b) Independiente de la frecuencia.....	11
9.	Respuesta transitoria en una instalación comercial .....	13
10.	Fuente de sobretensión en una instalación.....	21
11.	Zonas de protección contra rayos .....	23
12.	Diodos de supresor de tensión transitoria .....	27
13.	Varistor de óxido metálico construcción .....	28
14.	Característica de tensión – corriente en un MOV.....	29
15.	Vida esperada de un supresor MOV .....	30
16.	Modelo de varistor tipo Leaded Y Block.....	31
17.	Prueba de ensayo DPS, baja tensión.....	36
18.	Identificación de las zonas de localización respecto al escenario I.....	39
19.	Rango de voltajes en categorías de localización .....	39
20.	Procedimiento para la selección de DPS baja tensión .....	44

21.	Modos de protección para varios sistemas de baja tensión.....	45
22.	Tipo de conexión CT1.....	46
23.	Tipo de conexión CT2.....	46
24.	Valores mínimos recomendados de voltaje de operación continuo de DPS, diferentes sistemas.....	47
25.	Típicos valores de prueba para TOV .....	48
26.	Montaje coordinado de un DPS .....	49
27.	Modelo del transformador monofásico ATPDRAW .....	55
28.	Modelo de línea de distribución 13,8 kV ATPDraw .....	57
29.	Modelo descargador de sobretensión ATPDRAW .....	58
30.	Características de la curva I-V -DPS- ATPDraw .....	59
31.	Modelo de fuente de rayo ATPDraw .....	60
32.	Niveles isoceraunicos de Guatemala.....	62
33.	Estructura de media tensión .....	63
34.	Escenario inicial– Modelo de caso de estudio. ....	67
35.	Configuración de ATPDRAW .....	69
36.	Forma de onda de la corriente de rayo 10 kA.....	70
37.	Onda de tensión incidente en la fase A – C. Caso 1.....	71
38.	Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 1.....	71
39.	Onda de tensión incidente en el tablero principal del usuario. Caso 1.....	72
40.	Sobretensiones en los puntos de medida de tensión. Caso 1 .....	72
41.	Escenario 2 – Circuito modelado con puesta a tierra en la casa residencial.....	75
42.	Onda de tensión incidente en la fase A – C. Caso 2.....	76
43.	Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 2.....	76
44.	Onda de tensión incidente en el tablero principal del usuario. Caso 2.....	77
45.	Sobretensiones en los puntos de medida de tensión. Caso 2 .....	77

46.	Descargador MOV de 250 V, para tablero principal.....	86
47.	Escenario 3 – Circuito modelado con varistor en el tablero principal, a un impulso de onda 8/20 $\mu$ s .....	88
48.	Onda de tensión incidente en la fase A – C. caso 3.....	89
49.	Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 3.....	89
50.	Onda de tensión incidente en el tablero principal con varistor. Caso 3.....	90
51.	Sobretensiones en los puntos de medida. Caso 3 .....	90

## TABLAS

I.	Clasificación de frecuencias para modelación de equipos .....	17
II.	Nivel de soportabilidad para equipos en baja tensión .....	18
III.	Categoría de sobretensiones respecto a los equipos en baja tensión.....	19
IV.	Niveles de sobretensión por fuente de daños .....	22
V.	Parámetros fundamentales para un DPS.....	26
VI.	Modelos de varistores MOV .....	31
VII.	Parámetros para prueba de Clase I .....	35
VIII.	Clasificación de DPS en baja tensión, de la normatividad IEC 61643-1.....	37
IX.	Parámetros permitidos de tensión y corriente en categoría A, conforme a la onda ring wave y forma de onda combinada para prueba y selección de DPS .....	40
X.	Parámetros permitidos de tensión y corriente en categoría B, conforme a la onda ring wave y forma de onda combinada para prueba y selección de DPS .....	41
XI.	Parámetros permitidos de tensión y corriente para las pruebas de escenario I en la categoría C de localización y selección DPS .....	42

XII.	Pruebas para DPS involucrados en rutas de salida para el escenario II .....	43
XIII.	Modelación de transformadores de media tensión .....	55
XIV.	Modelo de líneas.....	56
XV.	Modelo de descargador de sobretensión.....	58
XVI.	Características de estructuras en 13,8 kV .....	63
XVII.	Características técnicas de estructuras a 220 V .....	64
XVIII.	Clasificación de resistividades de la norma IEEE Std 81-2012.....	65
XIX.	Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 1.....	73
XX.	Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 2, con puesta a tierra en 220 V.....	78
XXI.	Fuente de sobretensión en baja tensión .....	83
XXII.	Zona de protección en baja tensión .....	84
XXIII.	Características técnicas garantizadas de selección de DPS en 220 V.....	85
XXIV.	Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 3, con protección en el tablero general. ....	91

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperio, dimensional de corriente S.I.
<b>C</b>	Capacitancia
<b><math>\tau</math></b>	Constante de tiempo
<b><math>\alpha</math></b>	Exponente de no linealidad
<b>f</b>	Frecuencia
<b>°C</b>	Grado Celsius
<b>Hz</b>	Hertz
<b>Z</b>	Impedancia
<b>kA</b>	Kiloamperios
<b>kV</b>	Kilovoltios
<b>MOV</b>	Metal oxide varistors
<b><math>\mu</math>s</b>	Microsegundo
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>ns</b>	Nanosegundos
<b><math>\Omega</math></b>	Ohmios
<b>TOV</b>	Temporary Overvoltages
<b>U<sub>o</sub></b>	Tensión nominal
<b>kVp</b>	Valor pico por kilovoltios
<b>Vpu</b>	Valor por unidad de tensión
<b>Ucs</b>	Voltaje máximo de operación continuo



## GLOSARIO

<b>Acometida</b>	Punto de conexión eléctrica en una instalación residencial o comercial con la empresa distribuidora de energía eléctrica.
<b>ANSI</b>	<i>American National Standards Institute.</i>
<b>ATP</b>	<i>Alternative transients program.</i>
<b>ATPDRAW</b>	Preprocesador grafico para ATP.
<b>DPS</b>	Dispositivo de protección contra sobretensiones.
<b>EEGSA</b>	Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.
<b>IEC</b>	<i>International electrotechnical commission.</i>
<b>IEEE</b>	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.
<b>INSIMUVEH</b>	Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología.
<b>Multiaterrizado</b>	Es un sistema de tierras de la distribuidora de energía eléctrica, el cual el neutro del circuito es puesto a tierra en todos los equipos de protección y transformación.

<b>NBA</b>	Nivel básico de aislamiento, es el nivel de voltaje de impulso que admite un equipo determinado.
<b>Nivel de protección</b>	Es el valor de tensión en terminales de DPS.
<b>NTDROID</b>	Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución. Norma técnica de Guatemala.
<b>Sobretensión</b>	Punto máximo y variable de impulso sobre una onda de tensión nominal.
<b>Varistor</b>	Resistencia variable en función del voltaje y tiempo.



## RESUMEN

Los sistemas eléctricos de distribución de bajo voltaje están propensos a ser perturbados en la calidad del suministro energético, debido a fuentes externas del sistema, otro gran porcentaje en cargas no lineales, definida como fuentes internas. En otra clasificación, existen otros tipos de sobretensiones tales como conmutación de equipos de maniobra del sistema de distribución y rayos de origen atmosférico, que se propagan a través de los elementos del sistema eléctrico. En consecuencia, las clases descritas de perturbación en baja tensión se produce una sobretensión transitoria.

Debido a estas sobretensiones mencionadas, el sistema eléctrico debe ser protegido con adecuados elementos de protección ante una correcta coordinación de aislamiento del sistema. Pero existen casos donde, se daña el aislamiento por varios factores, y provoca daños a las instalaciones eléctricas. Para analizar este fenómeno la variable analizar es la magnitud de una sobretensión transitoria, que se influye por las cargas conectadas del sistema, y complica evaluar las diferentes variables. Pero ante esta dificultad, se puede analizar con ayuda de programas computacionales que ayudan a representar un circuito eléctrico, que toma varias consideraciones de normas estandarizadas, así como criterios normalizados de asociaciones de ingeniería eléctrica para la evaluación de un sistema eléctrico.

De este trabajo se analiza las amplitudes y formas de onda de las sobretensiones transferidas a la red de baja tensión mediante transformador de baja tensión, cuando ocurren sobretensiones en el primario. El estudio busca la obtención de informaciones para descubrir las falencias de las redes de

distribución y consecuentemente proponer una mejora al sistema minimizando los daños causados a los consumidores. En las simulaciones, realizadas a través del programa ATP ("Alternative Transients Program"), se consideran líneas con configuraciones típicas, modelos de comprobada validez, para representación de los equipos de baja tensión y del transformador de distribución.

# OBJETIVOS

## General

Analizar el fenómeno transitorio por descargas atmosféricas en baja tensión para instalaciones residenciales y comerciales de Guatemala utilizando el software ATP.

## Específicos

1. Explicar la conceptualización de los fenómenos de sobretensión y aislamiento en baja tensión.
2. Exponer la metodología de selección de equipos protectores contra fenómenos transitorios de acuerdo con normativas internacionales.
3. Definir los criterios de evaluación en sobretensiones por descarga atmosféricas en baja tensión para el modelamiento en ATP.
4. Simular y analizar distintos escenarios de instalaciones en una red eléctrica de baja tensión, apoyado con la herramienta ATPDraw.
5. Evaluar el fenómeno transitorio en baja tensión para entender el comportamiento dinámico del sistema eléctrico e identificar la necesidad de acciones correctivas en las instalaciones.



## INTRODUCCIÓN

Los consumidores perciben cada vez más los efectos de las perturbaciones en la calidad de la energía. Tales efectos se manifiestan causando desde el mal funcionamiento hasta la quema de dispositivos electrónicos industriales, comerciales, y domésticos.

Las perturbaciones probablemente siempre estuvieron presentes en la red de distribución, anteriormente estaba compuesta de equipos predominantemente electromecánicos y presentaban una mayor soportabilidad ante las variaciones de tensión. Sin embargo, hoy en día la mayoría de los dispositivos producen algunos fenómenos electromagnéticos de tipo armónico y otros tienden a ser más sensibles a las perturbaciones en la energía suministrada.

Este trabajo se enfocó en analizar el comportamiento de una onda de sobretensión transitoria, provocada por una descarga atmosférica, por medio del circuito primario de una red de distribución rural que está muy expuesto a los rayos, lo cual hace que surjan sobretensiones en este circuito, como resultado de descargas directas (que alcanzan los conductores de fase), o descargas indirectas (cuando ocurren cerca de la línea), de tal forma que se transfieren al circuito secundario a través del transformador, lo que puede causar daños a los consumidores y ocasionalmente daños al transformador.

Por último, se valora la viabilidad de realizar instalaciones de dispositivos de protección contra sobretensiones en el secundario del transformador.



# **1. CONCEPTUALIZACIÓN DE LOS FENOMENOS DE SOBRETENSIÓN Y AISLAMIENTO EN BAJA TENSIÓN**

## **1.1. Fundamento teórico**

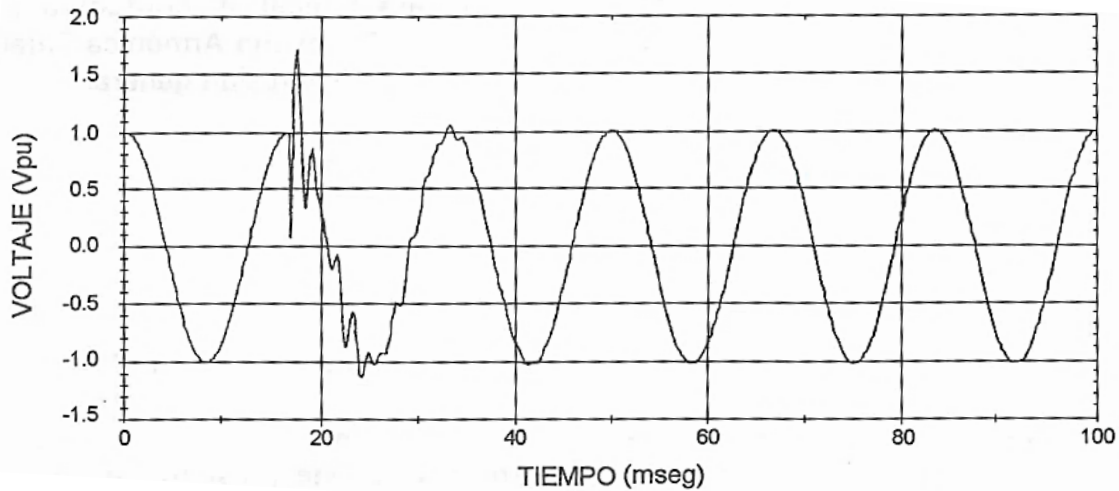
La operación de un sistema de energía puede verse gravemente afectada por la actividad de descarga atmosférica de rayos o eventos de conmutación eléctrica, provocando aumentos rápidos de voltaje proporcional a la corriente de muy corta duración y además de crecimiento rápido en la alimentación de la red, estos aumentos en los voltajes se denominan sobretensiones transitorias.

Adicionalmente, la norma ANSI C62.41-2002 determina la sobretensión transitoria, como una forma de onda de tensión mayor a 130 por ciento por Voltio máximo con una duración menor a medio ciclo de la forma de onda de voltaje frecuencia del sistema.

### **1.1.1. Caracterización de las sobretensiones transitorias**

La sobretensión en general es una onda transitoria de corriente, voltaje o potencia en un circuito eléctrico. Puede aumentar la corriente o el voltaje al menos un diez por ciento en unos pocos microsegundos. Aunque la duración de la sobretensión es corta, el voltaje puede alcanzar amplitudes de millones de voltios. La figura 1 muestra la inestabilidad de la onda sinusoidal durante la sobretensión en el sistema.

Figura 1. **Onda sinusoidal nominal durante la sobretensión**



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*.  
p. 90.

La sobretensión puede ocurrir de dos fuentes: interna y externa. Las sobretensiones transitorias provocadas por fuentes externas, generalmente es iniciada por una descarga atmosférica, que genera una magnitud del orden de los miles de kilovoltios en las instalaciones de los consumidores.

La fuente interna de sobretensión o también conocida como sobrevoltaje de conmutación generalmente ocurre en la operación de un interruptor de circuito en el proceso de conmutación, sea debido a una operación intencional o no intencional. Las sobretensiones de conmutación no son mayores como sobretensiones generadas externamente, sin embargo, ocurren con mayor frecuencia en las operaciones diarias si esta sobretensión existe debido al principio de inductancia y capacitancia en el sistema de potencia.



### **1.1.2. Comportamiento de las sobretensiones transitorias en baja tensión**

El comportamiento de una sobretensión transitoria en redes de baja tensión puede ser causadas por:

- Descargas entre nubes y tierra
- Descargas directas en la red primaria y secundaria
- Sobretensiones inducidas por descargas indirectas
- Tensiones transferidas desde primario a través del transformador
- Descargas directas a edificios

Para entender el comportamiento de una sobretensión transitoria en baja tensión, se debe analizar y conocer la soportabilidad de los equipos en el sistema, esto se vuelve muy complejo, puesto que existe diferentes cargas conectadas.

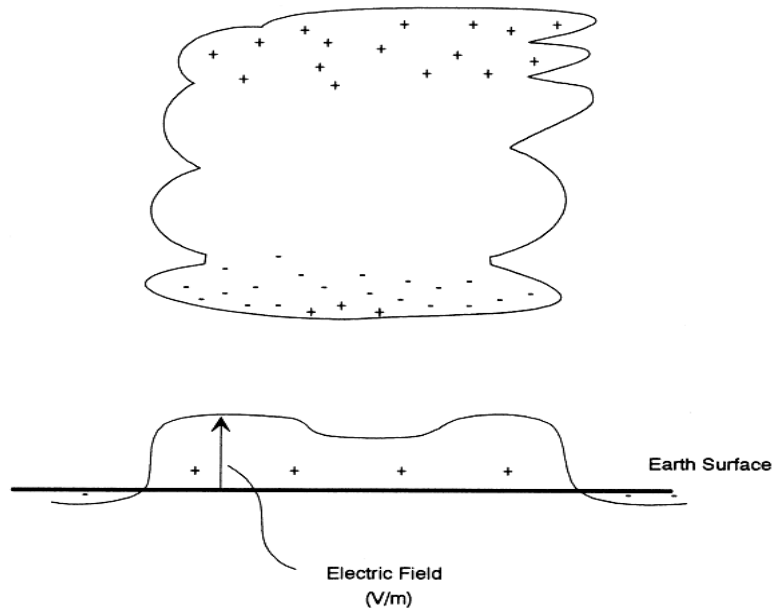
Con el apoyo de programas computacionales y normas internacionales, se puede crear criterios de modelación de sistemas para analizar las sobretensiones de una forma dinámica, con el fin de entender el comportamiento del sistema ante una sobretensión, por consiguiente, realizar una acción preventiva, como una protección para los usuarios, a la vez mitigar fallas de aislamiento en las redes de energía eléctrica.

### **1.1.3. Definición de descargas atmosféricas**

El rayo es una descarga eléctrica en forma de chispa o destello que se origina en una nube cargada. Que genera un diferencial de potencial eléctrico que alcanza miles de voltios, lo que origina descargas eléctricas en distintas

ubicaciones de una misma nube. La figura 2 muestra una nube ubicada sobre la superficie terrestre.

Figura 2. **Ilustración del campo eléctrico debajo de una nube de tormenta electrificada**



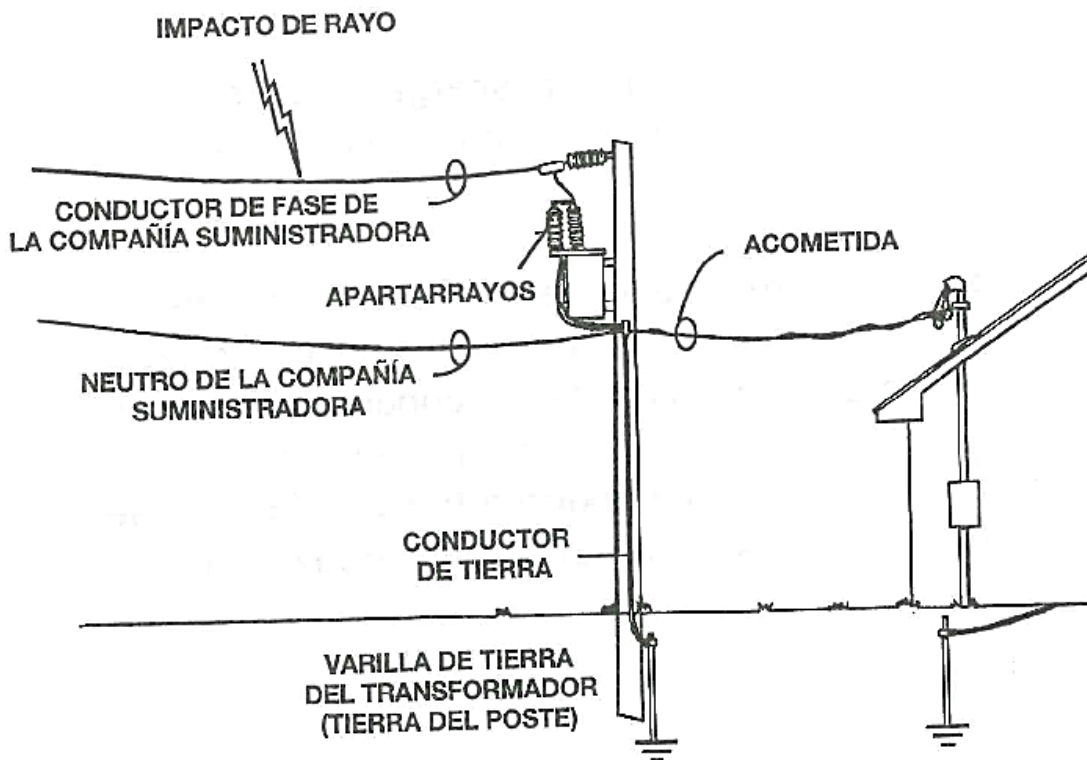
Fuente: BEATY, H. Wayne. *Manual de la ingeniería eléctrica tomo II*. Capítulo 12. p. 27.

Los rayos se pueden conceptualizar como descargas transitorias de energía electrostática en nubes cargadas, una vez rompen la rigidez dieléctrica del aire, alcanza miles de voltios y altas corrientes que se transfiere entre en la misma nube, nube y ionosfera o entre nube y tierra. Dentro del análisis de este documento las descargas atmosféricas serán entre nube y tierra.

#### 1.1.4. Incidencia y conducción de descargas atmosféricas

Las características de la red primaria, es el punto de partida para observar la propagación debido a que está expuesto a los rayos, da como resultado sobretensiones en el circuito primario tanto como descargas directas que alcanza a los conductores de fase o descargas indirectas que suceden cercana a la línea y se transfiere al circuito secundario, por medio del transformador. La figura 3 muestra el transitorio cercano a una línea de alimentación.

Figura 3. Impacto de rayo en línea de alimentación



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. p. 294.

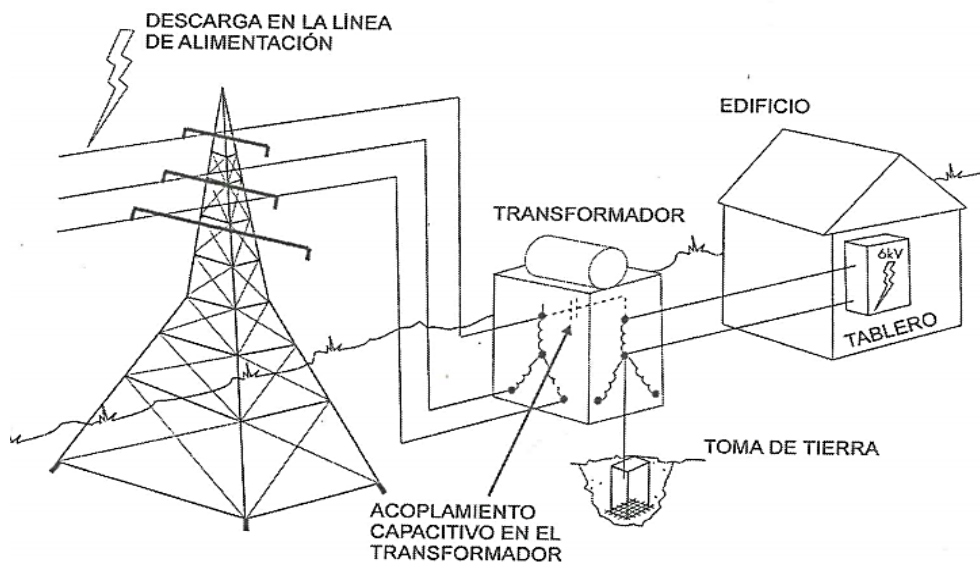
Es importante mencionar que las descargas pueden ser atraídas por objetos más altos, por lo que la altura por la distancia desde los cables de fase, permiten

a otros objetos como árboles, edificios, influir a una sobretensión en el sistema por acoplamiento. El acoplamiento puede ser conductivo por medio del subsuelo conductor y las estructuras de aterrizaje del sistema eléctrico.

### 1.1.5. Mecanismos de acoplamiento eléctrico

La característica de acople eléctrico se define como la transferencia de energía entre dos sistemas aislados. Los mecanismos de acoplamiento se dividen en tres tipos, resistivo, inductivo y capacitivo. Cada acople eléctrico resulta una sobretensión en el sistema de energía de forma inductiva o capacitiva. Un evento estudiado, es la tensión transferida desde primario a través del transformador, la cual entra a la carga del usuario a través de la capacitancia (acople capacitivo) que existe entre los devanados del transformador, como se muestra en la figura 4.

Figura 4. **Acoplamiento capacitivo en los devanados del transformador**



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*.

p. 93.

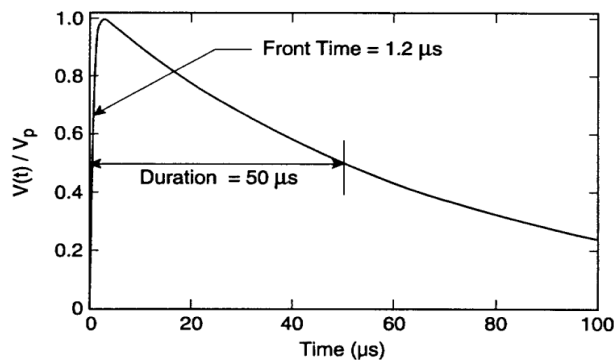
### 1.1.6. Formas de onda normalizadas de sobretensión

Existe una amplia variedad de formas de onda de sobretensión transitoria, que se utiliza para la soportabilidad de equipos en baja tensión y en sobretensión específicamente existen las normas IEC 61000-4-5 e IEEE C62.45 que usan las mismas formas de onda que las sobretensiones. A continuación, se describen las ondas de sobretensión más representativas para el análisis de transitorios.

#### 1.1.6.1. La onda combinada 1,2/50 $\mu$ s - 8/20 $\mu$ s

La onda combinada es entregada por una fuente de poder que puede aplicar una onda de voltaje de 1,2/50  $\mu$ s a través de los terminales de circuito abierto y una onda de corriente de 8/20  $\mu$ s a través de los terminales en cortocircuito. La forma de onda exacta que se entrega está determinada por la fuente y la impedancia a la que se aplica la sobretensión. La forma de onda de voltaje de circuito abierto se muestra en la figura 5, mientras que la forma de onda de corriente de cortocircuito se muestra en la figura 6.

Figura 5. Onda de tensión - circuito abierto



Fuente: IEEE Standard C62.45-2002. *IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 29.

