



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS DE POTENCIA**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**ESTUDIO DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN DESCARGADORES DE  
SOBRETENSIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN.**

Proyecto de Titulación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en  
Sistemas Eléctricos de Potencia.

**Autores:**

León Chiluiza Adriana Karina

**Tutor Académico:**

Ing. Roberto Salazar. MSc

**LATACUNGA – ECUADOR**

**2022-2023**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA.**

Yo, **ADRIANA KARINA LEÓN CHILUIZA** declaro ser autor del presente proyecto de investigación siendo el **ESTUDIO DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN DESCARGADORES DE SOBRETENSION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCIÓN**, siendo el Ing. **SALAZAR ACHIG EDGAR ROBERTO** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

.....

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“ESTUDIO DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN DESCARGADORES DE SOBRETENSION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCIÓN”**, de **León Chiluita Adriana Karina** de la carrera **Ingeniería Eléctrica**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de **Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas** de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero, 2023

El Tutor

Firma

MSc. Ing. Roberto Salazar

CI: 0502847619



## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**; por cuanto, la postulante con el título de Proyecto de titulación: **“ESTUDIO DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN DESCARGADORES DE SOBRETENSION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCIÓN”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúnen los méritos suficientes para ser sometidos al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero 2023

Para constancia firman:

---

**Lector 1 (Presidente)**

**Nombre: Gabriel Napoleón Pesantez Palacios**

**CC: 0301893889**

---

**Lector 2**

**Nombre: Jessica Nataly Castillo Fiallos**

**CC: 0604590216**

---

**Lector 3**

**Nombre: Franklin Hernán Vásquez Tenada**

**CC: 1710434497**

## **AGRADECIMIENTO.**

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar a este momento.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas de la gran Alma Mater, a sus docentes por la sabiduría que me transmitieron.

Al Ing. Roberto Salazar quien siempre estuvo disponible en el desarrollo de este trabajo y aportó con sus conocimientos para la culminación del mismo.

Al Ing. Mario Morales por brindarme la oportunidad de realizar un estudio para aportar con un grano de arena en los estudios de los descargadores.

Quiero agradecer de manera especial al Tnlgo Eduardo López quien de manera desinteresada me brindó toda la ayuda posible para poder solventar dudas que iban surgiendo a lo largo de este proyecto.

Y como olvidarme de ti querido amigo PAUL ZAPATA, que desde el día cero estuviste ahí siempre dispuesto a brindarme tu ayuda de manera desinteresada con una amistad sincera que se durará hasta el final de los días.

## **DEDICATORIA.**

Gracias a la vida que me ha dado tanto, este logro es para ustedes PAPIS, CECILIA Y EDWIN, que después de haber caído volvieron a levantarme para creer en mi nuevamente, ÑAÑA CRISTHAL que hubiera sido de mi si no te tenía a mi lado dándome ejemplos de lucha y constancia eres mi ángel en la tierra, ustedes me volvieron a lanzar a un nuevo reto al cual se unió usted JUAN PABLO, quien soporto a mi lado malas noches, tristezas y sobre todo triunfos y para tener un cuadro perfecto Dios me mando a cuidar a un pequeño pijoito PABLO ADRIAN que me dice mamá y si alguna vez quise dejar todo porque el camino no fue nada fácil, era tu carita la que me volvía a inspirar por eso este logro es de ustedes LOS QUE SIEMPRE ESTAN. FAMILIA.

LES AMO.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	ii
<b>AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN</b> .....	iii
<b>APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	v
<b>DEDICATORIA</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xiv
<b>RESUMEN</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xvi
1 <b>INFORMACIÓN GENERAL</b> .....	1
2 <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	2
2.1    El problema:.....	2
2.1.1   Situación Problemática:.....	2
2.1.2   Formulación del problema:.....	2
2.2    Objeto y campo de acción.....	2
2.3    Beneficiarios.....	2
2.3.1   Beneficiarios directos.....	3
2.3.2   Beneficiarios indirectos.....	3
2.4    Justificación.....	3
2.5    Hipótesis.....	3
2.6    Objetivos:.....	3
2.6.1   General:.....	3
2.6.2   Específicos:.....	3
2.7    Sistema de tareas.....	4
3 <b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA</b> .....	6
3.1    Antecedentes.....	6
3.2    Estado del arte.....	8
3.2.1   Fundamentos de los descargadores de distribución.....	8
3.2.2   Tipos de descargadores.....	9
3.2.3   Principio de funcionamiento.....	11
3.2.4   Corriente de Fuga en Descargadores de Oxido Metálico.....	12