Forma de tensión de circuito abierto:

- Tiempo de frente: 1,2  $\mu\text{s}$
- Duración: 50  $\mu\text{s}$

La siguiente ecuación, representa el modelo matemático de la onda 1,2/50  $\mu\text{s}$

$$V(t) = AV_p \left( 1 - \left( \exp^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \right) \left( \exp^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

Donde:

$A = 1,037$

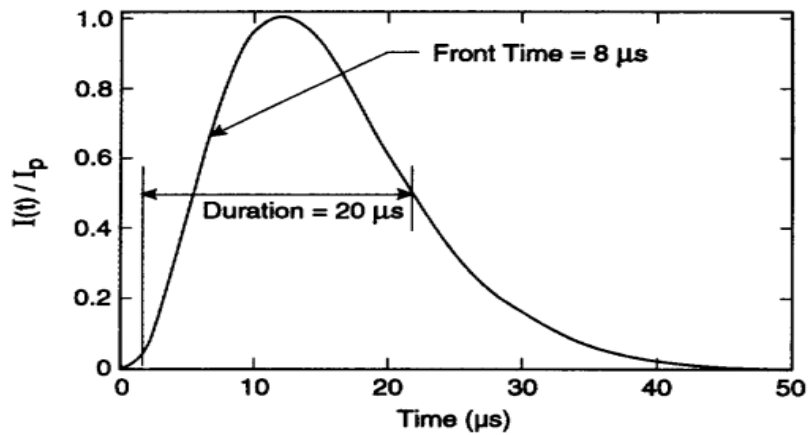
$V_p$  = Valor pico de tensión de circuito abierto

$t$  = tiempo

$\tau_1 = 0,4074 \mu\text{s}$

$\tau_2 = 68,22 \mu\text{s}$

Figura 6. Onda de corriente – cortocircuito



Fuente: IEEE Standard C62.45-2002. *IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 30.

Forma de corriente de cortocircuito:

- Tiempo de frente: 8  $\mu\text{s}$
- Duración: 20  $\mu\text{s}$

La siguiente ecuación, representa el modelo matemático de la onda 8/20  $\mu\text{s}$

$$I(t) = AI_p t^3 \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$$

Donde:

$$A = 0,01243 (\mu\text{s})^{-3}$$

$I_p$  = Valor pico de corriente de cortocircuito

$t$  = tiempo

$$\tau = 3,911 \mu\text{s}$$

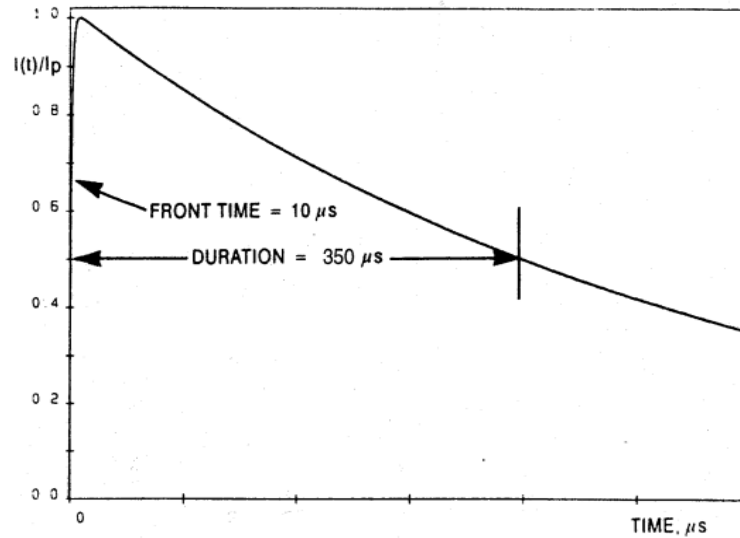
#### 1.1.6.2. La onda 10/350 $\mu\text{s}$

Ante los altos niveles de energía en la distribución de la onda por descargas atmosféricas, los dispositivos de protección instalados en el tablero del usuario están sujetos a rayos que pueden golpear directamente la estructura. Debido a esta razón, se define entre las clases de prueba aplicables a dispositivos de protección, conectado a sistemas de distribución de bajo voltaje, la clase 1 que involucra altos niveles de energía. La forma de onda de corriente de 10/350  $\mu\text{s}$ , como se muestra en la figura 7.

Forma de corriente de cortocircuito:

- Tiempo de frente: 10  $\mu\text{s}$
- Duración: 350  $\mu\text{s}$

Figura 7. Forma de onda 10/350  $\mu\text{s}$



Fuente: IEEE Standard C62.45-2002. *IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 43.

La siguiente ecuación, representa el modelo matemático de la onda 10/350  $\mu\text{s}$

$$I(t) = AI_p \left( 1 - \left( \exp \frac{t}{\tau_1} \right) \right) \left( \exp \frac{t}{\tau_2} \right)$$

Donde:

$A = 1,051$

$V_p$ = Valor pico de corriente de cortocircuito

$t$  = tiempo

$\tau_1 = 4,103 \mu\text{s}$

$\tau_2 = 470,1 \mu\text{s}$

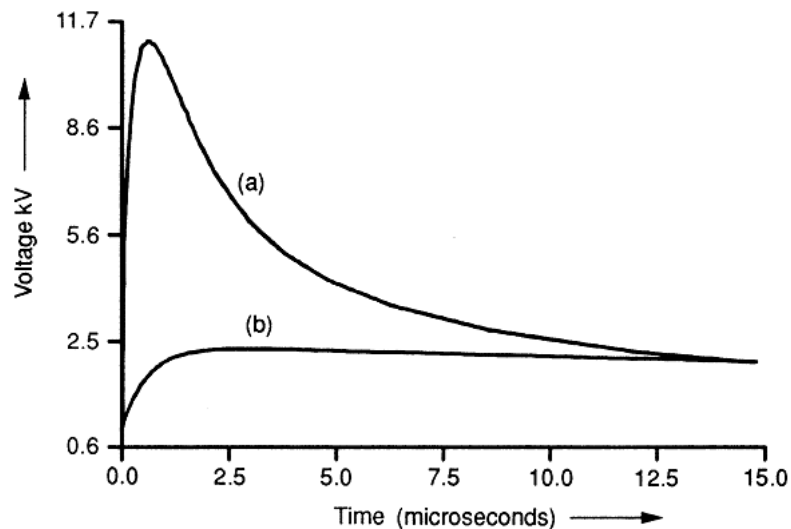


### 1.1.7. Modelos de tierra

La tierra desempeña un papel importante en la disipación de los rayos en el sistema eléctrico, otra forma de contribuir en la propagación de sobretensiones de los sistemas eléctricos de alta tensión a los sistemas secundarios.

Por lo que se refiere al análisis de transitorios de sobretensiones se debe seleccionar el modelo apropiado. Dentro de la elaboración de modelos de sistema de tierras es muy complejo y estrechamente acoplado eléctricamente con el sistema eléctrico. En la figura 8 muestra las diferencias entre: a) modelo ideal y b) modelo para la forma estándar del rayo.

Figura 8. **Sobretensión transitoria de una onda de rayo 1.2/50 de cresta de 1 kA: a) Dependiente de la frecuencia; b) Independiente de la frecuencia**



Fuente: BEATY, H. Wayne. *Manual de la ingeniería eléctrica tomo II*. Capítulo 39. p. 27.

El ejemplo anterior, hace hincapié en la importancia de seleccionar el modelo apropiado para el sistema de tierras, y considerando los modelos establecidos se describen las metodologías.

#### **1.1.7.1. Modelos de tierra para baja frecuencia**

Los modelos de puesta a tierra para baja frecuencia generalmente consideran los suelos como una resistencia pura, y se utilizan modelos de análisis de corriente continua, basados en métodos matemáticos para calcular sobretensiones transitorias y las impedancias en alrededor de un sistema de puesta a tierra sujeto a un rayo, por mencionar algunos métodos como: método de momentos o métodos de relajamiento.

#### **1.1.7.2. Modelos de tierra para alta frecuencia**

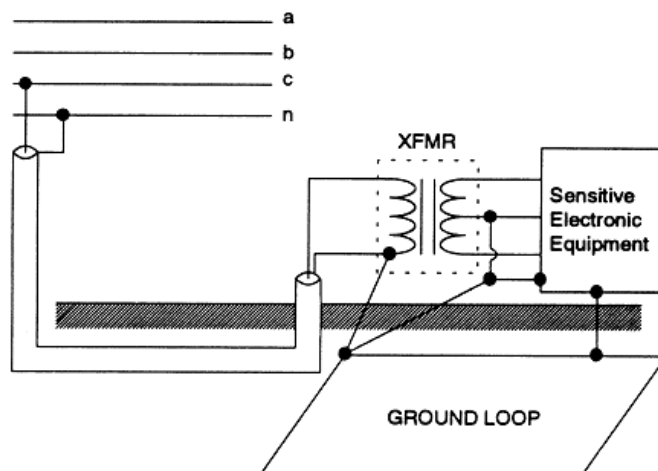
Los modelos de puesta a tierra para frecuencias más altas requieren un análisis electromagnético completo. Para este propósito, se puede utilizar el análisis de elementos finitos o el método de los momentos. Dado que las tierras son muy complejos, se introducen simplificaciones. Una regla general para seleccionar modelos de corriente continua o los modelos más complejos es comparar la dimensión más grande de un sistema de conexión a tierra, con la profundidad de penetración.

#### **1.1.8. Respuesta transitoria de los sistemas de tierra**

Las sobretensiones transitorias iniciados en el sistema eléctrico puede propagarse a través del sistema de conexión a tierra e ingresar al sistema secundario de una instalación, llegando a equipos electrónicos sensibles. En definitiva, la respuesta transitoria se ve afectado por la resistividad del terreno,

magnitud y conducción en la descarga de la corriente. En la figura 9 muestra una instalación típica de servicio a una instalación comercial.

Figura 9. **Respuesta transitoria en una instalación comercial**



Fuente: BEATY, H. Wayne. *Manual de la ingeniería eléctrica tomo II*. p. 27.

La respuesta transitoria en el sistema de tierra se puede traducir como respuesta a un modelo de baja frecuencia y corriente debido a la impedancia de impulso. Por ejemplo, en los transformadores no existe una conducción neutral. Es así como los transitorios de alta frecuencia viajan casi sin atenuar a través del neutro. La atenuación se proporciona si y solo si el neutro está múltiplemente conectado a tierra.

## 1.2. **Coordinación de aislamiento respecto a sobretensiones transitorias**

El objetivo de la coordinación de aislamiento es minimizar el número de fallas de aislamiento, y el número de interrupciones. Esta ha sido una tarea

fundamental de la ingeniería en general con un profundo efecto en la confiabilidad del sistema.

Los procedimientos de coordinación del aislamiento dependen también de los efectos de las fallas de aislamiento, debido a lo mencionado se pueden agrupar en dos categorías, definido en la Norma IEC 60664-1, de la siguiente manera:

- Control inherente
- Control de protección

Las sobretensiones en sistemas grandes a la vez complejos, como las redes de baja tensión sometidas a influencias múltiples por variables de potencia, solo pueden evaluarse sobre una base estadística. Esto es particularmente cierto para las sobretensiones de origen atmosférico y se aplica si la condición controlada se logra como consecuencia de un control inherente o por medio de un control de protección.

En la norma IEC 60664-1 recomienda un análisis probabilístico para evaluar si existe un control inherente o si se necesita un control protector. Este análisis requiere el conocimiento de las características del sistema eléctrico, como los niveles cerámicos, los niveles de soportabilidad, entre otros.

La coordinación de aislamiento utiliza una serie preferida de valores de voltaje de impulso nominal: 330 V, 500 V, 800 V, 1 500 V, 2 500 V, 4 000 V, 6 000 V, 8 000 V, 12 000 V.

### **1.2.1. Control inherente**

La coordinación de aislamiento controlada inherentemente respecto a la sobretensión transitoria se basa en la condición dentro de un sistema eléctrico en el que se puede esperar que las características del sistema limiten las posibles sobretensiones transitorias a un nivel definido.

### **1.2.2. Control de protección**

Para una sobretensión controlada por protección, es la condición dentro de un sistema eléctrico en el que se puede esperar que los medios de atenuación de sobretensión específicos limiten las posibles sobretensiones transitorias a un nivel definido.

### **1.2.3. Criterios de coordinación de aislamiento en baja tensión**

Para poder establecer los criterios de coordinación de aislamiento, que se enfocan a dar una mayor seguridad a los equipos y materiales para de esta manera reducir fallas y aumentar la disponibilidad es necesario considerar:

- Calcular los valores de tensión y la energía que producen las sobretensiones.
- Conocer las características de los equipos y materiales instalados.
- Seleccionar las protecciones adecuadas.
- Diseño de una resistencia adecuada del aislamiento para resistir sobretensiones de baja frecuencia.

### **1.2.3.1. Metodología de cálculo de sobretensiones**

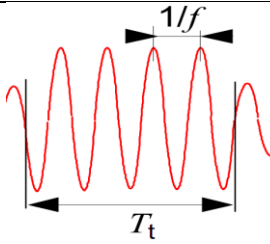
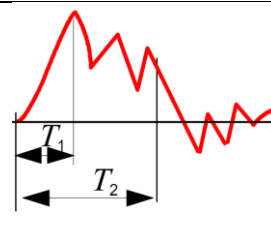
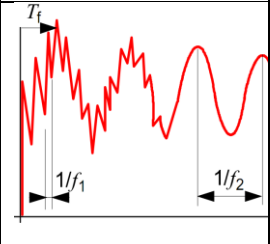
Para determinar la magnitud de la sobretensión transitoria de una instalación eléctrica, requiere un modelo adecuado del sistema y elegir el método de análisis. Actualmente existen varios métodos de modelación, que se debe hacerse de forma prudente y dentro de las formas de realizar el cálculo es a través de programas de simulación de análisis de transitorios. Para definición de este estudio se implementará el ATPDRAW que permite al usuario crear un circuito eléctrico equivalente, para modelar y simular un evento eléctrico.

Los criterios de un modelado, para un análisis transitorio es conveniente tener en cuenta:

- Fenómeno en estudio
- Periodo de frecuencias
- Selección del modelo de componentes individuales del sistema

La selección de componentes individuales del sistema debe guiarse con respecto al contenido de la frecuencia esperado del transitorio y deben tener la respuesta de frecuencia adecuada. Para el caso de modelación y simulación de fenómenos transitorios para baja tensión, se adapta la Norma IEC 60071-4, que establece una clasificación, considerando los diferentes tipos de sobretensión. En la tabla I se muestra el rango de frecuencia para el análisis de transitorio

Tabla I. **Clasificación de frecuencias para modelación de equipos**

Clasificación	Temporales	Rayo, frente rápido	Tensión de recuperación, frente muy rápido
Forma de onda			
Tiempo	$0,03 \text{ s} \leq T_t \leq 3\ 600 \text{ s}$	$0,1 \mu\text{s} \leq T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} \leq T_t \leq 100 \text{ ns}$
Frecuencia	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$	$25 \text{ kHz} < f < 5 \text{ MHz}$	$0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

Fuente: elaboración propia.

Se debe considerar, para este estudio la categoría por frente rápido (rayo), en consonancia con el riesgo de falla de los equipos y los niveles de soportabilidad requeridos, se debe agregar con la selección del descargador de sobretensión.

### 1.2.3.2. Nivel de soportabilidad de aislamiento para equipos en baja tensión

La Norma IEC 60664-1 define métodos de prueba considerando niveles de riesgo para evaluar el aislamiento con resistencia a los equipos pertenecientes a sistemas de bajo voltaje cuando se someten a sobretensiones de impulsos de

voltaje. La capacidad de soporte de aislamiento de los equipos generalmente se define por los fabricantes mediante el término Nivel Básico de Aislamiento NBA en consecuencia, el nivel de voltaje de impulso que admite el equipo. En general, las pruebas NBA del equipo utilizan el voltaje de impulso estandarizado 1,2/50  $\mu$ s. en la tabla II muestra los niveles de resistencia de aislamiento del equipo para diferentes niveles de voltaje en baja tensión, tomada de la tabla del anexo F de la norma IEC 60664-1, y la tabla III describe los equipos asociados con cada categoría de sobretensión.

Tabla II. **Nivel de soportabilidad para equipos en baja tensión**

Voltaje nominal del sistema basado en IEC 60038		Voltaje línea neutro derivado de voltajes nominales a.c o d.c.hasta el valor indicado e incluido	Voltaje impulso			
Trifásico	Monofásico		Categoría sobrevoltaje			
[V]	[V]	[V]	I	II	III	IV
		50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
	120 - 240	150	800	1500	2500	4000
230/400 277/480		300	1500	2500	4000	6000
400/690		600	2500	4000	6000	8000
1000		1000	4000	6000	8000	12000

Fuente: International Standard IEC-60664-1. *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1. Principles, requirements and tests.* p. 64.



Tabla III. **Categoría de sobretensiones respecto a los equipos en baja tensión**

<b>Categoría</b>	<b>Clasificación de equipos</b>
I	Equipos alimentados por circuitos en los que se toman medidas para limitar los transitorios de sobretensión, como equipos electrónicos con circuitos sensibles.
II	Equipos suministrados para instalaciones fijas, como electrodomésticos, equipos portátiles y otras cargas domésticas.
III	Equipos suministrados para instalaciones fijas donde la confiabilidad y disponibilidad están sujetas a requisitos especiales, tales como equipos industriales.
IV	Equipos de medición de energía eléctrica y de protección contra sobrecarga, entre otros.

Fuente: elaboración propia.

### 1.3. **Protección en baja tensión por sobretensiones transitorias**

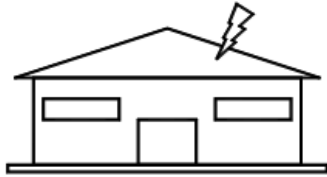
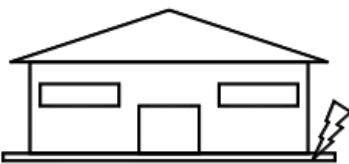
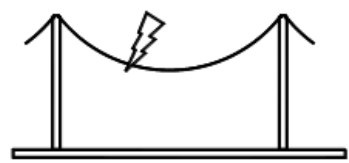
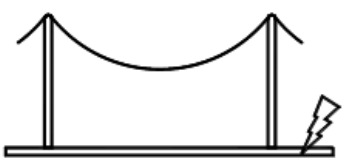
Las normas IEC 62305-1 considera cuatro niveles de protección (NP), contra rayos (I a IV). Para cada nivel de protección, se establece un conjunto de parámetros mínimos que se utilizan para diseñar los componentes contra rayos. Específicamente en este trabajo, se enfocaron los esfuerzos en las sobretensiones causadas por los rayos, la norma IEC 62305-1, categoriza la fuente de daño del rayo en cuatro categorías:

- **S1-Rayos directos sobre la estructura:** las sobretensiones fluyen a través del sistema de protección contra rayos, el sistema de puesta a tierra y las partes metálicas conectadas a tierra, y pueden inducir sobretensiones de acoplamiento electromagnético en el circuito de instalación o incluso utilizar el circuito en sí mismo como medio de retorno del rayo. Parte de la corriente que ha sido drenada por el sistema de puesta a tierra.

- S2-Relámpagos cerca de la estructura: pueden producirse sobretensiones debido al acoplamiento del campo electromagnético generado por el rayo con conductores externos e internos.
- S3-Rayos directos en líneas eléctricas y tuberías de metal que ingresan a la estructura: La sobretensión ingresan a la instalación a través del circuito de alimentación o del sistema de puesta a tierra.
- S4-Relámpagos cerca de líneas eléctricas y tuberías de metal que ingresan a la estructura: pueden ocurrir sobretensiones debido al acoplamiento inductivo generado, introduciendo sobretensiones en los circuitos de alimentación y el sistema de puesta a tierra de la instalación.

Las posibles fuentes de sobretensión de rayos que podrían causar daños a una instalación de acuerdo con la clasificación anterior S1 a S4, se ilustra en la figura 10.

Figura 10. Fuente de sobretensión en una instalación

Punto de Impacto		Fuente de Daño
Estructura		S1
Cerca de la estructura		S2
Acometida de servicio entrando a la estructura		S3
Cerca de la acometida de servicio		S4

Fuente: International Standard IEC-62305-1. *Protection against lightning – Part 1. General principles.* p. 37.

### 1.3.1. Nivel de sobretensión por impacto del rayo

Las referencias relacionan los niveles máximos de sobretensión y las zonas en sistemas eléctricos de bajo voltaje con las posibles fuentes de daños involucrados anteriores de S1 a S4.

Los valores máximos de los parámetros de corriente de rayos para los diferentes niveles de protección contra rayos se dan en la tabla IV y se utilizan para diseñar componentes de protección contra rayos (por ejemplo, sección transversal de conductores, grosor de láminas de metal, capacidad de corriente del supresor de sobretensión, distancia de separación contra chispas peligrosas) y para definir parámetros de prueba que simulen los efectos del rayo en dichos componentes.

Tabla IV. **Niveles de sobretensión por fuente de daños**

<b>Categoría de daño</b>	<b>Fuente de daño</b>	<b>Nivel de sobretensión</b>
S1	Descargas atmosféricas en la estructura	8/20 $\mu$ s – 10 kA
S2	Relámpago cerca de la estructura	8/20 $\mu$ s – 0,2 kA
S3	Descargas atmosféricas directas en la línea	10/350 $\mu$ s – 10 kA
S4	Descargas atmosféricas indirectas en línea	8/20 $\mu$ s – 5 kA

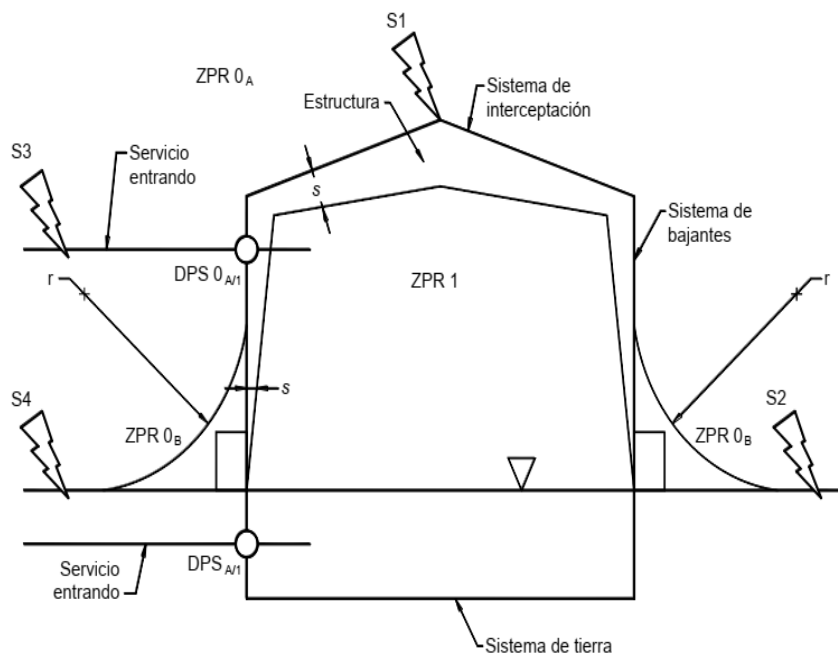
Fuente: elaboración propia.

Los valores presentados por los estándares tratan con valores de referencia, que se basan en una configuración de enrutamiento de cable de circuito dado dentro de estructuras no sean blindadas. Dependiendo de la configuración adoptada, estos valores pueden cambiar.

### 1.3.2. Zonas de protección contra rayos

La definición de zonas de protección según IEC 62305-1:2006, es la comprobación de las medidas de protección adquiridas, por otro lado, permite planificar y supervisar los tipos de protecciones. La zona de protección contra rayos su fundamento se basa en la teoría de la compatibilidad electromagnética de tal forma que incluye los elementos como: puesta a tierra, bajante y sistema de captación. En la figura 11 muestra las zonas de protección contra rayos.

Figura 11. Zonas de protección contra rayos



- |    |   |                    |  |
|----|---|--------------------|--|
| S1 | Impacto a la estructura                         | ○                  | Barraje equipotencial de rayos (DPS)                                 |
| S2 | Impacto cerca de la estructura                  | ZPR 0 <sub>A</sub> | Impactos directos, corriente total del rayo                          |
| S3 | Impacto en servicio entrando a la estructura    | ZPR 0 <sub>B</sub> | No impactos directos, corriente parcial de rayo o corriente inducida |
| S4 | Impacto cerca servicio entrando a la estructura | ZPR 1              | No impactos directos, corriente parcial de rayo a corriente inducida |
| r  | Radio esfera rodante                            |                    | Volumen protegido dentro de ZPR 1 tiene que respetar                 |
| s  | Distancia separación contra peligros de impacto |                    | distancia de separación s  |

Fuente: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Protección contra rayos* – NTC 4552-1. p. 108.

Referente a las zonas de protección se definen de la siguiente manera:

- Zona de protección 0<sub>A</sub>: La instalación eléctrica está expuesta a un impacto directo del rayo 10/350  $\mu$ s.
- Zona de protección 0<sub>B</sub>: La instalación está protegida con un dispositivo de protección contra sobretensión que soporta la onda de rayo 10/350  $\mu$ s; puede verse sometido a corrientes parciales de rayos.
- Zona de protección 1: Donde la corriente está limitada por la división de corrientes, por el descargador de sobretensión de clase 2 y su protección a la onda 8/20  $\mu$ s. El blindaje puede usarse para atenuar el campo electromagnético del rayo.
- Zona de protección n: Donde la corriente está limitada por la división de corrientes, por el descargador de sobretensión de clase 3 y su protección a la onda 8/20  $\mu$ s. El blindaje puede usarse para atenuar el campo electromagnético del rayo.

Se hace énfasis, que la clasificación de los descargadores de sobretensión con respecto a su clase y otros aspectos se definirá con amplitud en el siguiente capítulo.

## **2. METODOS DE PROTECCIÓN CONTRA FENOMENOS DE SOBRETENSIÓN TRANSITORIA**

### **2.1. Dispositivo de protección por sobretensiones transitorias**

Los criterios de seguridad operativa tales como la puesta a tierra, equipotencialidad y apantallamiento en una instalación eléctrica, ofrece de cierta manera confiabilidad frente a una interferencia. Para restringir la barrera contra los transitorios se requiere una protección complementaria, a fin de suprimir el peligro a las personas, con ello evitar el daño a los aislamientos de los equipos instalados en la red.

El dispositivo de protección contra sobretensiones transitorias denominado regularmente como DPS según la norma IEC 61643-1; el dispositivo en su caso ideal es destinado a limitar o filtrar las sobretensiones transitorias, evacuando las corrientes asociadas a las dichas sobretensiones. Los DPS está conceptualizado por normas internacionales como equipos eléctricos de protección en instalaciones eléctricas y contra tensiones generadas por fenómenos transitorios.

#### **2.1.1. Características de aplicación**

Las características de aplicación más importantes de un dispositivo de protección son: nivel de resellado y el nivel de protección, estas se conceptualizan de la siguiente manera.

- Nivel de protección: Es la tensión máxima permisible en el dispositivo que se aplique entre las terminales del DPS.

- Nivel de resellado: Es la tensión máxima, en aguas abajo del dispositivo de protección, que impide el paso de una corriente eléctrica significativa.

### 2.1.2. Parámetros fundamentales de acuerdo con normas internacionales

Los supresores de sobretensión transitoria, se clasifican de diferentes maneras y sus parámetros de especificación se describen en las diferentes normas internacionales de acuerdo con IEEE e IEC, pero cada una de ellas no varían en relación con sus parámetros.

Tabla V. Parámetros fundamentales para un DPS

Parámetro	Descripción
Tensión máxima de operación continua	Es el valor máximo de tensión $V_{rms}$ que soporta en continuidad en terminales en el DPS, en condiciones de operación normal.
Nivel de protección, tensión de soportabilidad normalizada	Es el valor de tensión en terminales de un DPS para la prueba con onda 8/20 $\mu s$ a corriente de descarga nominal.
Corriente nominal de descarga	Es el valor pico de impulso de corriente, para que esta diseñado el DPS, referente a protocolos de pruebas de consolidación.
Corriente máxima de descarga	Es el valor pico de corriente máxima de una onda combinada que puede el DPS limitar de forma segura, este parámetro está relacionado con la disipación de energía que emite en un rango de tiempo el DPS.
Característica temporal	Es el valor de tensión máxima permisible $V_{rms}$ a frecuencia industrial para que esta diseñado el DPS, para funcionar bajo una sobretensión temporal.

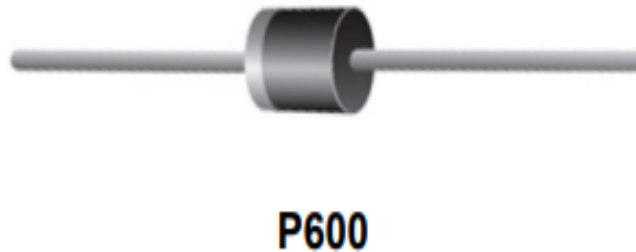
Fuente: elaboración propia.



### 2.1.3. Tipos de supresor de sobretensión transitoria

Los DPS su base de funcionamiento es limitar la sobretensión por una interferencia eléctrica, y de acuerdo con ese principio se pueden clasificar por disrupción eléctrica, como los dispositivos: encapsulados en gas, de arco y vacío. En la figura 12 se muestra un diodo supresor de tensión transitoria en baja tensión.

Figura 12. Diodos de supresor de tensión transitoria



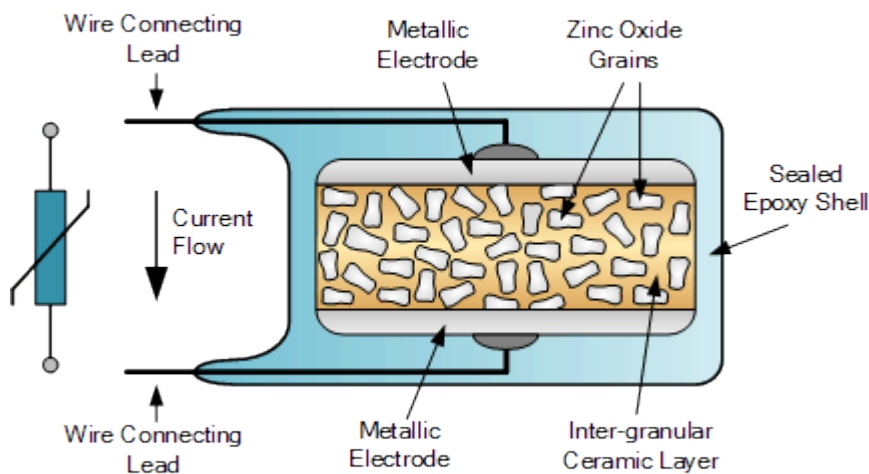
Fuente: Arrow Electronics. *Diodos de supresor de tensión transitoria*. <https://www.arrow.com/es-mx/categories/circuit-protection/esd-protection-diodes/tvs>. Consulta: 18 de noviembre de 2019.

Por otro lado, se utiliza resistencias no lineales, que aseguran una mejor protección en relación con su confiabilidad dado que son dependientes de la tensión en sus bornes tales como varistores de óxido metálico. Se pueden tomar en cuenta diferentes dispositivos para disponer en un sistema de protección contra sobretensiones, también de las necesidades específicas relacionadas con los niveles de protección requeridos considerando las características de operación de los equipos y sistemas eléctricos. En este trabajo, se restringirá el uso de varistores de óxido metálico, debido a la versatilidad, y al amplio uso de este tipo de dispositivo.

#### 2.1.4. Varistores de óxido metálico

Los varistores son dispositivos de protección contra sobretensiones fabricados a partir de una mezcla de material cerámico y partículas de óxido de magnesio u óxido de zinc sintetizadas, se ilustra en la figura 13. De forma global son denominadas como MOV por sus siglas en inglés metal-oxide varistor, según normas internacionales.

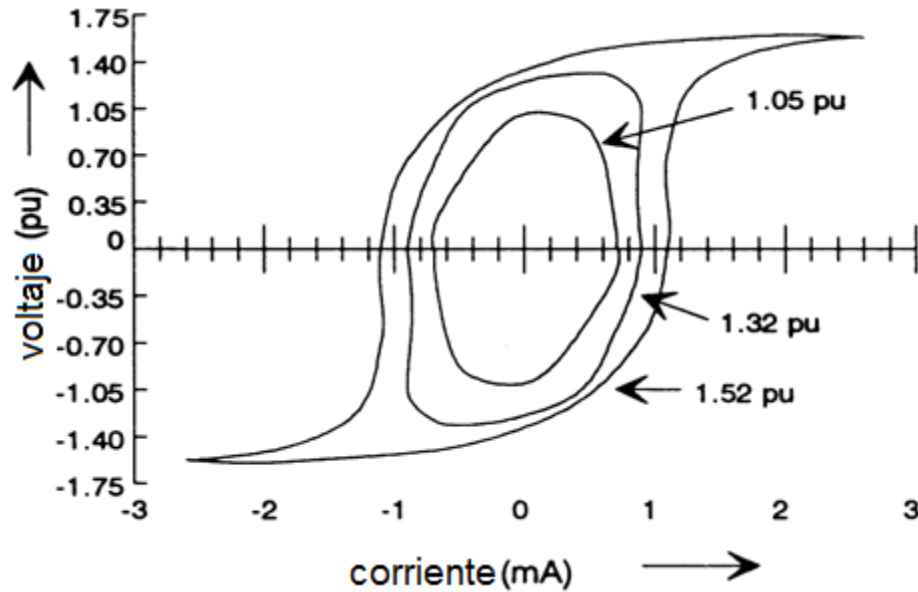
Figura 13. Varistor de óxido metálico construcción



Fuente: AspenCore, Electronic tutorials. *Resistor/varistor*. <https://www.electronicstutorials.ws/resistor/varistor.html>. Consulta: 19 de noviembre de 2019.

Los MOV pueden considerarse como una resistencia variable cuyo valor cambia de acuerdo con el voltaje aplicado a los terminales, cuanto mayor es el voltaje, menor es la resistencia. En la figura 14 se muestra las curvas de tensión contra corriente para un supresor MOV para diferentes niveles de tensión aplicada.

Figura 14. Característica de tensión – corriente en un MOV



Fuente: BEATY, H. Wayne. *Manual de la ingeniería eléctrica tomo II*. Capítulo 43. p. 27.

Las características del varistor pueden ser descritas usando funciones exponenciales, tal como la siguiente expresión:

$$I = k x V^\alpha$$

Siendo  $\alpha > 1$

Donde:

$I$  = Corriente drenada en el varistor

$V$  = Tensión aplicada al varistor

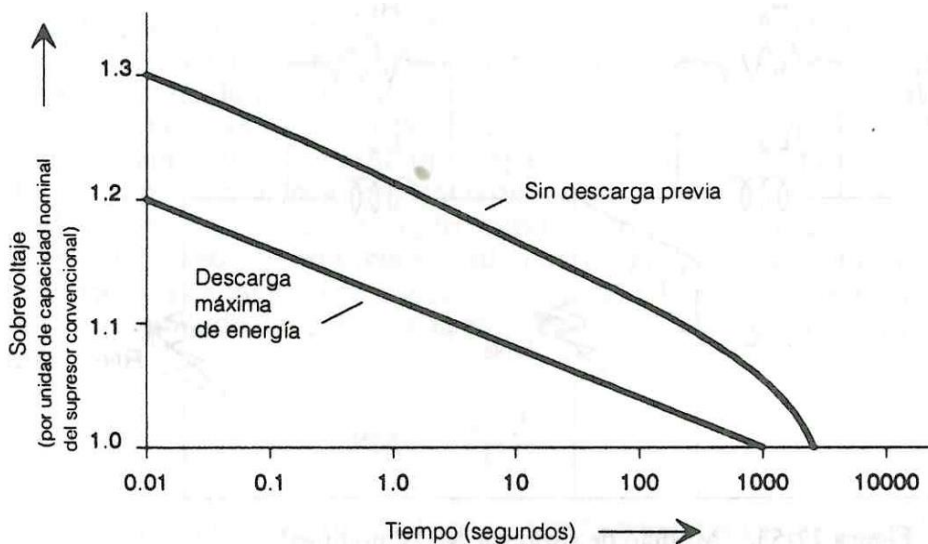
$k$  = constante en función de la componente geométrica

$\alpha$  = exponente de no linealidad

Los valores de  $k$  y  $\alpha$  se pueden obtener experimentalmente y están disponibles en los catálogos técnicos de los fabricantes.

Otro factor importante está en la fase de operación continua de un varistor, aumenta la pérdida de energía y temperatura de operación del MOV, y como efecto perjudica en la vida esperada. En la figura 15 ilustra un supresor MOV en función del voltaje de la frecuencia, aplicado de forma continua.

Figura 15. **Vida esperada de un supresor MOV**



Fuente: BEATY, H. Wayne. *Manual de la ingeniería eléctrica tomo II*. Capítulo 49. p. 27.

Existe una gran variedad de varistores de óxido metálico en el mercado, cual diseño depende del tipo de aplicación a la que se destine el dispositivo de protección. De los modelos puestos a disposición por el fabricante en su página web, se utilizarán los modelos "Leaded" y "Block", con las siguientes características:

Tabla VI. **Modelos de varistores MOV**

Modelo Leaded	Modelo Block
Elemento de varistor circular encapsulado	Elemento de varistor en forma de disco, llenado en una caja de plástico
Rango de funcionamiento entre 11-1 100 VRMS	Rango de operación entre 75-1 100 VRMS
Soportabilidad de corriente de sobretensión hasta 8 kA	Aplicaciones severas, con capacidad para corrientes de sobretensión de hasta 100 kA
Funciona a temperaturas de hasta 85 °C, sin pérdida de eficiencia.	

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Modelo de varistor tipo Leaded y Block**



Fuente: Digi-Key Corporation. *Varistor*. <https://www.digikey.com/en/product-highlight/e/epcos/circuit-protection>. Consulta: 07 de noviembre de 2019.

En términos generales, las características básicas de un varistor MOV son las siguientes:

- En el sistema eléctrico, cuando se somete a voltajes de operación normales, el dispositivo no debe funcionar. Esta característica está relacionada con la presencia de una corriente mínima, llamada corriente de fuga ( $<1$  mA).
- Para voltajes por encima de los límites del voltaje operativo del sistema, el dispositivo comenzará a conducir sin permitir, sin embargo, un aumento considerable en el voltaje entre sus terminales. Se puede decir que el dispositivo "sujeta" el voltaje entre sus terminales. Además, el dispositivo está diseñado para que, en estas condiciones, "drene" la sobretensión.
- La capacidad de absorción de energía del dispositivo debe ser compatible con los niveles de sobretensión esperados en el sistema eléctrico.
- Una vez que se suprime la sobretensión, el dispositivo debe volver al estado inicial descrito.
- El dispositivo debe ser adecuado para aplicaciones en interiores y exteriores de acuerdo con el entorno al que estará expuesto, para que su rendimiento no se vea afectado.
- Los voltajes residuales restantes deben ser inferiores al nivel de soportabilidad del equipo a proteger.
- El dispositivo debe aislar las sobretensiones de instalación temporales causadas por fallas del sistema sin dañar el componente.

## **2.2. Consideraciones de tipos de DPS**

Los DPS prácticamente se clasifican en dos:

### **2.2.1. En cuanto a su ubicación**

Los dispositivos protectores se pueden dividir en dos categorías: dispositivo de protección contra corriente de rayos, tipo pararrayos, que transportan un porcentaje significativo de las corrientes parciales de rayos, que se utilizan en la interfaz entre las zonas 0 y 1, descrito en la figura 11.

Los dispositivos de protección operan y actúan en la conducción de perturbaciones conducidas debido a descargas atmosféricas en la interfaz entre las zonas 1 y 2, así como perturbaciones resultantes de la conmutación eléctrica que ocurre en las otras interfaces desde la zona 1.

### **2.2.2. En cuanto a su capacidad para resistir la sobretensión**

Los DPS se clasifican en la clase de prueba y tipo de tecnología de acuerdo con la norma IEC 61643-1 para sistemas de bajo voltaje. Los DPS reciben una categorización de clase de acuerdo con la prueba de resistencia a la sobretensión que están sujetos:

- Clase I: se prueban con una forma de onda de corriente típica de 10/350  $\mu$ s.
- Clase II: se prueban con una forma de onda de corriente típica de 8/20  $\mu$ s.
- Clase III: se prueban con la onda combinada de 8/20  $\mu$ s (1,2/50  $\mu$ s).

## **2.3. Clasificación de los dispositivos de protección en baja tensión**

Para la protección contra sobretensiones transitorias, se hace la clasificación de acuerdo con un esquema de selectividad y un sistema coordinado, que además se rigen a las normas internacionales definidas en cada uno en particular.

Como se ha tratado anteriormente, es importante relacionar las clases de pruebas de acuerdo con el tipo de corriente que se somete y en correspondencia con las zonas de protección.

### **2.3.1. Clasificación de DPS, fundamentado en la norma IEC 61643-1**

A continuación, se describe la clasificación de DPS.

#### **2.3.1.1. Clase I: Ensayo con forma de onda de corriente típica 10/350 $\mu$ s**

La prueba de corriente de impulso se define por el valor de corriente parcial de rayo que se estima en el diseño del punto de instalación, en concordancia con el nivel de protección. Los DPS de clase I se caracteriza por cumplimiento de la onda 10/350  $\mu$ s. La prueba de los DPS se focaliza en la capacidad de energía W/R que tiene como requisito validar los parámetros de carga Q y corriente.

La corriente de impulso unipolar alcanzará la corriente dentro de 50  $\mu$ s, la transferencia de la carga Q ocurrirá dentro de 10 ms y la energía específica W/R se disipará dentro de 10 ms. Los DPS se recomiendan usar en las áreas de zona expuesta a corrientes directas o parciales de rayo, por ejemplo, a edificios y



sectores industriales. En la presente tabla la norma recomienda los siguientes parámetros para validar prueba de clase I.

Tabla VII. **Parámetros para prueba de Clase I**

$I_{peak}$ within 50 $\mu s$ kA	$Q$ within 10 ms As	$W/R$ within 10 ms kJ/ $\Omega$
20	10	100
10	5	25
5	2,5	6,25
2	1	1
1	0,5	0,25
NOTE One of the possible test impulses which meets the above parameters is the 10/350 waveshape proposed in IEC 61312-1.		

Fuente: International Standard IEC -61643-1. *Low-voltage surge protective devices – Part 1. Requirements and tests.* p. 57.

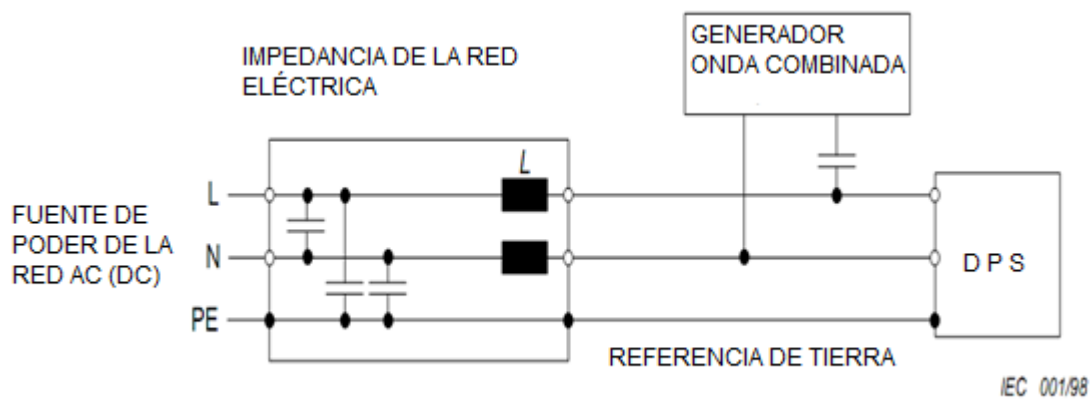
### 2.3.1.2. **Clase II: Ensayo con forma de onda de corriente típica 8/20 $\mu s$**

La clase II de los DPS se utilizan en sistemas de protección principal en instalaciones domiciliarias de baja tensión y además se caracteriza por cumplimiento en el ensayo de la onda de corriente 8/20  $\mu s$  correspondiente a corriente nominal, en definitiva, un impacto de rayo indirecto.

Los DPS de esta clase están diseñados para manejar corrientes inducidas o atenuadas por los DPS de clase I, usualmente se recomienda utilizar en las zonas 0B y 1 definido en el capítulo anterior, se debe tomar en cuenta si las líneas de alimentación están apantalladas. El valor de la corriente pico de ensayo

necesita localizar en que punto de la instalación se evaluara y también del nivel de protección requerido en la instalación. La figura 17 ilustra la verificación de la forma de onda, y la impedancia de la red eléctrica donde se simula conectando en conjunto con los conductores en un sistema monofásico.

Figura 17. **Prueba de ensayo DPS, baja tensión**



Fuente: International Standard IEC -61643-1. *Low-voltage surge protective devices – Part 1. Requirements and tests.* p. 61.

### 2.3.1.3. Clase III: Ensayo con forma de onda combinada

Esta clase de prueba de forma de onda combinada son probados con un generador de impulso combinado y se fundamenta por la salida de voltaje en la condición de circuito abierto en  $1,2/50 \mu\text{s}$  y la salida de corriente en la condición de cortocircuito  $8/20 \mu\text{s}$ . Estos dispositivos de protección se instalan en los equipos sensibles, porque ofrece una baja capacidad de descarga, y debe ser un complemento del DPS de clase II.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de la normatividad para la clasificación y selección de los DPS en baja tensión.

**Tabla VIII. Clasificación de DPS en baja tensión, de la normatividad IEC 61643-1**

Condición	Rayo directo	Rayo indirecto	Equipo final
Normativa IEC 61463-1	Prueba de clase I	Prueba de clase II	Prueba de clase III
Tipo de prueba de onda	10/350 $\mu$ s	8/20 $\mu$ s	1,2/50 $\mu$ s y 8/20 $\mu$ s

Fuente: elaboración propia.

### **2.3.2. Clasificación de DPS, fundamentado en la norma ANSI IEEE C62.41**

La práctica recomendada por la norma ANSI IEEE C62.41, describe un entorno de sobretensión convencional basado en la localización de una instalación, la impedancia de la línea de alimentación y la longitud total del cable. Entre otros parámetros que incluyen proximidad, tipo de cargas eléctricas, calidad del cableado y ubicación geográfica.

Pero la norma conceptualiza el tema de DPS en baja tensión, en el tipo de clase, en parametrizar y hacer recomendaciones prácticas sobre las sobretensiones en los sistemas eléctricos de baja tensión y su control. La norma se focaliza en dos escenarios que consideran los eventos contra la corriente de rayo.

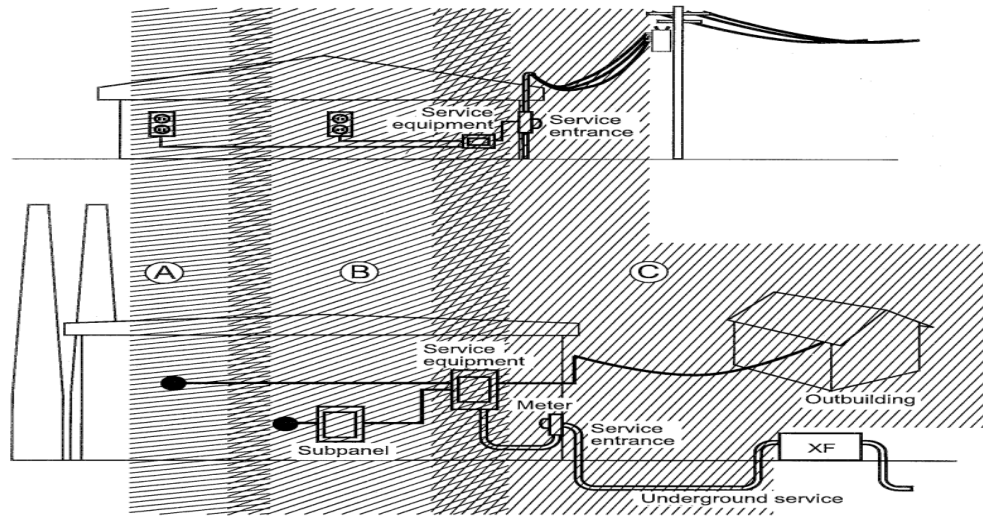
### **2.3.2.1. Escenario I**

Se considera para este escenario, con respecto a un evento de rayo que afecta la estructura de distribución de energía eléctrica hasta el cableado a la acometida domiciliar o comercial, ante este evento se produce el acoplamiento eléctrico, de la siguiente forma:

- Sobretensiones acopladas al sistema de potencia, directa o indirectamente desde el cableado de la acometida de la instalación.
- Efecto de campos eléctricos y magnéticos penetrando la estructura y acoplándose inductivamente al cableado interno de la instalación.

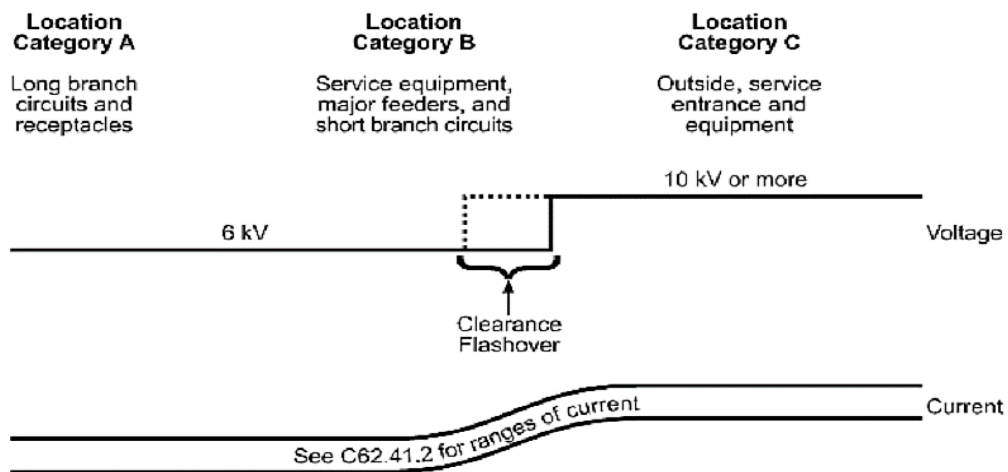
Acorde con el escenario I descrito, por consiguiente, la norma describe las categorías de localización conforme a los elementos de la instalación eléctrica y de una identificación establecida, por registros de sobretensiones en diferentes puntos de la instalación. Estas categorías están demostradas en impedancias. La figura 18 y la figura 19 ilustran el concepto de las zonas de localización y categorías del escenario I.

Figura 18. **Identificación de las zonas de localización respecto al escenario I**



Fuente: IEEE Standard C62.41.2-2002. *IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 10.

Figura 19. **Rango de voltajes en categorías de localización**



Fuente: IEEE Standard C62.41.2-2002. *IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 19.

### 2.3.2.1.1. Categoría A

En esta categoría A, se focaliza en el equipo final, se precisa en la ubicación de todas las salidas de más de 10 metros de la categoría B y más de 20 metros de la categoría C. De acuerdo con la localización descrita, se realiza las pruebas de onda recomendadas para el SPD: onda oscilatoria a 100 kHz (ring wave) y la onda combinada 1,2/50  $\mu$ s - 8/20  $\mu$ s. La tabla IX muestra los parámetros estandarizados para la prueba y selección de DPS de esta categoría.

Tabla IX. **Parámetros permitidos de tensión y corriente en categoría A, conforme a la onda ring wave y forma de onda combinada para prueba y selección de DPS**

Prueba estándar forma de onda	Valores pico		Impedancia efectiva generador de prueba ( $\Omega$ )
	Voltaje (kV)	Corriente (kA)	
0.5 $\mu$ s – 100 kHz	6	0,2	30
1,2/50 $\mu$ s – 8/20 $\mu$ s	6	0,5	12

Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2.1.2. Categoría B

En esta categoría B, contiene los tableros de distribución secundarios, alimentadores de alta potencia, alimentadores en sistemas industriales, circuitos de ramales cortos, barrajes trifásicos, sistemas de iluminación en edificios o instalaciones comerciales. El tipo de ondas recomendadas para realizar las pruebas a los DPS, son: onda oscilatoria 100 kHz (ring wave) y onda combinada 1,2/50  $\mu$ s 8/20  $\mu$ s, y como complemento transitorio rápido y onda larga. La

tabla X muestran los parámetros permitidos para prueba y selección de DPS de esta categoría.

**Tabla X. Parámetros permitidos de tensión y corriente en categoría B, conforme a la onda ring wave y forma de onda combinada para prueba y selección de DPS**

Prueba estándar forma de onda	Valores pico		Impedancia efectiva generador de prueba ( $\Omega$ )
	Voltaje (kV)	Corriente (kA)	
0.5 $\mu$ s – 100 kHz	6	0,5	12
1,2/50 $\mu$ s – 8/20 $\mu$ s	6	3	2

Fuente: elaboración propia.

### **2.3.2.1.3. Categoría C**

Esta categoría se enfoca en el punto de entrada de la acometida o tablero principal procedente del transformador de la red de distribución, a causa de incluye a los conductores, líneas subterráneas, tableros principales y equipo de entrada como el medidor de energía. Las ondas de prueba recomendadas son onda de corriente 8/20  $\mu$ s y onda de voltaje 1,2/50  $\mu$ s.

La categoría C, en particular indica 2 niveles de exposición a los cuales considera un riesgo dependiente del nivel isoceraúnico del área de diseño. La tabla XI presenta los parámetros recomendados para prueba y selección de DPS de esta categoría.

Tabla XI. **Parámetros permitidos de tensión y corriente para las pruebas de escenario I en la categoría C de localización y selección DPS**

Exposición	Prueba estándar		Prueba opcional
	Generador de Voltaje 1,2/50 $\mu$ s	Generador de corriente 8/20 $\mu$ s	Onda oscilatoria 100 kHz
	Voltaje mínimo de circuito abierto aplicado al DPS (kV)	Corriente de soporte en el DPS (kA)	(kV)
Alta	10	10	6
Baja	6	3	6

Fuente: elaboración propia.

### 2.3.2.2. Escenario II

Este escenario II, considera el evento de impacto de rayo directo a una estructura o muy cercana. En más detalles de consideración se describe en el Anexo A de la norma ANSI IEEE C62.41.2. Referente a el evento mencionado, se relaciona con los siguientes fenómenos eléctricos:

- Sobretensiones acopladas en los circuitos de potencia por acople mutuo.
- Sobretensiones acopladas en los circuitos de potencia por acople inductivo.
- Sobretensiones relacionadas con aumento local del potencial de tierra causando operación de DPS en la entrada de la acometida.



Es en este escenario donde se presenta una diferencia profunda entre IEEE y IEC. Si bien la norma IEC es mucho más detallada y robusta en cuando a fundamentación y pruebas, la norma IEEE parte de la práctica en su esquema de parametrización de las sobretensiones y sus registros no evidencia la necesidad de considerar la onda 10/350  $\mu$ s.

La norma IEEE considera que este escenario es poco probable y de alguna forma crítica la onda 10/350  $\mu$ s de la IEC, sin embargo, hace una propuesta de concordancia, fundamentado en pruebas llevadas a cabo por fabricantes, en las cuales se ha encontrado un factor del 10 por ciento, en relación con la prueba de impulso para evaluación de la capacidad energética. La tabla XII muestra lo propuesto por IEEE en el anexo A de la IEEE C62.41.2.

Tabla XII. **Pruebas para DPS involucrados en rutas de salida para el escenario II**

Exposición	Todas las tecnologías DPS con onda de prueba 10/350 $\mu$ s	Alternativa DPS con onda de prueba <sup>c</sup> 8/20 $\mu$ s
1	2 kA	20 kA
2	5 kA	50 kA
3	10 kA	100 kA
X	Menor o mayor en acuerdo entre las partes	

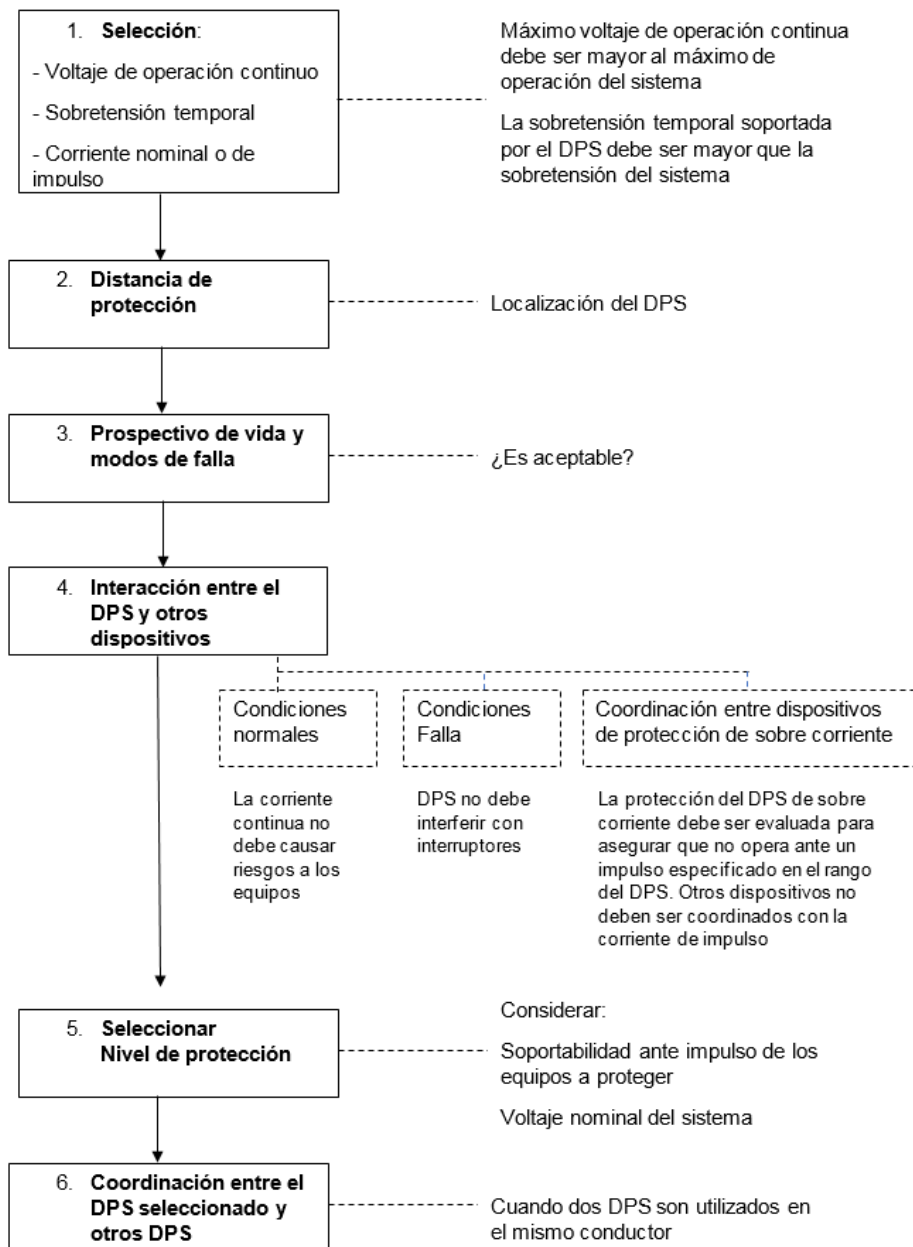
Fuente: IEEE Standard C62.41.2-2002. *IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low Voltage (1 000 V and Less) AC Power Circuits*. p. 35.

#### 2.4. Metodología final de selección de DPS para baja tensión

La selección de un DPS para baja tensión está relacionada con la filosofía de la norma que se aplique, sin embargo, los parámetros fundamentales son similares independientemente del tipo de ensayos que cumpla el DPS, a

continuación, en la figura 20 muestra el modelo general para la selección; referenciado de la norma IEC 61643-12.

Figura 20. **Procedimiento para la selección de DPS baja tensión**



Fuente: elaboración propia.

### 2.4.1. Modos de protección

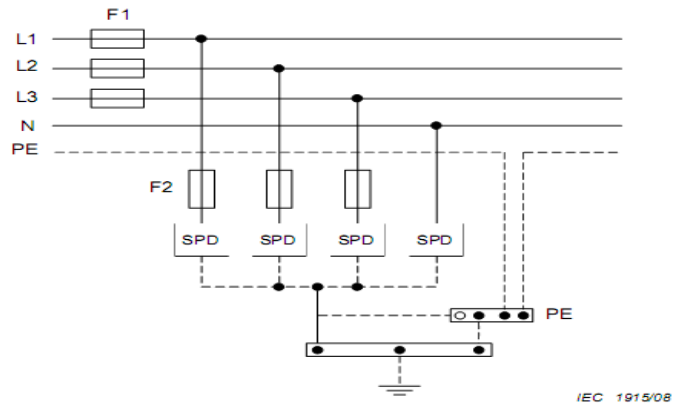
A continuación, se presenta las recomendaciones sobre modos de protección para varios tipos de sistemas de conexión y puesta a tierra de acuerdo con la recomendación de la IEC 61643-12.

Figura 21. Modos de protección para varios sistemas de baja tensión

DPSs conectado entre	Configuración del sistema en el punto de instalación del DPS							
	TT		TN-C	TN-S		IT con neutro distribuido		IT sin neutro distribuido
	Instalación de acuerdo a			Instalación de acuerdo a		Instalación de acuerdo a		
CT1	CT2	CT1		CT2	CT1	CT2		
Cada Fase y neutro	+	•	NA	+	•	+	•	NA
Cada fase y tierra (PE)	•	NA	NA	•	NA	•	NA	•
Neutro y tierra (PE)	•	•	NA	• ver nota 1	• ver nota 1	•	•	NA
Cada fase y tierra-neutro (PEN)	NA	NA	•	NA	NA	NA	NA	NA
Entre fases	+	+	+		+	+	+	+
<ul style="list-style-type: none"> <li>• : requerido</li> <li>NA : No aplica</li> <li>+ : opcional</li> <li>CT : tipo de conexión</li> </ul>	<p>Nota 1 Cuando las distancias entre el DPS y el punto de equipotencialización PE-N es corta (menor a 10 m) no se requiere DPS entre PE - N</p> <p>Nota 2 Cuando se usa instalación tipo CT2 la soportabilidad del equipo debe ser comparada con el nivel de protección que es el resultado de la serie L-N N-PE y no estrictamente la suma de los niveles de protección</p>							

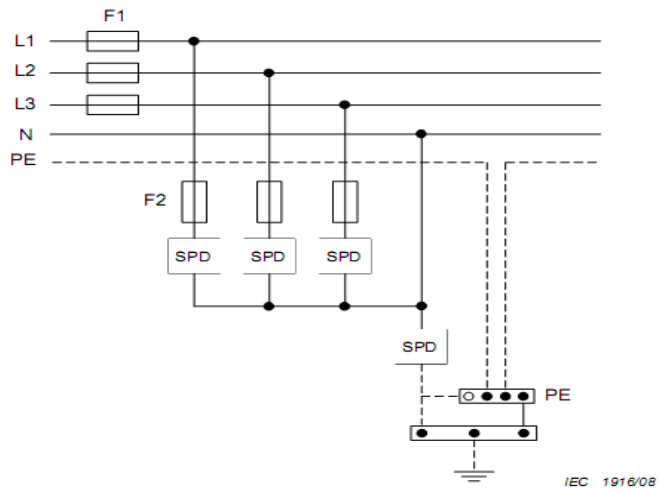
Fuente: International Standard IEC -61643-12. *Low-Voltage surge protective devices – Part 12. Selection and application principles.* p. 43.

Figura 22. Tipo de conexión CT1



Fuente: International Standard IEC -61643-12. *Low-Voltage surge protective devices – Part 12. Selection and application principles.* p. 42.

Figura 23. Tipo de conexión CT2



Fuente: International Standard IEC -61643-12. *Low-Voltage surge protective devices – Part 12. Selection and application principles.* 2008-11. p. 42.

### 2.4.2. Voltaje de operación continuo

En general se debe escoger el voltaje de operación continuo, teniendo en cuenta el tipo de conexión de neutro del sistema, para sistemas sólidamente aterrizados se escoge como 1,1 veces la tensión máxima de operación del sistema, para sistemas aislados, debe ser superior a la tensión máxima línea del sistema. La figura 24 presenta los valores recomendados de acuerdo con el tipo de sistema de conexión.

Figura 24. **Valores mínimos recomendados de voltaje de operación continuo de DPS, diferentes sistemas**

DPS conectado entre:	Configuración del sistema				
	TT	TT-C	TN-S	IT con neutro distribuido	IT con neutro distribuido
Cada fase y neutro	1.1 U <sub>o</sub>	NA	1.1 U <sub>o</sub>	1.1 U <sub>o</sub>	NA
Cada fase y tierra	1.1 U <sub>o</sub>	NA	1.1 U <sub>o</sub>	$\sqrt{3} \times U_o$ ver nota 3	Voltaje línea a línea ver nota 3
Neutro y tierra	U <sub>o</sub> ver nota 3	NA	U <sub>o</sub> ver nota 3	U <sub>o</sub> ver nota 3	NA
Cada fase y el conductor de tierra-neutro PEN	NA	1.1 U <sub>o</sub>	NA	NA	NA

NA: no aplica  
 Nota 2 U<sub>o</sub> es el voltaje línea neutro del sistema de bajo voltaje  
 Nota 3 Estos valores están asociados al peor caso de falla, la tolerancia de 10% no se considera  
 Nota 4 En sistemas tipo IT extensos, valores elevados de U<sub>c</sub> pueden ser necesarios

Fuente: elaboración propia.

### 2.4.3. Sobretensión temporal

Debido a que en baja tensión la operación de las protecciones es más lenta se recomienda que el DPS tenga un valor tolerable a sobretensiones temporal

superior a los tipos de sobretensiones con mayor probabilidad que en general son por fallas a tierra. Debe tenerse en consideración que la sobretensión temporal por pérdida del neutro no se considera para selección de DPS. La figura 25 presenta los valores recomendados para sobretensiones temporales de acuerdo con el tipo de sistema.

Figura 25. **Típicos valores de prueba para TOV**

<b>Aplicación</b>	<b>Valores de prueba típicos</b>	
	<b>DPSs conectado a sistema para 5s</b>	<b>para 200ms</b>
<b>TN</b>		
Conectado entre L - PE ó L-N	1.32 U <sub>CS</sub>	
Conectado entre N - PE		
<b>TT</b>		
Conectado L - PE	1.55 U <sub>CS</sub>	1200+U <sub>CS</sub>
Conectado L -N	1.32 U <sub>CS</sub>	
Conectado N - PE		1200
<b>IT</b>		
Conectado L - PE		1200+U <sub>CS</sub>
Conectado L -N	1.32 U <sub>CS</sub>	
Conectado N - PE		1200
U <sub>CS</sub> = 1.1 U <sub>o</sub> = 1.1 x Voltaje línea neutro del sistema		

Fuente: elaboración propia.

#### 2.4.4. Corriente nominal o impulso

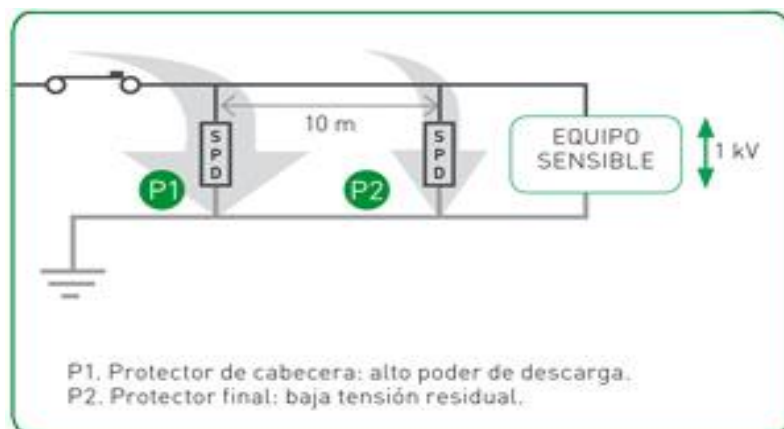
Para DPS en escenario II de acuerdo con la norma IEC 62305 el valor de la corriente impulso depende del nivel de protección que arroja la evaluación del riesgo en la cual se fija en 5 y 10 kA, con una onda 10/350 µs y cuando se tiene acometida apantallada los valores se reducen a la mitad. La norma IEC 61643 recomienda asumir 12,5 kA cuando se tiene sistema de apantallamiento externo

y no es posible determinar la corriente por fase que manejará el DPS. En resumen, para la corriente de impulso o máxima equivalente (en paréntesis) se tienen valores de 1 kA (10 kA), 2 kA (20 kA), 2.5 kA (25 kA), 5 kA (50 kA), 10 kA (100 kA), 12.5 kA (125 kA). La norma NFPA 780-2008 en el numeral 4.18.3.1.2 recomienda que el DPS en la entrada de la acometida debe tener una corriente máxima de de 40 kA 8/20  $\mu$ s ó una corriente nominal de 20 kA 8/20  $\mu$ s, ambos valores son por fase.

#### 2.4.5. Distancia de protección

Normalmente se instalan los DPS para proteger varios equipos de acuerdo con una distancia de protección que puede ser estimada por simulaciones o fórmulas simplificadas. De acuerdo con la práctica, se recomienda seguir las normas IEEE, IEC o UL las cuales realizan divisiones basadas en zonas de protección con diferentes características tales como: NBA, impedancia.

Figura 26. Montaje coordinado de un DPS



Fuente: Cirprotec. *Instalación de protector*. <http://www.cirprotec.com/es/Soporte/Area-de-conocimiento/Proteccion-contra-sobretensiones/DPS/Sobretensiones-Transitorias-DPS/Instalacion-de-un-protector>. Consulta: 16 de diciembre de 2019.

#### **2.4.6. Nivel de protección**

El nivel de protección debe seleccionarse por debajo del nivel de protección del sistema o equipo considerado para la protección, cuando un DPS proteja varios equipos se debe calcular la máxima distancia en la que el DPS garantiza una sobretensión por debajo del NBA del equipo. El nivel de protección está especificado para la corriente nominal del DPS.

#### **2.4.7. Protección contra cortocircuito**

En un DPS al ocurrir una falla, no debe intervenir en la confiabilidad del sistema, por lo tanto, deben estar equipados con protección de sobre corriente, la cual debe ser coordinada con las protecciones aguas arriba para no causar disparo de los dispositivos de protección del sistema. Adicionalmente considerar los conductores entre el DPS y el sistema deben soportar las condiciones de cortocircuito.



### **3. CRITERIOS DE EVALUACIÓN PARA SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN BAJA TENSIÓN PARA EL CASO DE ESTUDIO**

#### **3.1. Introducción**

Este capítulo define el paso complementario para este trabajo y como integración de lo descrito del capítulo 1 y 2 para el análisis de sobretensiones transitorias, es importante definir la selección de los componentes individuales del sistema, las características del rayo, los modelos de los descargadores de sobretensión, los datos del cable de la red de distribución eléctrica, y el software ATP.

En la siguiente descripción, indica las actividades relacionadas que se deben realizar en el análisis de una sobretensión transitoria en baja tensión. A continuación, se indica lo mencionado.

- Características del fenómeno del rayo: se ha realizado un análisis sobre los rayos en el capítulo número 1, sobre los medios de acoplamiento, comportamientos y medios de protección.
- Estudio de descargadores de sobretensión: Se profundizo en el capítulo anterior un análisis de los descargadores de acuerdo con sus clasificaciones y tipos de protecciones conforme a normativas internacionales; adicionalmente en este capítulo se determinará el modelo de descargador de sobretensión a utilizar en este trabajo, en concordancia con modelos fundamentados en IEEE *journal and paper* y tesis.

- Considerar el evento, tipo de onda, magnitud y duración ante una descarga atmosférica.
- Características del sistema: para este trabajo el sistema de distribución de energía eléctrica en Guatemala es de 13,8 kV. De igual modo, se considera los datos del cable de fase, cable blindado, cadena de aislador y configuraciones de los postes de distribución.
- Implementar el programa de simulación ATPDRAW: El próximo paso es la implementación de los principales equipos en ATPDRAW, se modela la línea de distribución eléctrica y se determinan los parámetros eléctricos del pararrayos y carga del consumidor. Por último, considerar el modelo de sobretensión Heidler que se utilizó para representar una sobretensión real.
- Análisis de la sobretensión transitoria en instalaciones de baja tensión: Para este último paso, se hicieron algunas comparaciones en la magnitud de voltaje entre fases y considerando también en la sensibilidad de la protección. De esa forma analizar el comportamiento de la sobretensión trasferida al sistema de baja tensión. El resultado será analizado después de cada evento simulado.

### **3.1.1. Criterios de evaluación óptimas para Guatemala**

Este fragmento establece los criterios mínimos de diseño y modelación en ATP, para obtener las mejoras y propuestas para los sistemas de baja tensión en residenciales y comercios de Guatemala.

### **3.1.1.1. Magnitud de la corriente de rayo**

Para el análisis de las sobretensiones se debe determinar la magnitud de corriente de impulso tipo rayo que se deba utilizar. La norma IEC 60099-5 recomienda para media tensión corrientes de descarga de 5 kA y 10 kA. Una corriente de 5 kA se considera para lugares con poca probabilidad de descarga y líneas cortas. El área localizada para el análisis del estudio es el departamento Escuintla, de la parte sur de Guatemala, considerando inicialmente una corriente de 10 kA, observando la alta probabilidad de una descarga por rayo en ese lugar.

### **3.1.1.2. Vulnerabilidad de los equipos en baja tensión caso de estudio**

Los niveles de soportabilidad bajo una sobretensión transitoria, se estableció en el capítulo número 1, el cual se rige por cuatro categorías, dependiendo del voltaje nominal. Asociado para Guatemala es un sistema monofásico 120/240 V, y las categorías I, II y IV. Para el caso de estudio corresponde a 4 000 V para tableros principales y medidores de energía, conforme a las tablas II y III de los capítulos anteriores.

## **3.2. Implementación del programa de simulación Alternative Transient Program (ATP)**

El programa ATP es dedicado para modelar sistemas eléctricos en distintos escenarios. El ATP se considera el más utilizado para la simulación transitoria. Puede simular problemas de sobretensión tales como fenómenos de rayos y problemas de conmutación que ocurren en un sistema de energía eléctrica. Se ha desarrollado y actualizado continuamente a través de contribuciones internacionales.

Para este propósito de análisis, se utiliza la versión 6.0 del software ATP; una ventaja significativa de utilizar este programa, que el usuario puede construir una imagen gráfica de un circuito eléctrico, seleccionando distintos componentes en la barra de menú. El software ATP tiene dos partes que son ATPDRAW y ATP PLOTXY.

ATPDRAW admite alrededor de 70 componentes estándar, lo cual es más valioso para los nuevos usuarios de ATP y es una excelente herramienta para fines educativos. La posibilidad de construir bibliotecas de circuitos y subcircuitos hace que ATPDRAW sea una herramienta poderosa en el análisis transitorio de sistemas de energía eléctrica. ATP PLOTXY se utiliza para mostrar la salida de forma de onda de voltaje, corriente y caída de rayos.

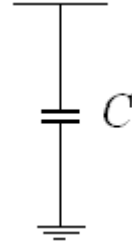
### **3.2.1. Consideraciones técnicas del modelo óptimo en el programa ATPDRAW**

En este tratado se representa los modelos utilizados para simular los componentes de las redes de distribución para una sobretensión transferida a baja tensión.

### **3.2.2. Modelo del transformador**

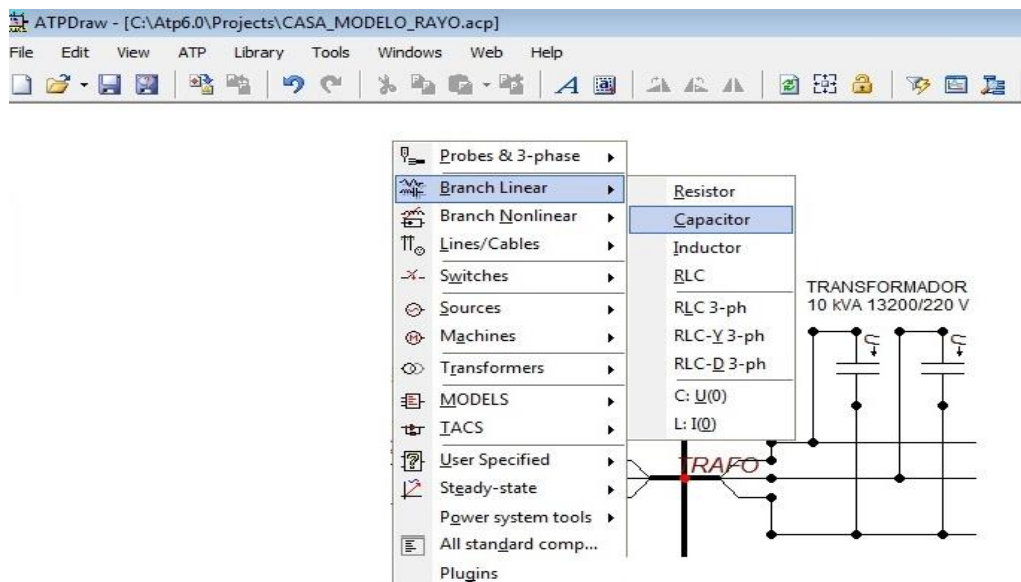
Para el modelo del transformador de media tensión, se toma en cuenta los siguientes parámetros importantes, lo que son: saturación, inductancia y el acoplamiento capacitivo. Para el caso de este estudio se establece una sobretensión de frente rápido y se toman las siguientes consideraciones.

Tabla XIII. **Modelación de transformadores de media tensión**

<b>Modelo de frecuencia de sobretensión</b>	<b>Frente rápido (rayo)</b>
Representación	
Saturación	Despreciar
Capacitancia	Fundamental para transformadores de voltaje capacitivo
Inductancia del transformador de corriente	Despreciar

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Modelo del transformador monofásico ATPDRAW**



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW, versión 6.0 – 2015.

### 3.2.3. Modelo de líneas

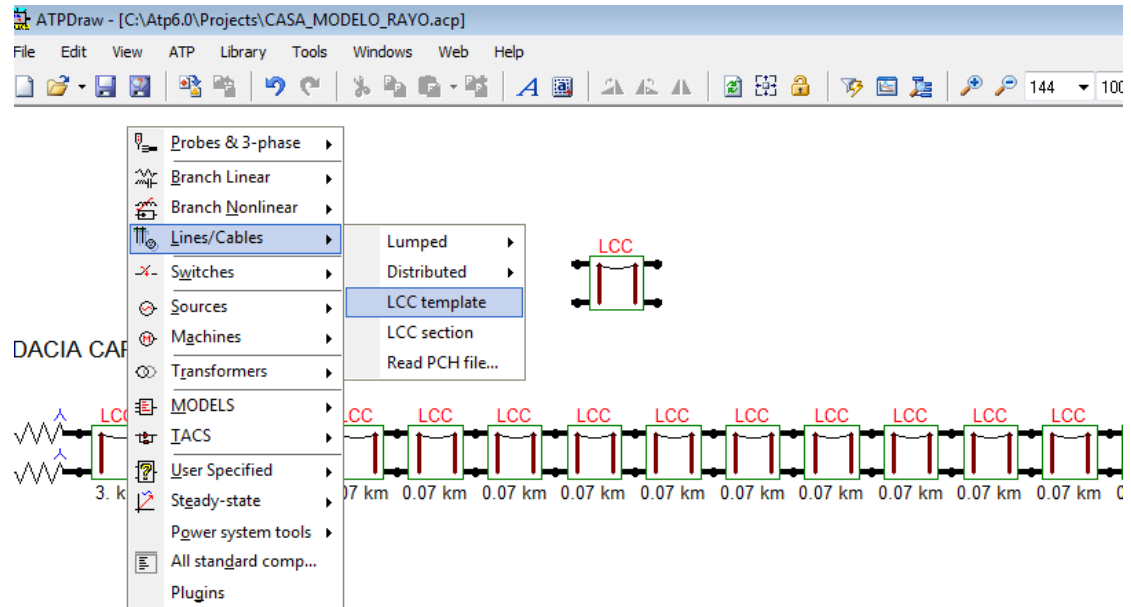
Para este caso de modelo de línea para simulación de transitorios, es fundamental tomar en cuenta la asimetría de la línea, parámetros dependientes y efecto corona. En este caso de estudio, se utiliza el modelo de parámetros distribuido variable utilizando la simulación JMartí, este complemento utiliza una aproximación mediante algoritmos en el dominio de la frecuencia, base al dominio del tiempo, en concordancia con un programa computacional empleando una matriz de transformación constante.

Tabla XIV. **Modelo de líneas**

<b>Modelo de frecuencia de sobretensión</b>	<b>Frente rápido (rayo)</b>
Representación de línea	parámetros distribuidos variable
Asimetría de la línea	Despreciar
Parámetros dependientes de la frecuencia	Consideración
Efecto corona	Consideración

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Modelo de línea de distribución 13,8 kV ATPDraw




Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW, versión 6.0 – 2015.

### 3.2.4. Modelo de descargadores de sobretensión

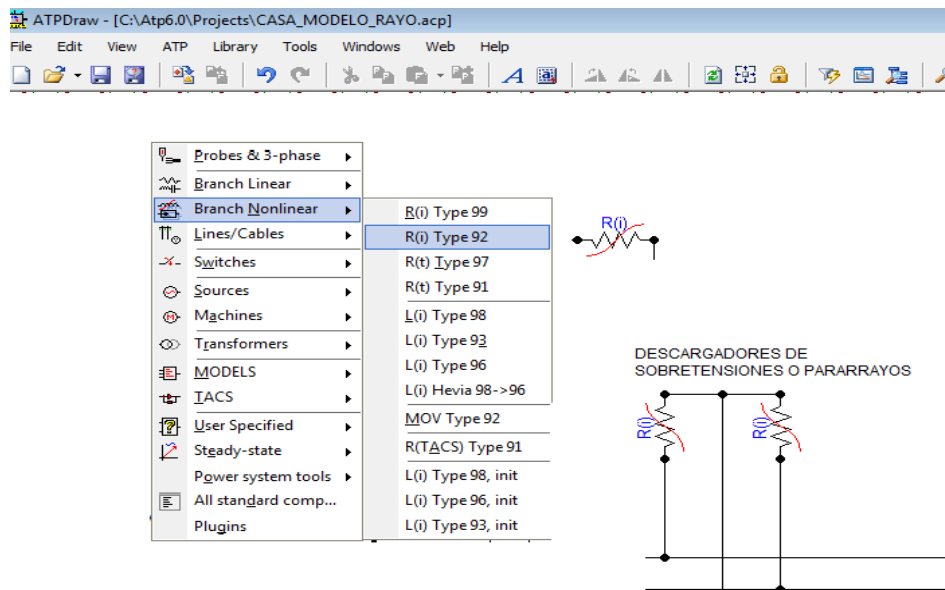
Se pueden considerar varios modelos de acuerdo con las necesidades específicas relacionadas con los niveles de protección requeridos y las características de operación de los equipos y sistemas eléctricos. En este trabajo, se restringirá el uso de varistores de óxido metálico, debido a la versatilidad y al amplio uso de este tipo de SPD. Se debe considerar la curva característica tensión versus corriente  $V/I$  con una capacitancia en paralelo y una inductancia en serie considerable. El modelo para utilizar en ATPDRAW es *Type 92* se ilustra en la siguiente figura.

Tabla XV. Modelo de descargador de sobretensión

Modelo de frecuencia de sobretensión	Frente rápido (rayo)
Representación	
Característica V/I dependiente de la frecuencia	Despreciar
Característica V/I dependiente de la temperatura	Considerar
Inductancia del bloque MOV	Considerar
Inductancia cables	Considerar

Fuente: elaboración propia.

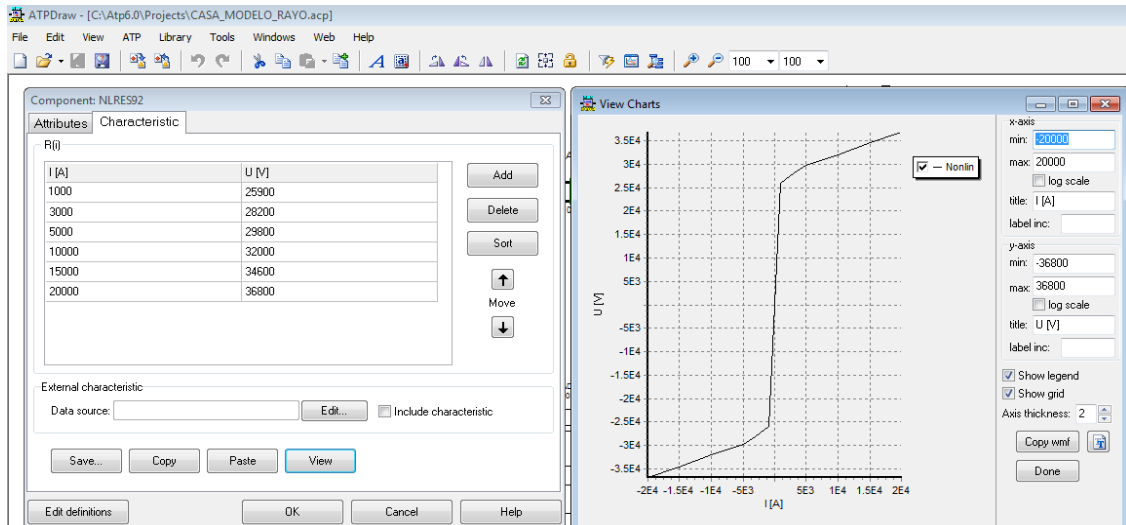
Figura 29. Modelo descargador de sobretensión ATPDRAW



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW, versión 6.0 – 2015.



Figura 30. Características de la curva I-V -DPS- ATPDraw



Fuente: elaboración propia.

### 3.2.5. Modelo de una sobretensión tipo atmosférica

La modelación en ATP para fenómenos transitorios es importante definir el nivel de tensión y el tiempo de duración de la sobretensión. Tomando en cuenta los anteriores criterios se utilizará una onda de impulso de corriente caracterizada, de acuerdo con la norma IEC-61-1, 1989-11, *High Voltage Test Techniques*, por lo tanto, el modelo óptimo en ATP es la fuente de corriente tipo HEIDLER TYPE 15.

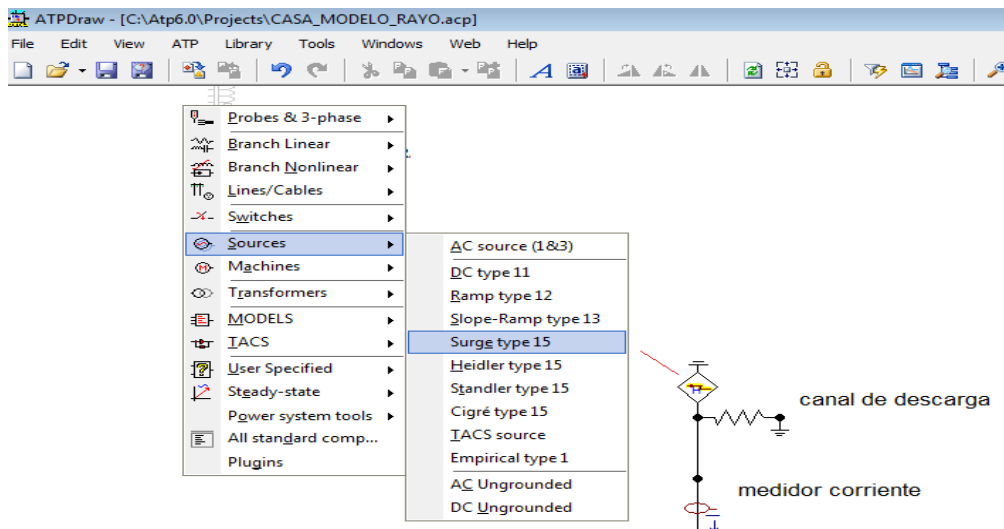
Este modelo HEIDLER consiste principalmente en la función de una corriente pico de rayo en el dominio del tiempo elevándose exponencialmente en un determinado tiempo de frente, mientras que proporcionalmente disminuye en un intervalo de tiempo denominado como punto de la cola, caracterizando a fuente de rayo. La fuente HEIDLER se representa por la siguiente fórmula:

$$I(t) = \frac{I_0}{n} * \frac{k^n}{1 + k^n} * e^{-t/\tau}$$

Donde:

- $k = t/\tau$
- $\tau_1$ : Es una constante de tiempo de frente, proporcional a la duración del frente. Intervalo de tiempo  $t=0$  y  $t$ =tiempo del pico de la función.
- $\tau$ : Es una constante de tiempo proporcional a la duración de la descarga. Intervalo de tiempo  $t=0$  y tiempo de la cola donde la amplitud decae en un 37 % de su máximo valor pico.
- $I_0$ : Valor pico.
- $n$ : Constante de ajuste.
- $n$ : influencia de la tasa de crecimiento y el tiempo instantáneo de la máxima tasa de crecimiento.

Figura 31. Modelo de fuente de rayo ATPDraw



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW, versión 6.0 – 2015.

### **3.3. Información de entrada del caso de estudio**

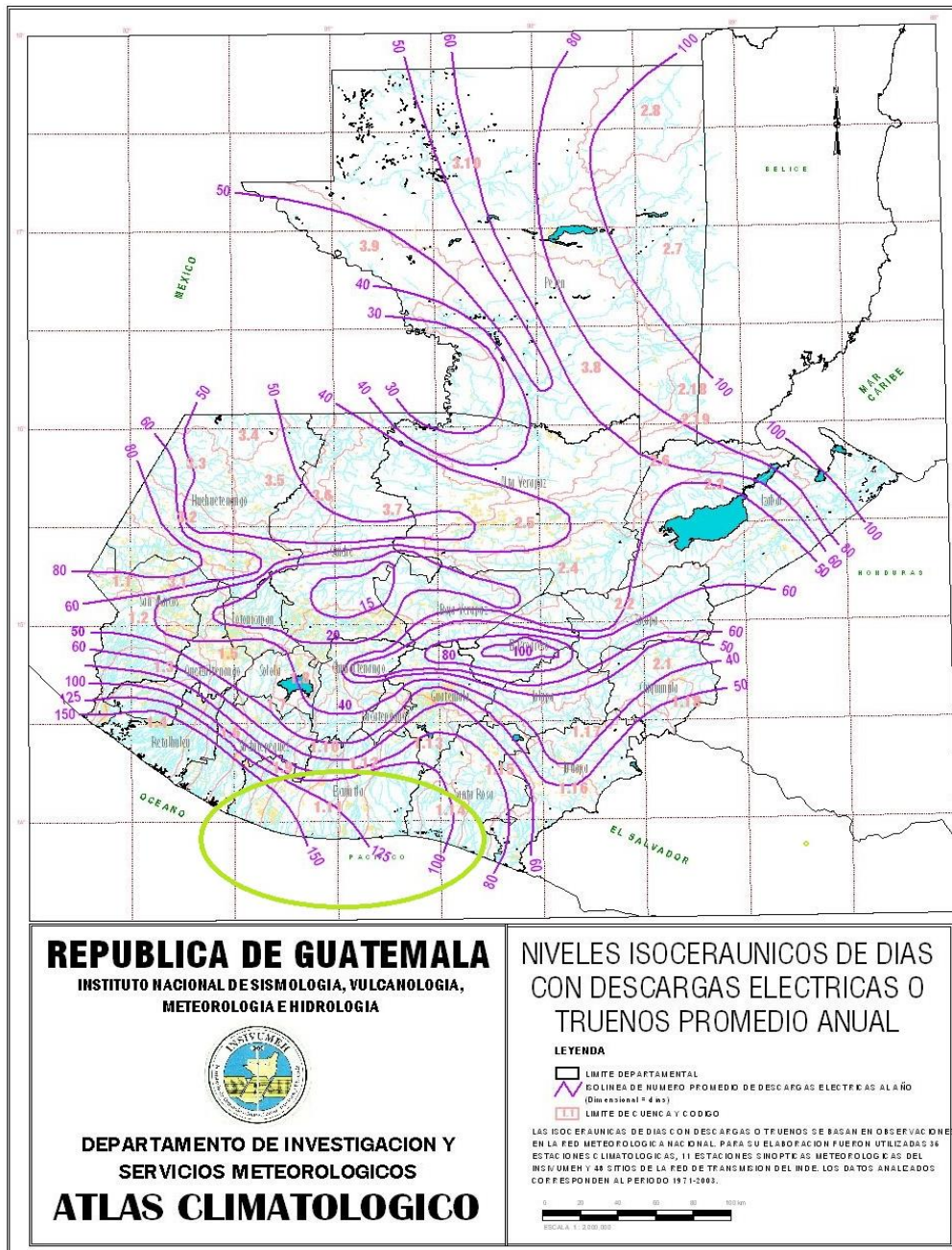
Este segmento indica la recopilación de información necesaria del sitio de evaluación, para compilar a los elementos modelados de la red de media y baja tensión en ATP.

#### **3.3.1. Localización de análisis de exposición**

Para el análisis de la ubicación, se considera el nivel de exposición y riesgo de una descarga de rayo en una instalación domiciliar. Para considerar el riesgo se determina por medio del nivel isoceráunico y se realiza a través de un mapa apropiado para visualizar la cantidad de descargas atmosféricas por kilómetro cuadrado anual.

Para ello se utilizará el mapa isoceráunico de Guatemala, se selecciona el departamento de Escuintla de la zona sur de la región de Guatemala, que comprende el nivel alto de riesgo de 150 descargas eléctricas por kilómetro cuadrado anual. En la siguiente imagen se puede visualizar lo indicado.

Figura 32. Niveles isoceraunicos de Guatemala



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Niveles isoceraunicos de Guatemala*. <https://insivumeh.gob.gt/institucional/que-es-meteorologia/>.

Consulta: 26 de julio de 2020.

### 3.3.2. Características técnicas y físicas de la zona de análisis

De acuerdo con la localización de análisis de riesgo, se distinguen las disposiciones físicas de las estructuras de media tensión en 13,8 kV por la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. EEGSA. En general, se consideró las siguientes características que alimentan al usuario final.

Tabla XVI. Características de estructuras en 13,8 kV

Descripción	Unidad	Valor
Numero de circuitos en estructura	Un	1
Tipo de circuito	--	Trifásico
Numero de cables de guarda	Un	1
Disposición de la estructura	--	Poste sencillo de concreto
Altura total del poste	m	14

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. Estructura de media tensión



Fuente: elaboración propia, empleando Google Maps.

Se examina la disposición física típica de las estructuras de baja tensión utilizadas en redes a 120/240 V, consultada en la norma técnica de acometidas e instalaciones eléctricas de EEGSA. Se detalla los componentes de la red de baja tensión de la región sur de Guatemala.

Tabla XVII. **Características técnicas de estructuras a 120/240 V**

Descripción	Unidad	Valor
Numero de circuitos de las estructuras	Un	1
Tipo de circuito	--	Monofásico bifilar (con neutro)
Numero de cables de guarda	Un	0
Disposición de la estructura	--	Sencillo

Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Resistividad y Resistencia de puesta a tierra

En la tabla a continuación se detalla la clasificación de las resistividades del suelo, tomada de la norma IEEE Std 81-2012 IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System.

Tabla XVIII. **Clasificación de resistividades de la norma  
IEEE Std 81-2012**

Earth resistivity ohm-meters	Quarternary	Cretaceous tertiary quarternary	Carboniferous triassic	Cambrian Ordovician Devonian	Precambrian and combination with Cambrian
1 Sea water		Loam Clay Chalk	Chalk Trap Diabase Shale	Shale Limestone Sandstone	Sandstone Quartzite Slate Granite Gneisses
10 Unusually low					
30 Very low					
100 Low			Limestone Sandstone		
300 Medium					
1000 High					
3000 Very high	Coarse sand and gravel in surface layers			Dolomite	
10 000 Unusually high					

Fuente: IEEE Standard 81-2012. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Eart Surface Potentials of a Grounding System.* p.11.

Se asignó un valor de resistividad del suelo de 2 000 ohm-metro, y se considera conservativo teniendo en cuenta que, si se toma un valor inferior, esto incide en menores magnitudes de sobretensiones por rayos. Además, valores como de 3 000 ohm-metro o mayores son considerados como inusuales para un sistema de energía eléctrica.

Para el valor de resistencia de puesta a tierra de un poste convencional de EEGSA, se toma el criterio máximo recomendado por la Norma técnicas de

Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución NTDOID de Guatemala, del artículo 33 que es de 25 ohmios para un sistema de un solo electrodo.

### **3.4. Simulación del modelo de caso estudio en ATPDRAW**

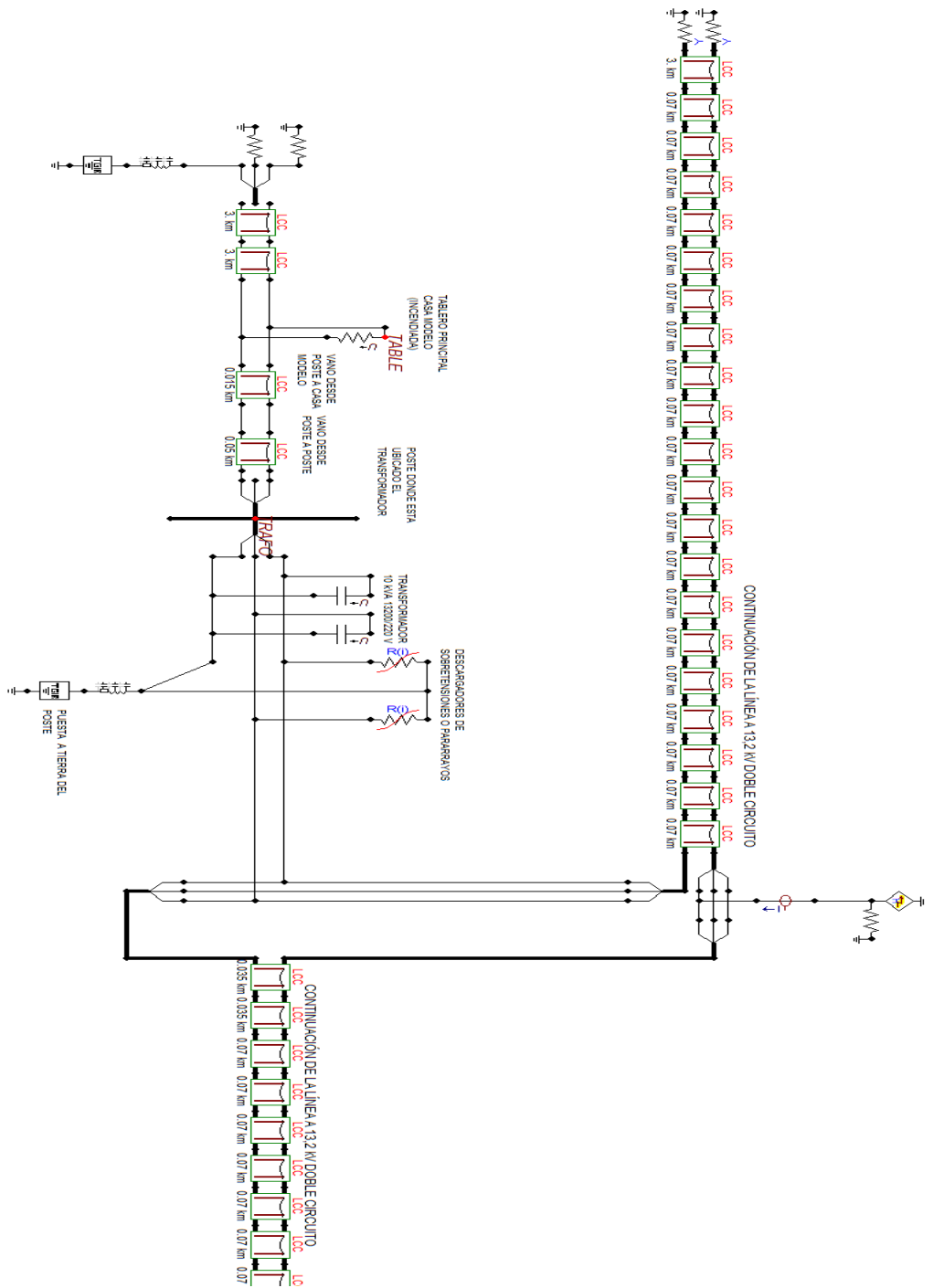
Para obtener sensibilidad con respecto a los efectos transitorios de los parámetros eléctricos de la red de distribución, se recopiló la información brindada por la Empresa Eléctrica de Guatemala, para una distribución de energía en 120/240 voltios; en el anexo A se indica la topología del circuito.

Se implementó en ATPDRAW los componentes de la red de distribución de EEGSA y la carga final al usuario, de los cuales se definieron anteriormente para utilizar en el modelo optimo en Guatemala, en la figura siguiente se puede observar simulado el caso de estudio implementado en ATPDRAW, se identifica el transformador monofásico convencional de 10 kVA y una carga de usuario para fines prácticos, así también la fuente de rayo de impacto en las líneas de distribución eléctrica en 13,8 kV.

Es muy importante mencionar, que para este caso de estudio inicial se consideró dos eventos, el primero comprende que la carga del usuario no se implementa la puesta a tierra. Debido a que muchos casos en Guatemala, los usuarios no implementan dicho elemento fundamental para subsanar sobretensiones del sistema eléctrico. El segundo implementado un sistema de puesta a tierra independiente, con el objeto de visualizar que efectos transitorios afecta al usuario y al sistema.



Figura 34. Escenario inicial- Modelo de caso de estudio



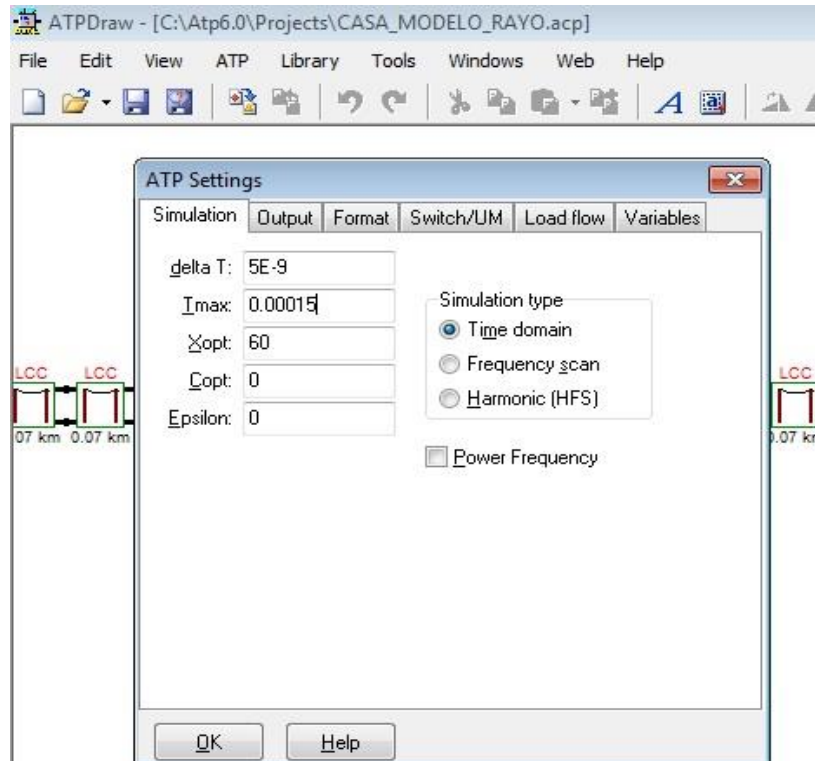
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW, versión 6.0 – 2015.

### **3.4.1. Circuito simulado 1 con protección del transformador monofásico y el impulso de onda 10/350 $\mu$ s – 10 kA**

Los impactos de rayo se simularon en el circuito a 13,8 kV ubicado en la parte superior del poste, no en el circuito al cual se conecta el transformador de 10 kVA, al estar uno encima del otro es muy poco probable que las descargas directas se presenten en el circuito inferior, el circuito superior lo apantallaría. No se considera analizar las sobretensiones ante impactos de rayo en la red a 240 V teniendo en cuenta que por ser una red que se encuentra por debajo de la línea a 13,8 kV es muy poco probable que se presenten descargas atmosféricas directas.

A continuación, se configura el software con los tiempos de simulación de acuerdo con la onda implementada, para una mejor visualización. Se define el tiempo máximo denominado Tmax y Delta T como el número de pasos de este. Para el caso de estudio se definió un tiempo máximo en 9 partes de ciclos de la onda, concretamente 0,009 ciclos de la onda proporcional a la frecuencia del sistema, y Delta T el valor aproximado de puntos en la señal en la gráfica, el cual se considera 30 001 puntos. En la siguiente imagen se visualizan los parámetros de simulación.

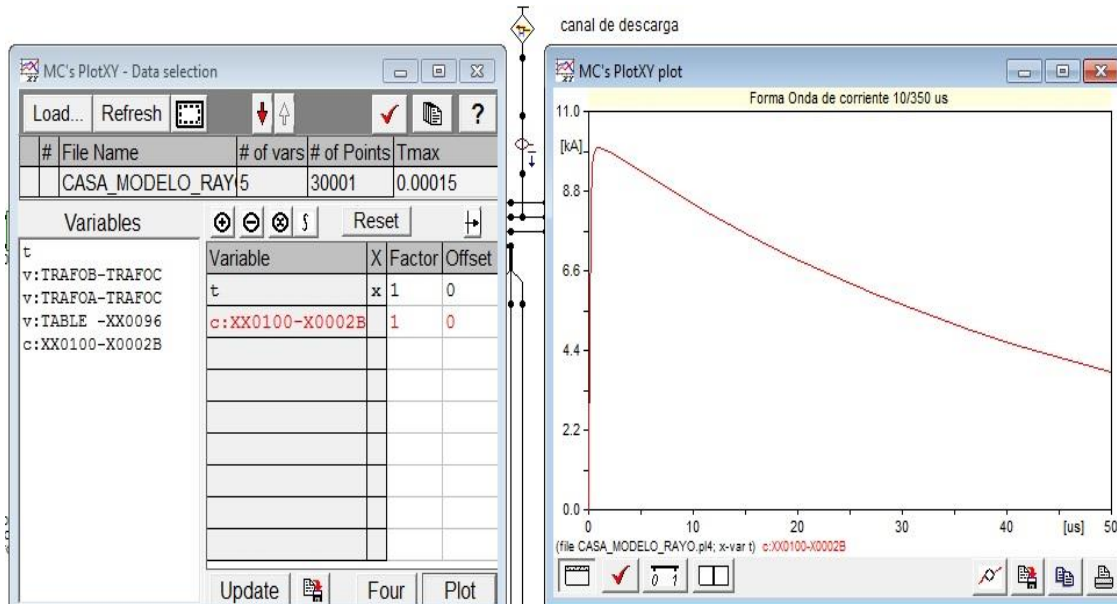
Figura 35. Configuración de ATPDRAW



Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW versión 6.0 – 2015.

Ahora para definir el impulso de onda, es conforme a la tabla IV, el punto de impacto de la descarga es cerca de la estructura, se cataloga un daño en S3 de acuerdo con la figura 10 y ajustado al modelo a una onda de corriente 10/350 us – 10 kA, de acuerdo con la norma IEC 62305-1, en la siguiente imagen se visualiza la onda implementada tipo HEIDLER TYPE 15.

Figura 36. **Forma de onda de la corriente de rayo 10 kA**

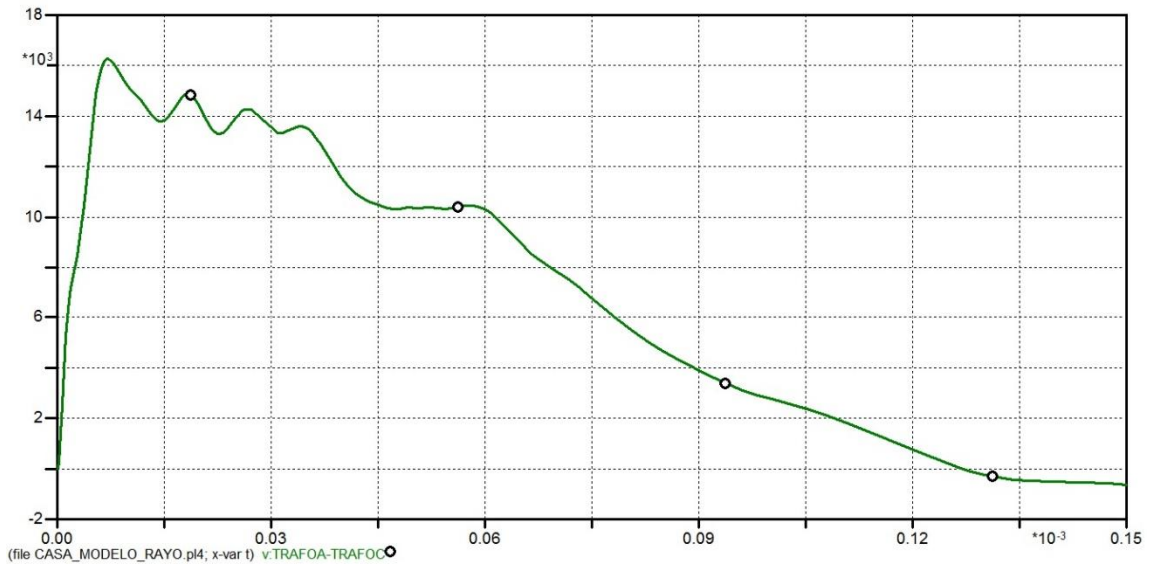


Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Como primer evento, se considera sin protección al tablero principal 120/240 V, y no se toma en cuenta el sistema de puesta a tierra. Mas adelante se analiza por medio de ATP, la importancia de estos elementos mencionados para mitigar la sobretensión transitoria en baja tensión.

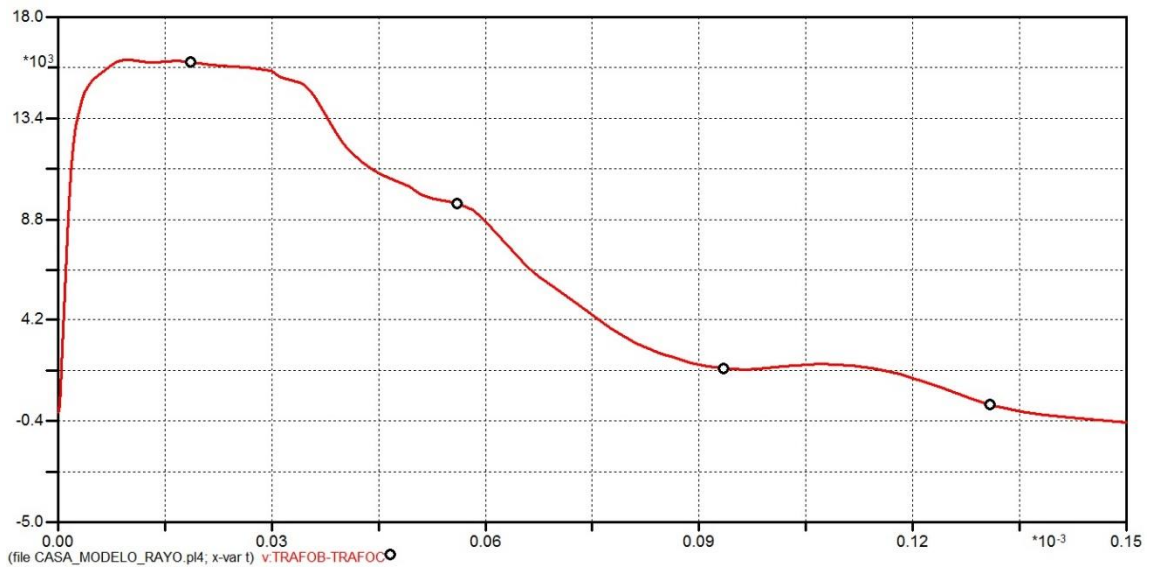
El proceso de la simulación en los puntos de medida y las ondas resultantes para un servicio monofásico sin protección al tablero principal, se muestra en la tabla XIX en los cuales se listan los resultados de las sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA impactando directamente una de las fases de la línea a 13,8 kV, considerando que no se cuenta con sistema de puesta a tierra.

Figura 37. Onda de tensión incidente en la fase A – C. Caso 1



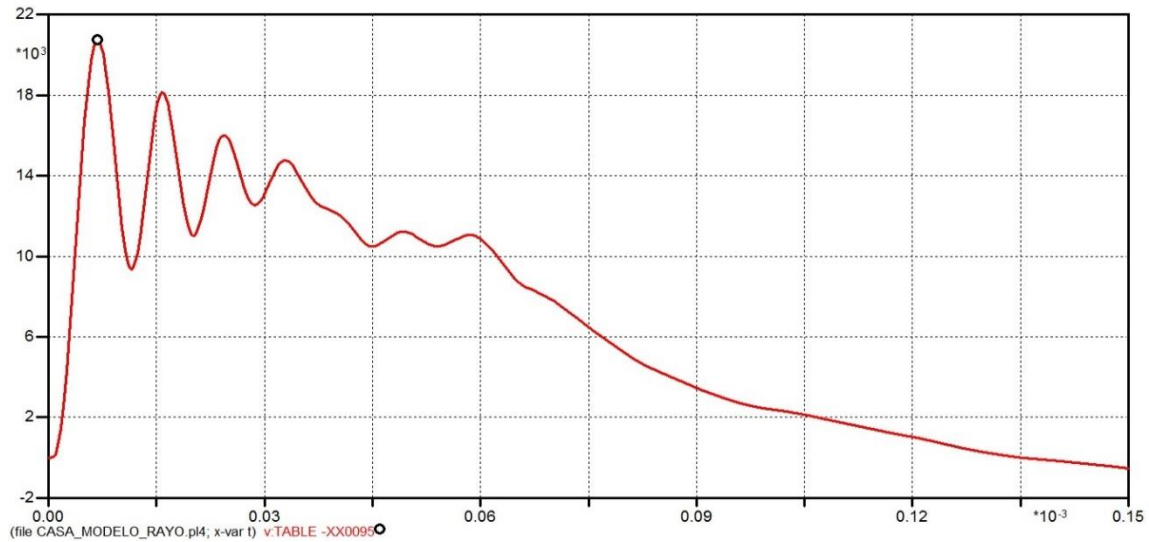
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 38. Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 1



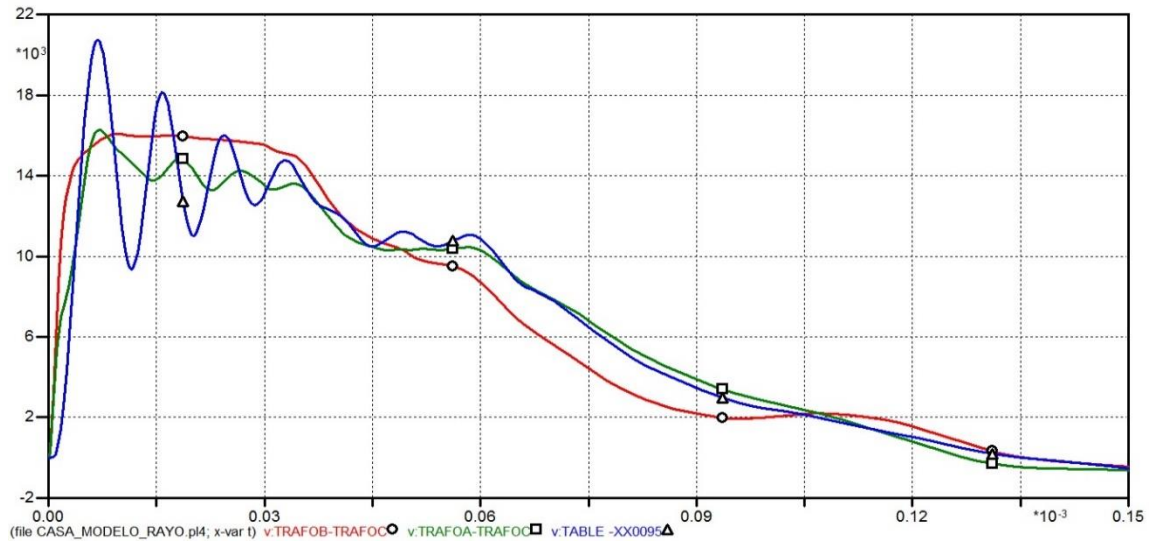
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 39. **Onda de tensión incidente en el tablero principal del usuario.**  
**Caso 1**



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 40. **Sobretensiones en los puntos de medida de Tensión. Caso 1**



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Tabla XIX. **Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 1**

Punto de la descarga atmosférica	Circuito y fase de la descarga atmosférica	Máximas sobretensiones presentadas	
		Punto de medida	Sobretensión (kVp)
Poste del transformador 10 kVA	Circuito superior Fase A	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16 065
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	16 271
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	20 746
	Circuito superior Fase B	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16 062
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	16 271
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	20 743
	Circuito superior Fase C	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16 063
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	16 271
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	20 740

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.1.1. Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 1

Los resultados demuestran que los descargadores de sobretensiones instalados en el poste del transformador de 10 kVA logran recortar la sobretensión hasta 16,2 kV pico en ese punto. Sin embargo, parte de la corriente

de la descarga se propaga en dirección a la casa residencial y por la impedancia de los elementos del sistema eléctrico que hay entre el poste mencionado y la carga del usuario, la sobretensión allí se incrementa, alcanzando 20,7 kV pico.

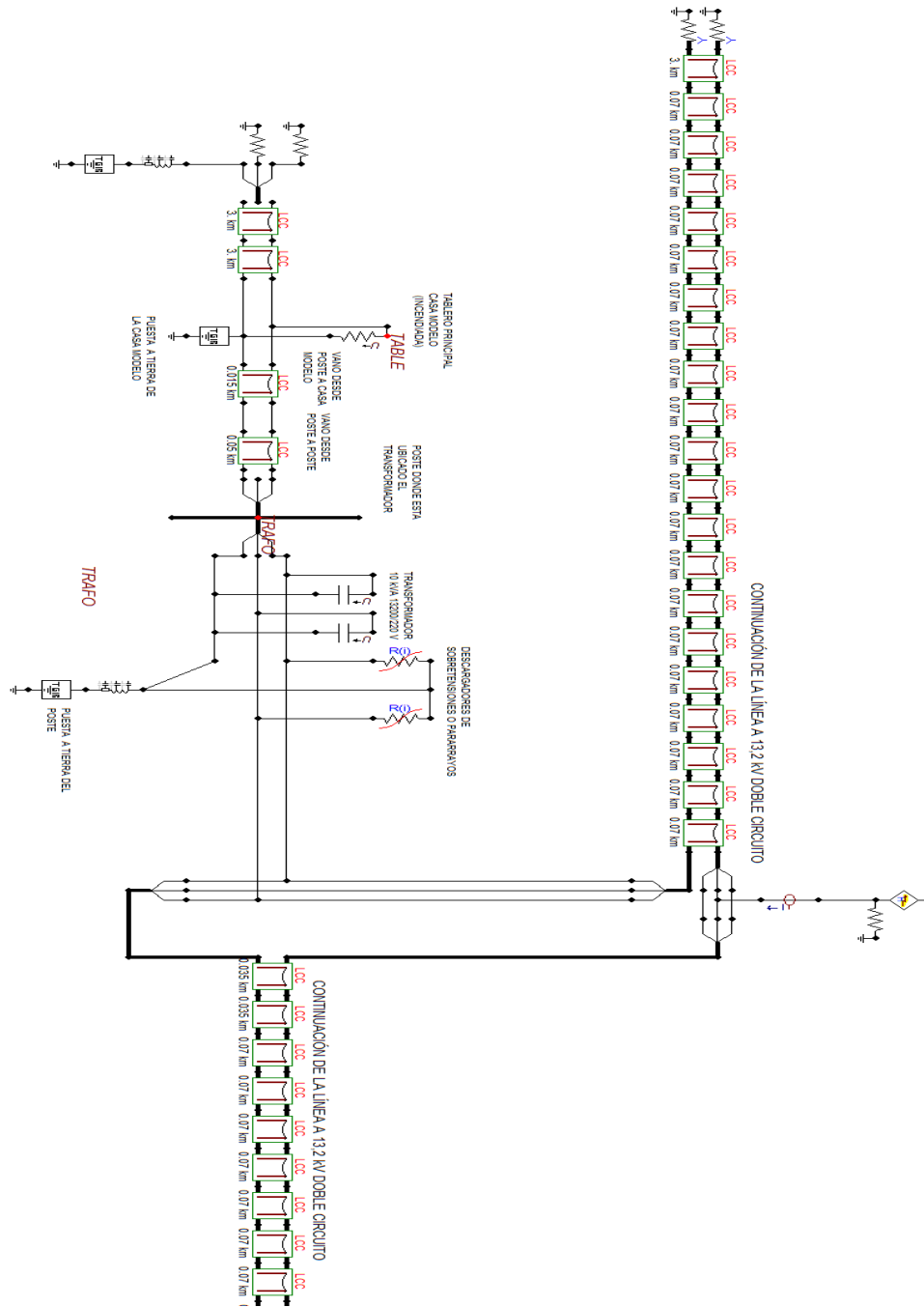
#### **3.4.2. Circuito simulado 2 con protección del transformador monofásico y el impulso de onda 10/350 $\mu$ s – 10 kA, con puesta a tierra en baja tensión**

Para este segundo caso de simulación se considera los datos parametrizados iniciales, ahora con la sensibilidad en el circuito que se agrega la puesta a tierra en la carga 120/240 V, para analizar cómo es el comportamiento en un sistema secundario no multiaterrizado, en la imagen siguiente se ilustra las condiciones.

Para este segundo proceso de simulación en los puntos de medida y las ondas resultantes para un servicio monofásico sin protección al usuario y con puesta a tierra, se muestra en la tabla XX en los cuales se listan los resultados de las sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA impactando directamente una de las fases de la línea a 13,2 kV.

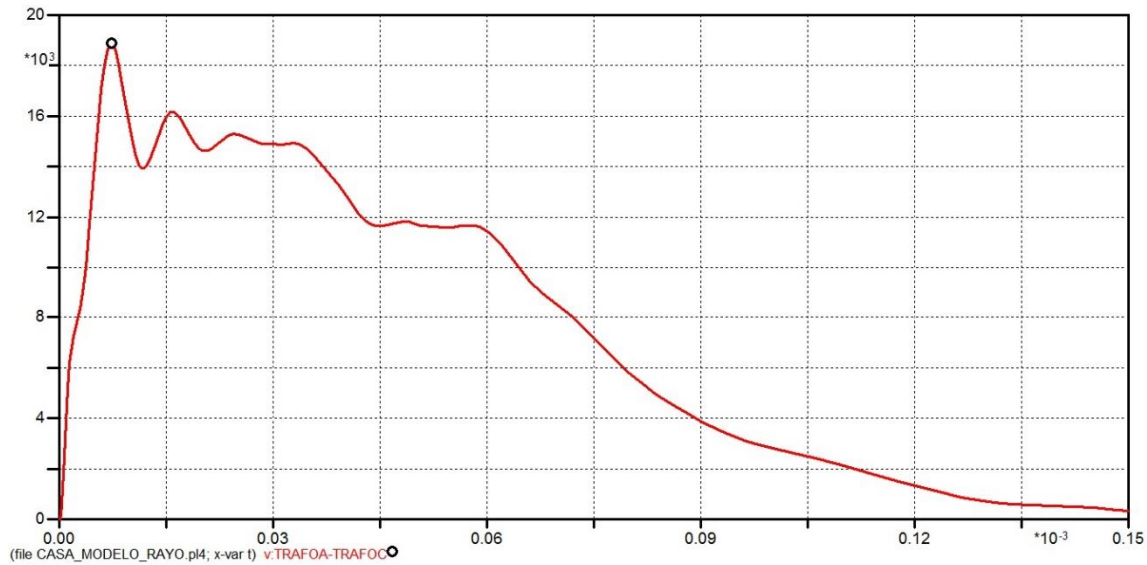


Figura 41. Escenario 2 – Circuito modelado con puesta a tierra en la casa residencial



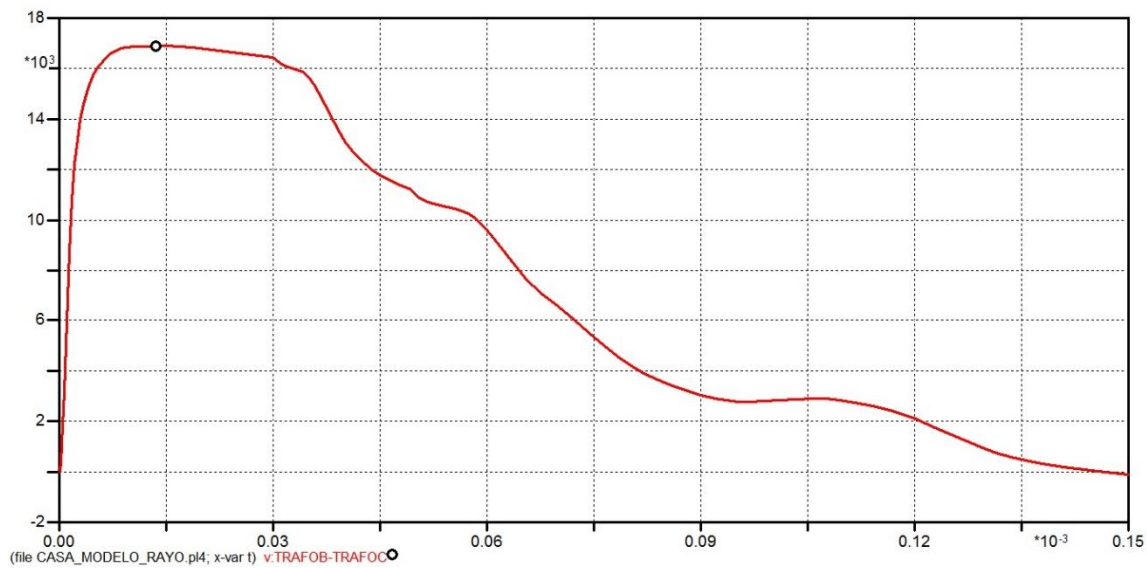
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW versión 6.0 – 2015.

Figura 42. Onda de tensión incidente en la fase A – C. Caso 2



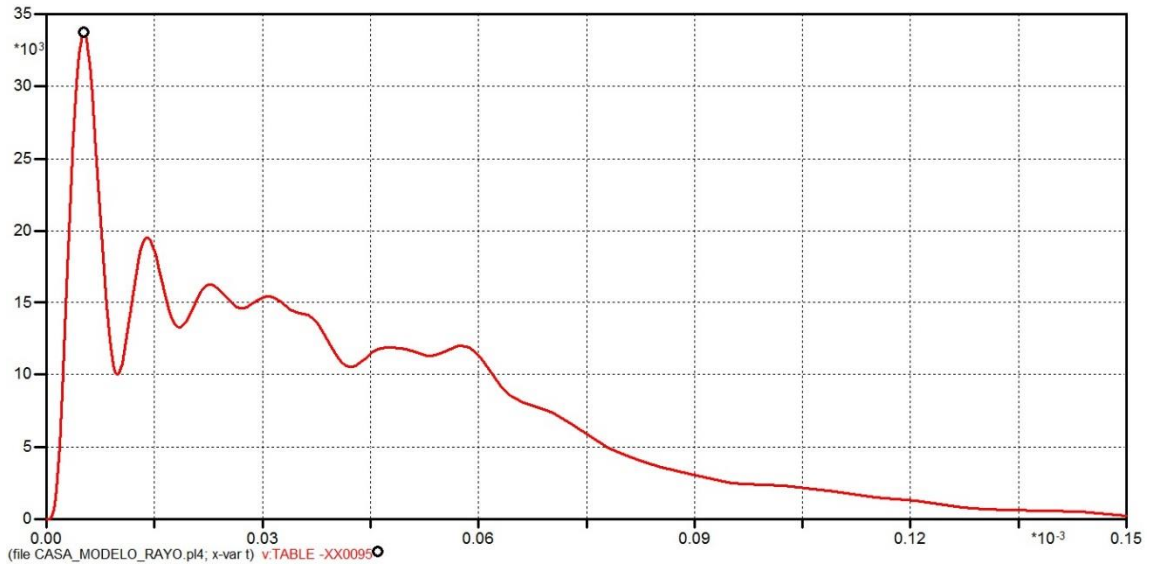
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 43. Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 2



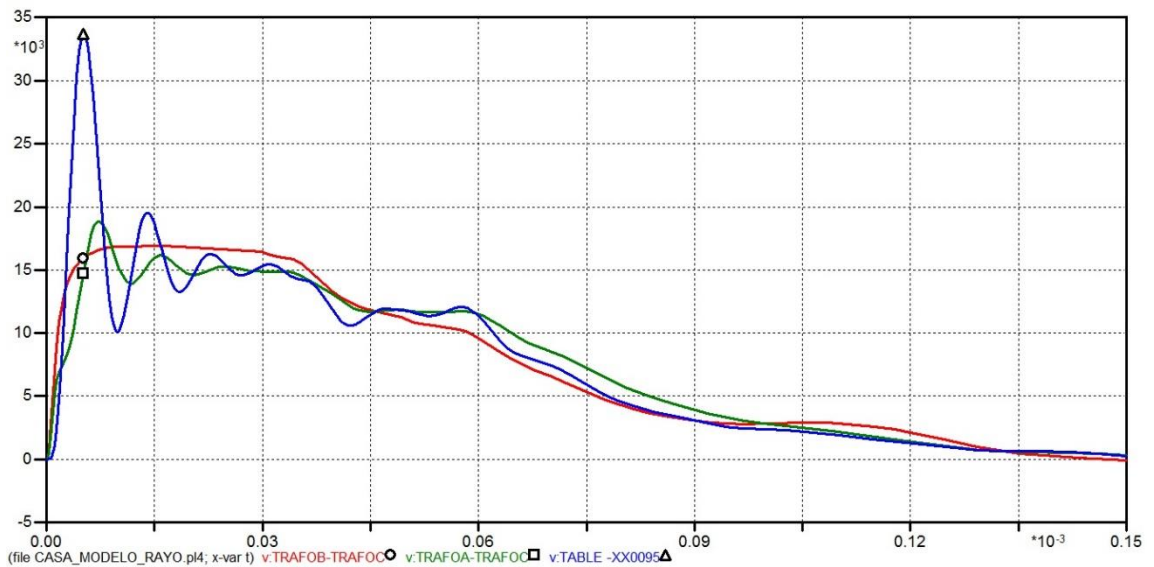
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 44. Onda de tensión incidente en el tablero principal del usuario.  
Caso 2



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 45. Sobretensiones en los puntos de medida de tensión. Caso 2



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Tabla XX. **Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 2, con puesta a tierra en 120/240 V**

Punto de la descarga atmosférica	Circuito y fase de la descarga atmosférica	Máximas sobretensiones presentadas	
		Punto de medida	Sobretensión (kVp)
Poste del transformador 10 kVA	Circuito superior Fase A	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16,901
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	18,867
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	33,719
	Circuito superior Fase B	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16,901
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	18,867
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	33,719
	Circuito superior Fase C	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	16,901
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	18,867
		Tablero principal casa modelo (Fase A – Neutro)	33,704

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2.1. Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 2

Los resultados demuestran que los descargadores de sobretensiones instalados en el poste del transformador de 10 kVA logran recortar la sobretensión hasta 18,8 kV pico en ese punto. Sin embargo, parte de la corriente de la descarga se propaga en dirección a la carga del usuario y por la impedancia

de los elementos del sistema eléctrico que hay entre el poste mencionado y la casa modelo, la sobretensión allí se incrementa, alcanzando 33,7 kV pico. Siendo este último valor mayor que para el escenario No 1 debido a que, al contar con sistema de puesta a tierra en la casa residencial, en un sistema eléctrico que no es multiaterrizado, esto incide en la presencia de mayor corriente hacia el punto donde está la puesta tierra y a su vez mayor sobretensión. Sin embargo, entre menor sea la impedancia, para otras acometidas adyacentes al punto de la descarga, menor serán los efectos del rayo en estos.



## **4. COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIONES EN BAJA TENSIÓN**

### **4.1. Generalidades**

Las redes de baja tensión en Guatemala son sistemas grandes que se suministran a diferentes cargas como resistivas, inductivas y algunos casos capacitivos. Para este sistema de distribución eléctrica se vuelve complicado la implementación de un dispositivo de protección porque se debe considerar especificaciones técnicas de equipos, pruebas de resistividad, niveles de soportabilidad y sistemas de puesta a tierra.

Como resultado de este apartado, se enfoca analizar las variables eléctricas anteriores, con el objeto implementar una mejora y por último aplicar la selección de dispositivos de protecciones en baja tensión.

### **4.2. Análisis de sensibilidad en baja tensión 120/240 V**

Para un análisis de sensibilidad en cualquier sistema eléctrico y de nivel de tensión, se enfoca en el analizar varios comportamientos del sistema y considerando varios eventos. Para el caso de estudio en 120/240 V, se emplea de la siguiente manera.

#### **4.2.1. Premisas de medidas de protección**

Esta parte establece los criterios mínimos de protección para un DPS en baja tensión 120/240 V utilizando normas internacionales para definir las características técnicas garantizadas del dispositivo.

##### **4.2.1.1. Evaluación de fallas de aislamiento**

Para la coordinación de aislamiento en baja tensión se debe analizar, si el sistema eléctrico puede limitar posibles sobretensiones. Para el caso estudio en consonancia con el circuito modelado, sufre sobretensiones pico en la entrada del tablero general superando los niveles de tensión máxima de 4 000 V.

Conforme a la norma IEC 60664-1, se debe categorizar como: Control de protección, y se debe implementar un medio de atenuación de sobretensión con valores específicos.

##### **4.2.1.2. Análisis del sistema de puesta a tierra**

En los anteriores casos de estudio simulados, se analizó el sistema puesta tierra del sistema de lado de baja, lo cual originó un pico de voltaje extremadamente alto, por considerar un sistema de puesta tierra independiente.

Un factor importante para mejorar seguridad operativa es el electrodo que se coloca en conjunto con el tablero general 120/240 V de las diferentes cargas y esto se complementa con el método de puesta a tierra TT de la empresa distribuidora, el cual indica que el transformador del neutro de lado de baja tensión este puesto a tierra y la carcasa aterrizada independientemente.



Es muy relevante categorizar el sistema de puesta a tierra, porque se asocia a una mejor operación de las protecciones contra sobretensiones.

#### 4.2.2. Consideraciones técnicas de sistema de protección en 240 V

Como primera consideración es analizar la fuente de sobretensión que podrían causar daños a una instalación residencial o comercial y después se categoriza conforme a la norma IEC 62305-1. Aplicando para el caso de análisis, la fuente de daño se indica en la tabla XXI.

Tabla XXI. Fuente de sobretensión en baja tensión

Caso de estudio	Categoría de daño	Fuente de daño	Nivel de sobretensión
Escuintla, Guatemala	S4	Descargas atmosféricas indirectas en línea	8/20 $\mu$ s – 5 kA

Fuente: elaboración propia.

##### 4.2.2.1. Determinación de zona de protección

La zona de protección es fundamental para entender que elemento del sistema eléctrico se desea proteger. Siempre está relacionado con la fuente de daño, tipo de sobretensión y medio de protección a implementar. Considerando lo anterior, la zona definida para el estudio se muestra en la tabla siguiente.

Tabla XXII. **Zona de protección en baja tensión**

<b>Caso de estudio</b>	<b>Categoría de zona</b>	<b>Clase de descargador</b>	<b>Protección de sobretensión</b>
Escuintla, Guatemala	Zona de protección 1 (Tablero General 120/240 V)	Descargador de sobretensión clase 2	8/20 $\mu$ s – 10 kA

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.2.2. Selección de protección contra sobretensión en 240 V**

Los dispositivos de protección se pueden seleccionar por su ubicación y a su capacidad. De las dos opciones se selecciona en base a su capacidad, con el objetivo garantizar las características técnicas del sistema eléctrico y puedan resistir el aislamiento contra sobretensiones.

En capítulos anteriores se mencionaron dos normas internacionales adecuadas para la selección del DPS en baja tensión de ellas es la norma IEC 61643-SERIES y la norma ANSI IEEE C62.41. Pero depende de la filosofía de la norma que se aplique, sin embargo, los parámetros fundamentales son similares independientemente del tipo de ensayos que cumpla el DPS. Por un amplio contenido y robustez se enfoca en la norma IEC. A continuación, se detalla las características técnicas para el método de selección de un DPS en baja tensión 240 V, conforme a lo descrito en la norma IEC 61643-12.

Tabla XXIII. **Características técnicas garantizadas de selección de DPS en 240 V**

1	CARACTERISTICAS TECNICAS ENTRADA	UNIDA D	
1.1	Tensión nominal $U_0$	V	240
1.2	Frecuencia	Hz	60
1.3	Sistema de puesta a tierra		TT
1.4	Uso		Residencial o comercial
7	CLASIFICACION DPS		
	Números de puertos		2
	Diseño de topología		Varistor
	Clase DPS		2
	Operación de temperatura -5 °C a + 40 °C		SI
2	SELECCIÓN DPS		
2.1	Voltaje máximo de operación continuo $U_{cs}=(1,1xU_0)$	V	264
2.2	Sobretensión temporal (1 200+ $U_{cs}$ )	V	1 464
2.3	Corriente nominal	kA	10
2.4	Corriente de impulso 8/20 us	kA	10
3	DISTANCIA DE PROTECCIÓN		
3.1	Localización del DPS		Tablero general
4	PROSPECTIVO DE VIDA Y MODOS DE FALLA		
4.1	Consideración técnica		SI
5	INTERRACION ENTRE EL DPS Y OTROS DISPOSITIVOS		
5.1	Condiciones normales		SI
5.2	Condiciones de Falla		NO
5.3	Coordinación de protecciones		NO
6	SELECCIÓN NIVEL DE PROTECCIÓN		
6.1	Nivel de protección	kV	Del fabricante

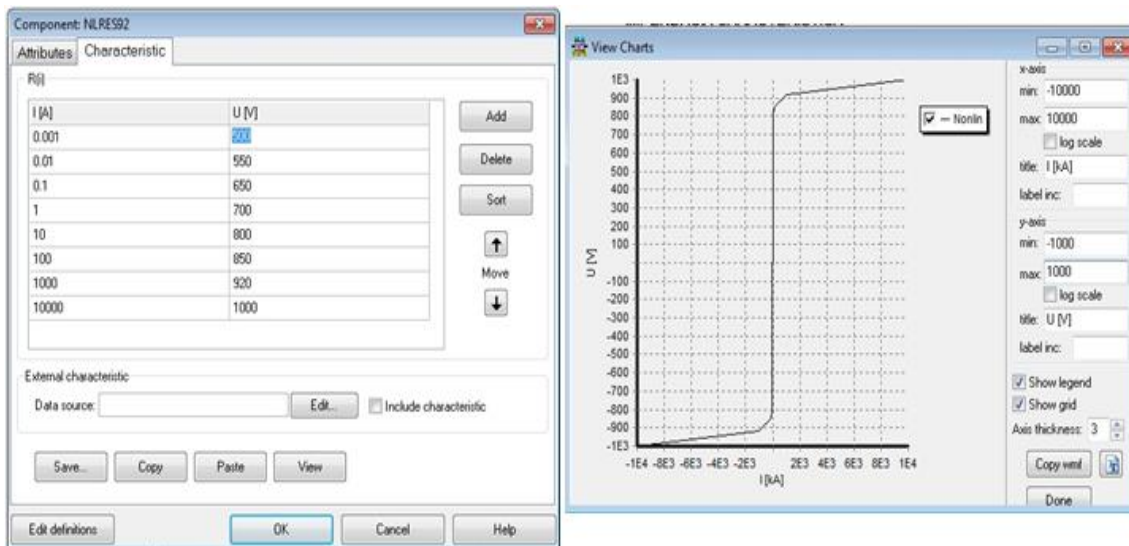
Fuente: elaboración propia.

### 4.3. Evento simulado con protección en el tablero principal 120/240 V

A continuación, se implementa el varistor en baja tensión 120/240 V, con las características garantizadas evaluadas para el tablero general. De tal forma, se sigue con el sistema estudiado en una línea de 13,8 kV conectada al secundario del transformador monofásico, donde está autoprotegido por dispositivos de supresión.

En la siguiente imagen, se muestra los valores de la curva I-V del descargador seleccionado V230LA10CP, MOV de 250 V, del fabricante LITELFUSE.

Figura 46. Descargador MOV de 250 V, para tablero principal

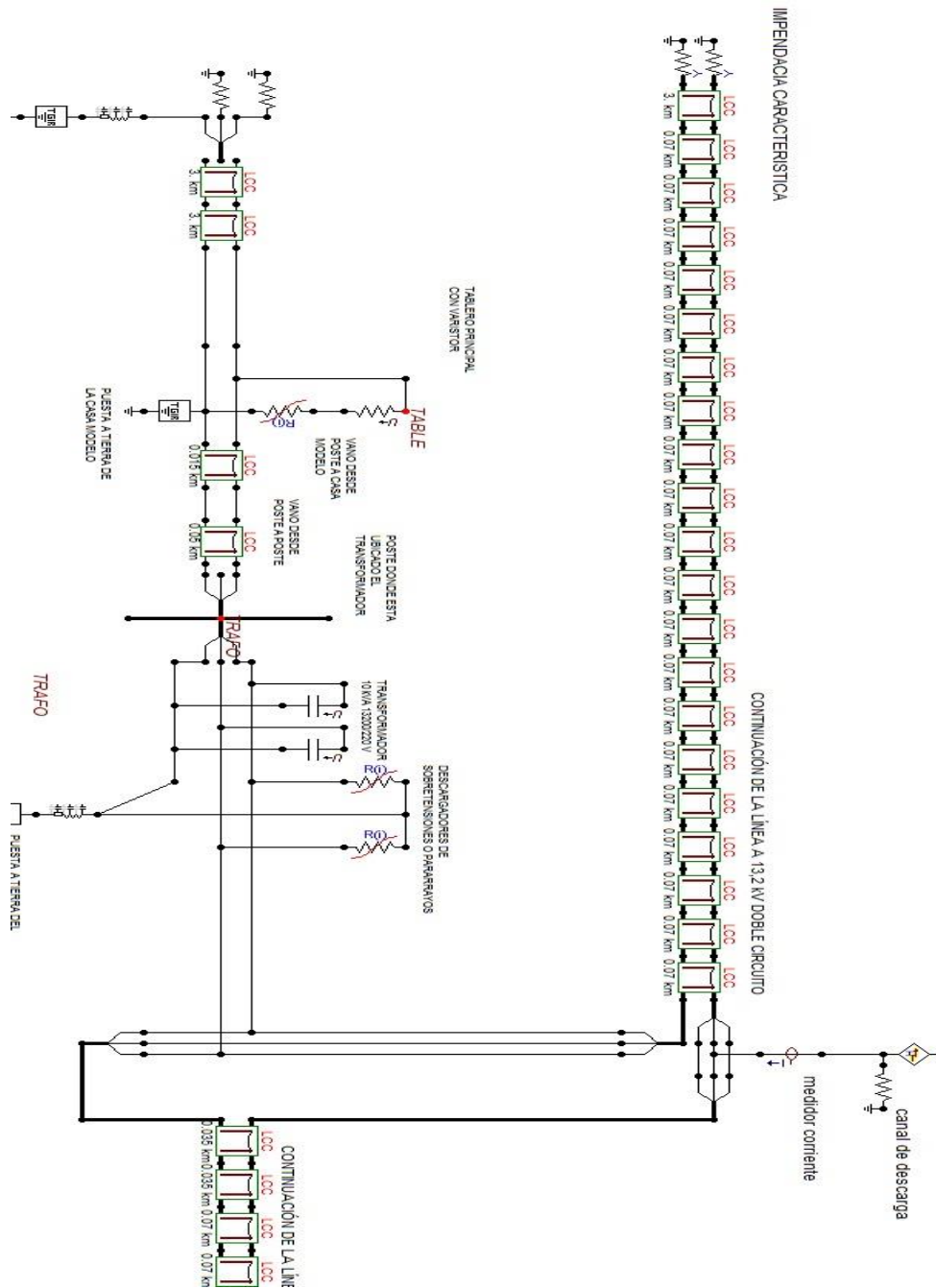


Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW versión 6.0 – 2015.

**4.3.1.1. Circuito simulado 3 con protección en el tablero general monofásico 120/240 V y a un impulso de onda 8/20  $\mu$ s – 10 kA, con puesta a tierra**

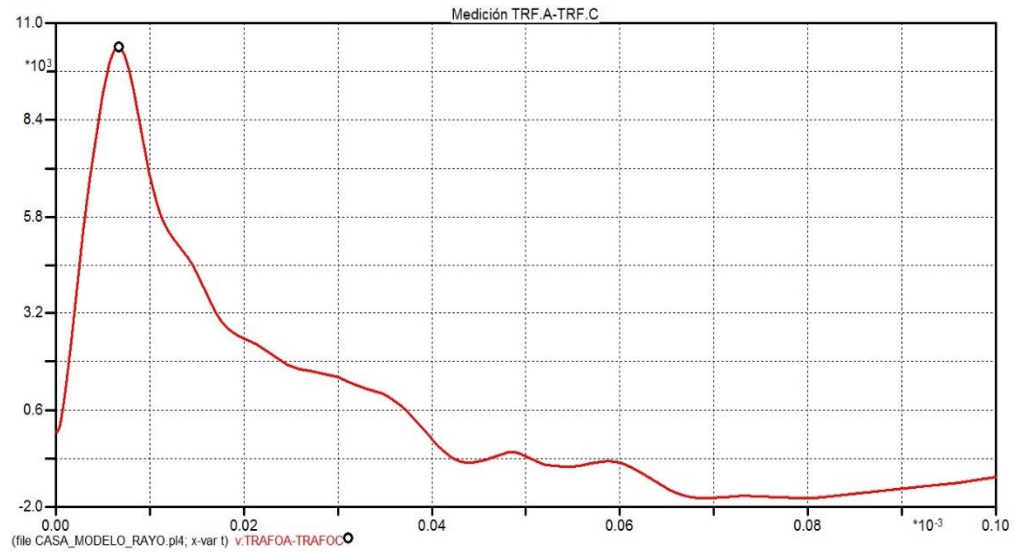
Se implementa el sistema de protección en el tablero general 120/240 V y en cuanto a la descarga atmosférica se aplica un impulso de 8/20  $\mu$ s y considerando el sistema de distribución con puesta a tierra multiaterrizado. La siguiente imagen muestra el circuito modelado en ATPDRAW.

Figura 47. Escenario 3 – Circuito modelado con varistor en el tablero principal, a un impulso de onda 8/20  $\mu$ s



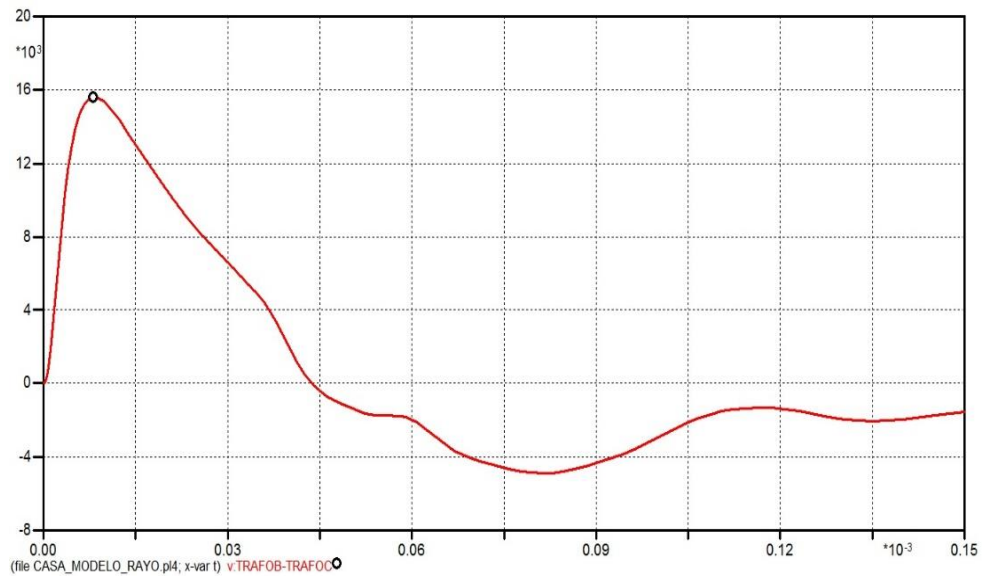
Fuente: elaboración propia, empleando ATPDRAW versión 6.0 – 2015.

Figura 48. Onda de tensión incidente en la fase A – C. caso 3



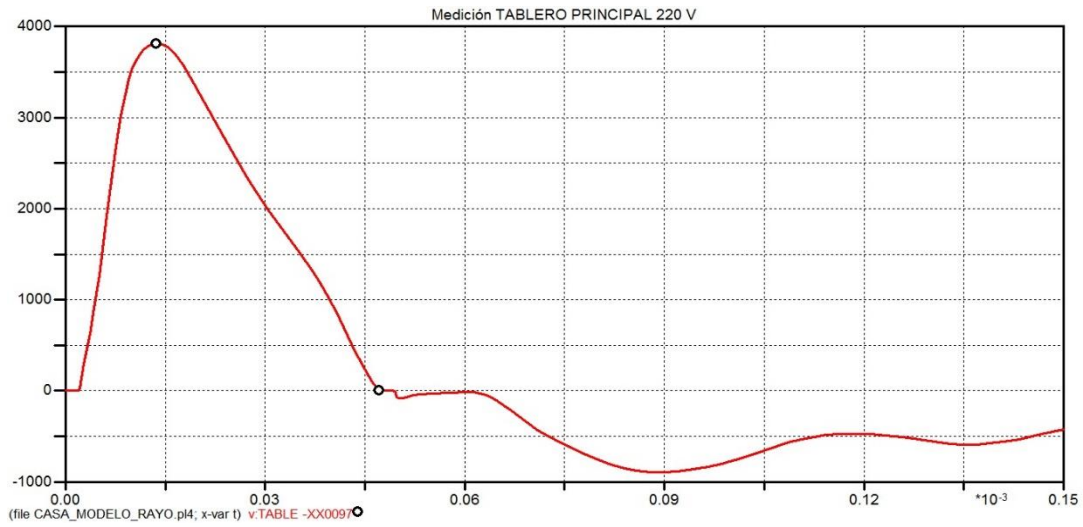
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 49. Onda de tensión incidente en la fase B – C. Caso 3



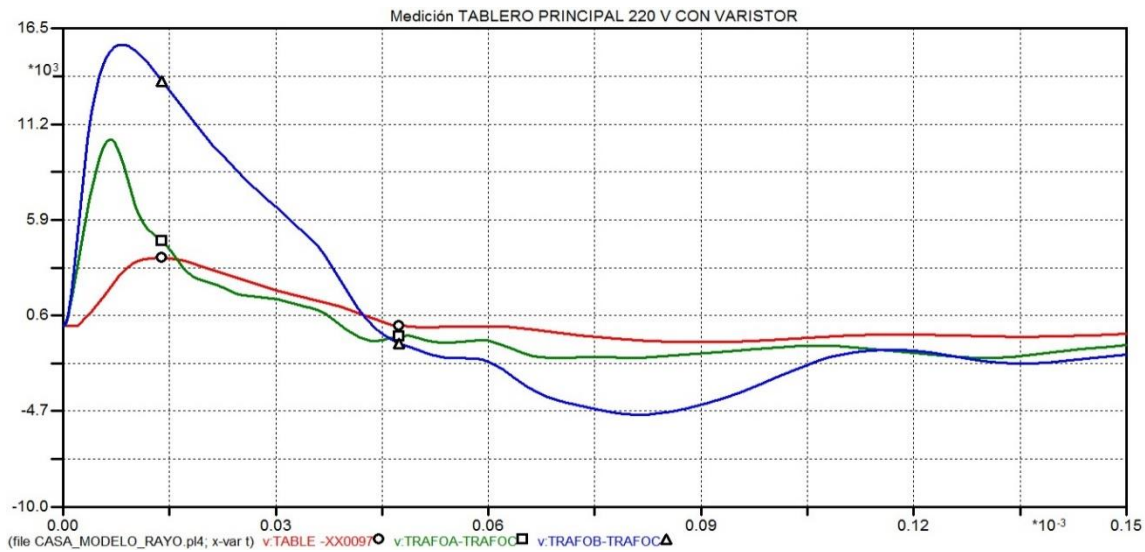
Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 50. **Onda de tensión incidente en el tablero principal con varistor. Caso 3**



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.

Figura 51. **Sobretensiones en los puntos de medida. Caso 3**



Fuente: elaboración propia, empleando ATP PlotXY versión 6.0 – 2015.



Tabla XXIV. **Sobretensiones por rayo para una descarga atmosférica de 10 kA - Caso 3, con protección en el tablero general**

Punto de la descarga atmosférica	Circuito y fase de la descarga atmosférica	Máximas sobretensiones presentadas	
		Punto de medida	Sobretensión (kVp)
Poste del transformador 10 kVA	Circuito superior Fase A	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	15 591
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	10 359
		Tablero principal casa modelo con varistor (Fase A – Neutro)	3 805
	Circuito superior Fase B	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	15 591
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	10 359
		Tablero principal casa modelo con varistor (Fase A – Neutro)	3 805
	Circuito superior Fase C	Transformador 10 kVA (Fase A – Neutro)	15 591
		Transformador 10 kVA (Fase C – Neutro)	10 359
		Tablero principal casa modelo con varistor (Fase A – Neutro)	3 805

Fuente: elaboración propia.

#### **4.3.1.2. Interpretación de resultados de sobretensiones en los puntos de medida – Caso 3**

Aplicando una onda de 10 kA en una de las fases, se observa en la tabla XXVI que los niveles de sobretensión transitoria disminuyen, esto es debido al sistema de puesta a tierra es multiaterrizado, que distribuye la corriente a todas

las cargas conectadas con su puesta a tierra y reduce de esa manera la impedancia proporcionalmente estabilizar la tensión.

Esto mejora la confiabilidad del sistema, reduciendo las sobretensiones pico a la vez resguardando el transformador y normalizando la tensión de soportabilidad en el tablero general de 120/240 V alcanzado 3,8 kV pico. También viene acompañado del uso correcto de las variables eléctricas del descargador MOV en el tablero que dirige la corriente de falla al sistema de tierra.

Es muy importante mencionar que el trabajo paralelo del dispositivo de protección, así como los sistemas de tierra han sido fundamentales para la operación de la protección, y proteger la carga conectada.

#### **4.4. Premisas económicas para implementación del sistema de protección**

Después de finalizar el análisis técnico con la implementación de un dispositivo de protección de sobretensión para baja tensión para el sector residencial y comercial en 120/240 V. Ahora es importante detallar y conocer el coste de la implementación de un DPS en baja tensión en Guatemala.

##### **4.4.1. Consignación de materiales**

En la actualidad la Empresa Eléctrica de Guatemala no contempla en una instalación nueva monofásica de 120/240 V, los costos presentados en la siguiente tabla y, por consiguiente, la compra de materiales sería abordado por el cliente.

Es importante precisar que para una nueva instalación y los costos de servicio de EEGSA comprende lo siguiente:

- Costos de acometida y medidor
- Mano de obra para la instalación de acometida y medidor
- Materiales para la acometida y medidor

En consecuencia, para los costos para el cliente con una protección en su tablero principal, no se toma en cuenta los anteriores elementos mencionados. Conjuntamente se tiene en cuenta varias ofertas del mercado eléctrico de Guatemala para el DPS con el objeto de evaluar el sobrecosto para un sistema de protección en baja tensión 120/240V.

Tabla XXV. **Detalle de materiales para implementación de DPS de 10 kA para un nuevo servicio en baja tensión 120/240 V – Oferta 1**

Nombre del Material	parámetro	Cantidad	Precio por unidad	Total
Interruptor termomagnético de 2 polos, 50 Amperios	unidad	1	Q 84,33	Q 84,33
Varilla de cobre para tierra 5/8" x 8'	unidad	1	Q 36,70	Q 36,70
Conector perno partido	unidad	1	Q 23,00	Q 23,00
Cable THHN Número 8 de cobre	metro	4	Q 6,84	Q 27,36
Tablero principal monofásico de 8 circuitos 125 Amperios	unidad	1	Q 215,00	Q 215,00
Dispositivo de protección para sobretensiones marca WEG Modelo SPW / 1 polo 10 kA	unidad	2	Q 139,50	Q 279,00
<b>Total</b>				<b>Q 665,39</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Detalle de materiales para implementación de DPS de 10 kA para un nuevo servicio en baja tensión 120/240 V – Oferta 2**

Nombre del Material	parámetro	Cantidad	Precio por unidad	Total
Interrupor termomagnético de 2 polos, 50 Amperios	unidad	1	Q 84,33	Q 84,33
Varilla de cobre para tierra 5/8" x 8'	unidad	1	Q 36,70	Q 36,70
Conector perno partido	unidad	1	Q 23,00	Q 23,00
Cable THHN Número 8 de cobre	metro	4	Q 6,84	Q 27,36
Tablero principal monofásico de 8 circuitos 125 Amperios	unidad	1	Q 215,00	Q 215,00
Dispositivo de protección para sobretensiones marca PROSUGE Modelo SP550 / 1 polo 10 kA	unidad	2	Q 175,00	Q 350,00
<b>Total</b>				<b>Q 736,39</b>

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Detalle de materiales para implementación de DPS de 10 kA para un nuevo servicio en baja tensión 120/240 V – Oferta 3**

Nombre del Material	parámetro	Cantidad	Precio por unidad	Total
Interrupor termomagnético de 2 polos, 50 Amperios	unidad	1	Q 84,33	Q 84,33
Varilla de cobre para tierra 5/8" x 8'	unidad	1	Q 36,70	Q 36,70
Conector perno partido	unidad	1	Q 23,00	Q 23,00
Cable THHN Número 8 de cobre	metro	4	Q 6,84	Q 27,36
Tablero principal monofásico de 8 circuitos 125 Amperios	unidad	1	Q 215,00	Q 215,00
Dispositivo de protección para sobretensiones marca SIEMENS/ 1 polo 10 kA	unidad	2	Q 350,00	Q 700,00
<b>Total</b>				<b>Q 1 086,39</b>

Fuente: elaboración propia.

#### **4.4.2. Valoración de sobrecostos**

Se puede observar de las tablas anteriores que el monto de inversión de materiales para la implementación de una protección en el tablero principal empleando un DPS, está en un promedio de Q 839,00. Es un valor económico viable, pero se debe analizar más características sociales, indemnizaciones por la distribuidora, costo de mano obra y otras variables de seguridad eléctrica.

Es importante también examinar la posibilidad de un acuerdo de inversión compartida con la distribuidora de energía eléctrica y el usuario, porque es un beneficio bilateral debido a que los elementos eléctricos de ambos se protegen de sobretensiones transferidas, así como el deterioro del aislamiento de los equipos en ambas fronteras.



## CONCLUSIONES

1. Los resultados presentados en el capítulo 4 de la tabla XXIV se determina que la sobretensión transitoria de mayor amplitud no siempre causa la transferencia de mayor tensión al secundario.
2. Las sobretensiones simuladas en el capítulo 4 de la tabla XXIV en el tablero Principal generan en el orden de 3,8 kVp, lo cual puede causar daños a los consumidores. Sin embargo, la amplitud de la sobretensión no es lo suficientemente alta para que actúe los DPS, prácticamente toda la tensión se dispersa en el sistema de puesta a tierra multiaterrizado.
3. Considerando la instalación en baja tensión de un sistema de puesta a tierra multiaterrizado y con su sistema de protección DPS tipo MOV en la misma, se comprueba de acuerdo con la tabla II del capítulo 1, que los resultados de un control de protección exhaustiva no supera el límite de soportabilidad para equipos a 120 V – 240 V.
4. Los casos simulados de la tabla XX del capítulo 3 en el punto de medida de baja tensión alcanzan mayor amplitud de tensión fase – neutro que corresponde al secundario del transformador debido a un sistema de tierra independiente y pocos usuarios conectados a la red.
5. La instalación de los DPS en baja tensión 240 V implementado en el capítulo 4, garantiza niveles de tensión soportables sólo en los puntos de selección donde hayan sido instalado.





## RECOMENDACIONES

1. Se propone a la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Facultad de Ingeniería, de la Universidad San Carlos de Guatemala implementar el uso del programa ATP, para simular indefinidos sistemas eléctricos en los laboratorios de Circuitos I-II y Análisis de Sistemas de Potencia, con el objeto de que el estudiante pueda utilizarlo en su vida profesional.
2. A pesar de que se cuenta con descargadores de sobretensiones DPS instalados en el transformador de distribución de 10 kVA, por el riesgo evidente de rayos en la zona de costa sur, se favorece instalar DPS en el tablero principal del usuario que permitan contrarrestar este fenómeno. La selección del tipo de descargadores y de los puntos donde se instalarán debe obedecer a un análisis de ingeniería.
3. Estudiar más el comportamiento de una sobretensión en una red de baja tensión por las variables del sistema que es muy complejo tales como descarga directa a la red secundaria, tensiones inducidas por descargas indirectas y tensiones transferidas debido a descargas directas a la red primaria.
4. Crear otros modelos adecuados en ATP para la representación del transformador de distribución en un rango de frecuencias y tensiones utilizadas en Guatemala.

5. Implementar otras características para el análisis de sobretensiones transitorios en el caso de configuraciones de redes secundarias reales, tales como la medición de la resistencia de puesta a tierra, impedancia y potenciales superficiales.

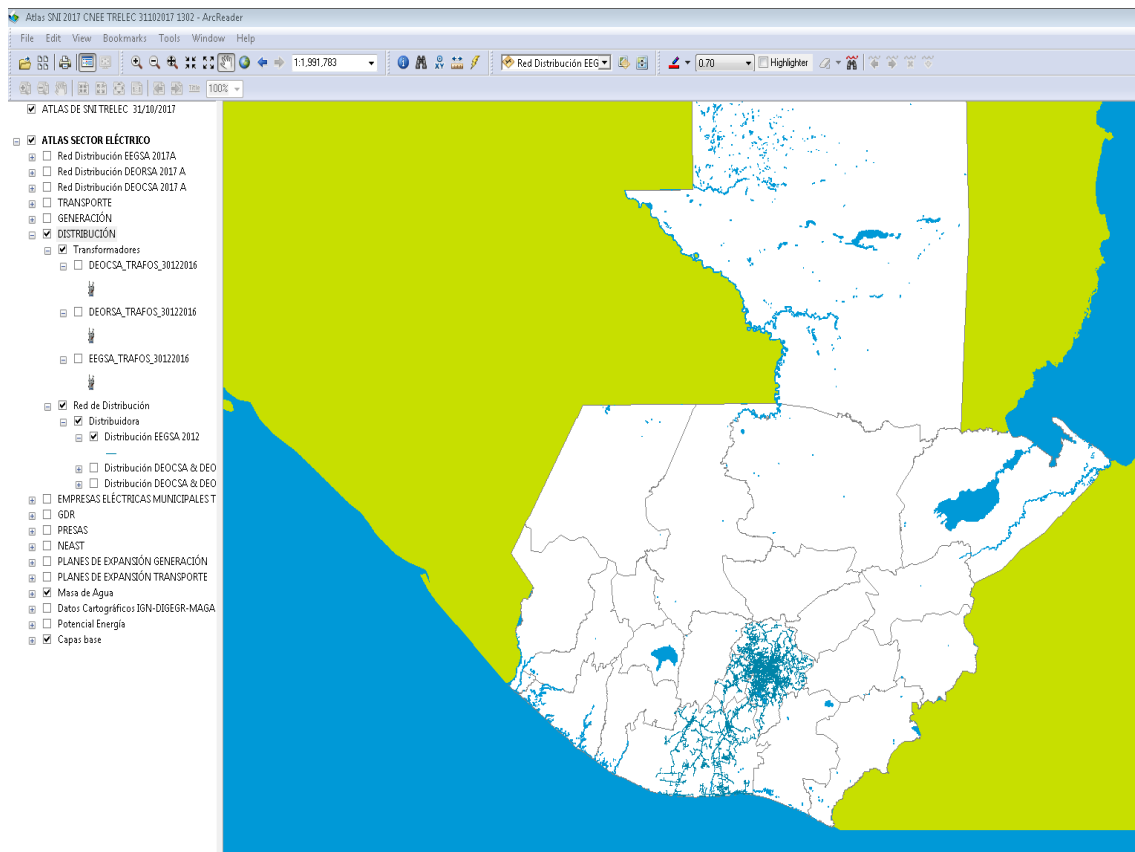
## BIBLIOGRAFIA

1. BEATY, Wayne H.; FINK, Donald. *Manual de ingeniería eléctrica*. 13a ed. Tomo II, México: McGraw-Hill, 1996. 600 p.
2. ENRÍQUEZ H, Gilberto. *La calidad de la energía en los sistemas eléctricos*. 1a ed. México: LIMUSA, 2006. 458 p.
3. IMECE, Ali; DURBACK, Daniel. *Modeling guidelines for fast front transients, IEEE transactions on power delivery*. Vol. 11 no. 1, january 1996. 9 p.
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Recommended practice on characterization of surges in low-voltage (1 000 V and Less) ac power circuits, Std C62.41.2*. New York: IEEE-SA Standards Board, 2002. 52 p.
5. International Electrotechnical Commission. *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems, part 1: principles, requeriments and tests, Std 60664-1*. 2a ed. Suecia: IEC International standard, 2007. 43 p.
6. \_\_\_\_\_. *Low – voltaje surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution, Std 61643-12*. 2a ed. Suecia: IEC International standard, 2008. 153 p.

7. \_\_\_\_\_ . *Protection against lightning – part 1: general principles*, Std 62305-1. 1a ed. Suecia: IEC International standard, 2006. 135 p.
8. JUCUP SOLÍS, Rony. *Análisis de transitorios electromagnéticos usando ATP-EMTP en la línea de transmisión Escuintla – Santa Ana 69 kV, área de la costa sur de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2018. 174 p.
9. MELÉNDEZ MELENDEZ, Ernesto. *Efecto de las sobretensiones por descargas atmosféricas y la conexión a tierra en equipos de baja tensión*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2006. 132 p.
10. VILLATORO HERNÁNDEZ, Selvyn. *Propuesta para la coordinación de supresores de transitorios, según IEEE STD C62.41.1-2002 para sistemas eléctricos en baja tensión, evaluando aspecto geográficos y eléctricos en la República de Guatemala*, Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Eléctrica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2015. 151 p.

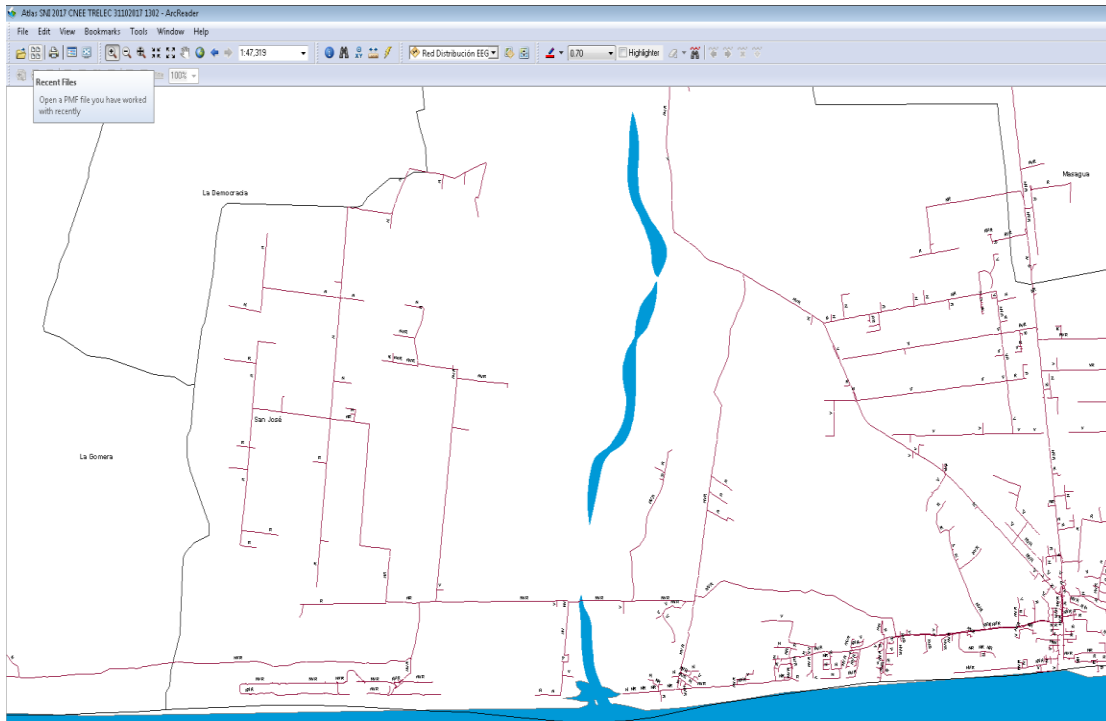
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Topología del circuito de distribución eléctrica EEGSA



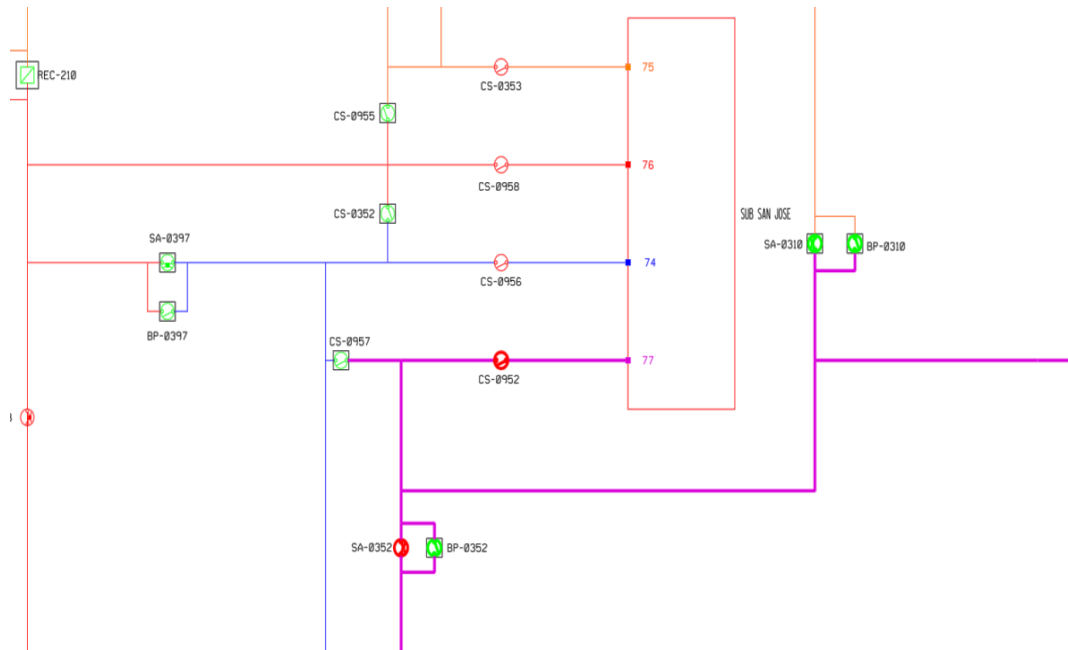
Fuente: elaboración propia, empleando Atlas del Sistema Nacional Interconectado de la República de Guatemala 2018.

## Apéndice 2. Identificación del circuito y área de influencia eléctrica del departamento Escuintla



Fuente: elaboración propia, empleando Atlas del Sistema Nacional Interconectado de la República de Guatemala 2018.

### Apéndice 3. Parámetros eléctricos del circuito de distribución para el análisis de sobretensión transitoria



**Información de proceso**

Longitud aérea (m)	66828
Bancos afectados	184
Potencias (kVA)	10145.000
N(kVA)	3377.333
V(kVA)	3085.333
R(kVA)	3682.333
Apoyos afectados.....	NA

Continuación del apéndice 3.

**Conductor Secundario**

Mslink: 3566063

**Circuito** 164

**Banco de Transformación** Banco Transformación (3566060) : Poste: 209790 3566060

Longitud 33.51

Conductor Abierto

Calibre 1/0

Material AL

Número de hilos 3

Mostrar elementos dependientes

**Conductor Primario**

Mslink: 4714312

**Circuito** 97

Longitud 34.19

Tipo ACSR

Calibre 477

Hilo guarda No

Calibre hilo guarda N/A

Calibre neutro 4/0 ACSR

Fases NVR

**Parámetros eléctricos**

Resistencia D	0.224189
Resistencia H	0.686416
Reactancia D	0.613403
Reactancia H	1.929376
Susceptancia	0
Intensidad max.	428

Mostrar elementos dependientes



Continuación del apéndice 3.

**Ubicaciones**

**Ubicación: 259196**

TIPO	CIRC	TIPO	DESCRIPCION
▶ Poste	▶ 200	Conductor primario	Long: 9.11 Fases: R
	200	Conductor primario	Long: 42.97 Fases: R
	200	Conductor primario	Long: 44.04 Fases: R
	200	Conductor primario	Long: 85.75 Fases: R
	200	Conductor secundario	Long: 44.72 Hilos: 2
	200	Conductor secundario	Long: 37.85 Hilos: 2
	200	Luminaria	Potencia: 100

**Elementos de [ Conductor primario Long: 9.11 Fases: R ]**

TIPO	ID
▶ Poste	259196
Poste	509686

Ubicación 259196 activa. Pinchar aquí para cambiar la ubicación

Pinchar aquí para saltar a ubicación

Fuente: elaboración propia, empleando SIGRE 2010.

## Apéndice 4. Reporte de simulación del circuito modelado

```
+++ Node "XX0093" has no connected linear branches. Add (to ground) the conductance G = 1.0000000
+++ Node "XX0092" has no connected linear branches. Add (to ground) the conductance G = 1.0000000
Blank card ending requests for output variables. |BLANK OUTPUT
```

```
Column headings for the 4 EMTP output variables follow. These are divided among the 5 possible class
First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower volt
Next 1 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
```


Step	Time	TRAF0B	TRAF0A	TABLE	XX0098	XX0097	XX002C
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
500	.25E-5	6932.64191	4514.12879	222.980136	1537.24978		
1000	.5E-5	13666.9241	9121.68685	1256.46263	2938.11069		
1500	.75E-5	15508.5463	10010.3841	2639.42608	3303.27267		
2000	.1E-4	15332.6852	6913.69835	3532.87832	3227.06482		
2500	.125E-4	14303.3554	5219.97924	3780.54337	2993.81448		
3000	.15E-4	13039.7016	4271.46112	3787.15706	2716.18463		
3500	.175E-4	11789.5131	3025.64641	3590.78788	2438.57012		
4000	.2E-4	10568.5103	2517.5973	3271.26965	2175.20818		
4500	.225E-4	9443.46683	2167.08762	2951.70121	1933.28924		
5000	.25E-4	8425.73662	1779.40217	2625.37047	1714.58799		
5500	.275E-4	7497.94774	1623.97206	2314.18859	1517.97419		
6000	.3E-4	6662.73176	1480.29501	2040.43285	1341.86865		
6500	.325E-4	5719.18007	1214.1528	1782.40293	1165.86694		
7000	.35E-4	4852.09193	1004.57127	1532.40925	1015.34078		
7500	.375E-4	3575.77197	527.484744	1274.72642	901.271569		
8000	.4E-4	1915.70248	-181.58068	959.02841	813.632051		
8500	.425E-4	508.238159	-732.99584	583.012906	737.305213		
9000	.45E-4	-423.27467	-779.07974	221.943763	664.919535		
9500	.475E-4	-965.91026	-569.28594	-387743556	596.329159		
10000	.5E-4	-1304.5009	-652.63428	-78.344825	528.04349		
10500	.525E-4	-1644.9599	-884.00813	-46.772364	448.902506		
11000	.55E-4	-1758.8323	-915.32551	-33.084694	386.73459		
11500	.575E-4	-1769.2882	-802.92763	-24.106469	338.611748		
12000	.6E-4	-1977.6367	-813.17707	-9.9869571	303.027686		
12500	.625E-4	-2534.2185	-1120.4683	-30.791654	279.875868		
13000	.65E-4	-3213.901	-1509.6915	-118.11839	263.191872		
13500	.675E-4	-3766.2035	-1730.2591	-247.09214	247.937504		
14000	.7E-4	-4116.4529	-1753.3967	-381.20644	232.310803		
14500	.725E-4	-4355.3957	-1712.9727	-494.84148	217.318259		
15000	.75E-4	-4578.8962	-1713.3828	-589.45381	204.263623		
15500	.775E-4	-4770.0447	-1748.5557	-675.58978	192.639921		
16000	.8E-4	-4878.2677	-1759.2919	-754.59094	180.857244		
16500	.825E-4	-4881.9268	-1722.1976	-819.44925	168.116753		
17000	.85E-4	-4775.9671	-1652.0888	-863.65231	155.754005		
17500	.875E-4	-4591.5975	-1568.76	-885.66073	143.91721		
18000	.9E-4	-4354.6143	-1494.3362	-888.05014	132.566794		
18500	.925E-4	-4080.9351	-1435.6513	-876.27392	121.636676		
19000	.95E-4	-3763.3492	-1375.5505	-853.95247	110.764151		
19500	.975E-4	-3386.2853	-1298.0637	-820.81712	99.5458673		
20000	.1E-3	-2961.4312	-1205.6663	-775.2143	88.3102335		
20500	.1025E-3	-2529.7405	-1123.6263	-718.04577	77.514428		
21000	.105E-3	-2132.3128	-1077.7792	-655.01958	67.6158298		
21500	.1075E-3	-1802.3622	-1078.0355	-593.88795	59.2414441		
22000	.11E-3	-1563.5474	-1124.8701	-541.83275	52.8195513		
22500	.1125E-3	-1414.9098	-1206.3901	-503.91413	48.2847455		
23000	.115E-3	-1337.3281	-1298.7507	-481.18145	45.2104295		
23500	.1175E-3	-1319.9575	-1388.0745	-471.00596	43.336273		
24000	.12E-3	-1368.0362	-1480.7154	-470.98796	42.7150717		
24500	.1225E-3	-1481.028	-1581.1675	-481.03453	43.335952		
25000	.125E-3	-1636.9648	-1675.6976	-500.90546	44.8038207		
25500	.1275E-3	-1801.2238	-1741.9329	-527.4342	46.4907696		
26000	.13E-3	-1940.7296	-1764.1711	-554.78189	47.8086951		
26500	.1325E-3	-2031.5381	-1737.8654	-576.49414	48.3430123		
27000	.135E-3	-2062.9278	-1668.0514	-587.31994	47.912807		
27500	.1375E-3	-2037.869	-1567.4332	-584.37262	46.5769366		
28000	.14E-3	-1968.7637	-1451.9018	-567.58394	44.5542646		
28500	.1425E-3	-1872.2757	-1335.6325	-539.22289	42.120888		
29000	.145E-3	-1765.3331	-1228.8184	-502.90684	39.544789		
29500	.1475E-3	-1661.3322	-1136.6575	-462.592	37.039916		

Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.  
Done dumping plot points to C-like disk file.

Fuente: elaboración propia, empleando ATP LIS FILE 6.0 – 2015.

## ANEXO

### Anexo 1. Carta de autorización de uso información de SIGRE de la EEGSA




Guatemala, 18 de noviembre de 2020.

Ingeniero  
José Anibal Silva de los Angeles  
Coordinador del Área CC. Básicas Y Electrotecnia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Silva:

Por medio de la presente, me dirijo a usted para informarle que el trabajo de graduación elaborado por el estudiante Estuardo Roel Velásquez Soto, con número de carné 201212786 y número de DPI 2335194080101 titulado **"ANÁLISIS DEL FENÓMENO TRANSITORIO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN BAJA TENSIÓN PARA INSTALACIONES RESIDENCIALES Y COMERCIALES DE GUATEMALA UTILIZANDO EL SOFTWARE ATP"**, el cual autorizo que haga uso de la información generada del sistema gráfico SIGRE de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A., con el fin y único de utilizarlo en su desarrollo de trabajo de graduación mencionado.

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

  
Ingeniero  
Julio Edgardo Gonzalez Vasquez  
Jefe Departamento Planificación y Calidad de Servicio  
Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A.

(502) 2277-7000 / [www.eegsa.com](http://www.eegsa.com) / [consultas@eegsa.net](mailto:consultas@eegsa.net)  
6°. Avenida 8-14, zona 1. Ciudad de Guatemala

Fuente: Empresa Eléctrica de Guatemala.