3.2.5	Corriente de Fuga Capacitiva .....	12
3.2.6	Corriente de Fuga Resistiva.....	13
3.2.7	Armónicos en la Corriente de Fuga.....	13
3.2.8	Corriente de Fuga Superficial.....	14
3.2.9	Rigidez dieléctrica .....	14
3.2.10	Sobretensiones en sistemas eléctricos.....	15
3.2.11	Fallas en los descargadores.....	18
3.2.12	Criterios de selección de los descargadores de sobrevoltajes.....	20
3.2.13	Características de los descargadores de sobrevoltajes de óxido metálico .....	21
4	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
4.1	Métodos de investigación .....	24
4.1.1	Investigación de campo. ....	24
4.1.2	Investigación experimental.....	25
4.1.3	Investigación cuantitativa.....	25
4.1.4	Metodología para el Análisis de la Corriente de Fuga.....	26
4.2	materiales e instrumentos .....	27
4.2.1	Norma IEC 60099-4 .....	27
4.2.2	Norma IEC 60099-5 .....	27
4.2.3	IEEE Working Group 3.4.11 .....	28
4.2.4	IEEE Std C62.11.....	28
4.2.5	ISO 9001 .....	28
4.2.6	MEER .....	28
4.2.7	Norma NTE INEN 3098.....	28
4.3	Selección de descargadores de sobretensión para 13.8 Kv.....	29
4.3.1	Voltaje continuo de operación .....	29
4.3.2	Capacidad para soportar sobretensiones temporales .....	29
4.3.3	Corriente nominal y clase de descarga de línea.....	29
4.3.4	Línea de fuga .....	30

4.3.5	Especificaciones de los descargadores de sobretensión seleccionados .....	30
4.4	Descripción del modelo ieee del descargador de sobretensión .....	32
4.4.1	Parámetros del modelo IEEE para el descargador de sobretensión.....	34
4.4.2	Cálculo de las resistencias variables A0 y A1 .....	34
4.4.3	Modelamiento del descargador de sobretensión en el software ATPDraw 7.2.....	37
4.5	reconocimiento y medición del tercer armonico de corriente.....	39
4.5.1	Recolección de información .....	39
4.5.2	Descargadores seleccionados.....	40
4.5.3	Instrumento para realizar las mediciones de laboratorio. ....	40
4.5.4	Esquema de conexión para realizar la medicion del tercer armónico.....	41
5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE resultados .....	42
5.1	RESULTADOS del MODELAMIENTO DEL DESCARGADOR CELECO .....	43
5.1.1	Cálculos de los parámetros del descargador CELECO modelo IEEE.....	43
5.1.2	Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador CELECO.....	44
5.1.3	Ajuste de las resistencias variables A0 y A1 del descargador CELECO .....	44
5.1.4	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador CELECO en ATPDraw 7.2.....	45
5.1.5	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador CELECO en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q.....	47
5.1.6	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador CELECO en ATPDraw 7.2 .....	49
5.2	RESULTADOS PARA EL MODLAMIENTO DEL DESACARGADOR BALESTRO 50	
5.2.1	Cálculos de los parámetros del descargador BALESTRO modelo IEEE.....	50
5.2.2	Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador BALESTRO.....	51
5.2.3	Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador BALESTRO .....	52
5.2.4	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2.....	52
5.2.5	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q.....	55

5.2.6	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2 .....	56
5.3	Resultados para el modelamiento del descargador ohio brass.....	57
5.3.1	Cálculos de los parámetros del descargador OHIO BRASS modelo IEEE.....	58
5.3.2	Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador OHIO BRASS..	59
5.3.3	Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador OHIO BRASS .....	59
5.3.4	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2 .....	60
5.3.5	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q .....	62
5.3.6	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2 .....	64
5.4	Resultados para el modelamiento del descargador mcklear .....	65
5.4.1	Cálculos de los parámetros del descargador MCKLEAR modelo IEEE.....	65
5.4.2	Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador MCKLEAR.....	66
5.4.3	Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador MCKLEAR .....	66
5.4.4	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2.....	67
5.4.5	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q.....	69
5.4.6	Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2 .....	71
5.5	Resultados de las mediciones de laboratorio en los descargadores de sobretensión....	72
5.5.1	Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Mcklear .....	73
5.5.2	Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Celeco.....	73
5.5.3	Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Balestro .....	74
5.5.4	Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Ohio Brass.....	75
5.5.5	Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión nuevos.....	76

5.5.6	Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión menos de 10 años .....	76
5.5.7	Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión mas de 10 años .....	77
5.5.8	Estados del envejecimiento de los descargadores de sobretensión.....	77
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	79
6.1	Conclusiones.....	79
6.2	Recomendaciones .....	80
7	BIBLIOGRAFÍA .....	81
8	ANEXOS .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3. 1. Protección de un transformador mediante un descargador de Óxido Metálico [5].	9
Figura 3. 2. Característica U-I de un descargador de OM típico en un sistema de 420 kV con neutro rígido a tierra[8].	10
Figura 3. 3. Partes de un descargador de ZnO[7].	11
Figura 3. 4. Comportamiento tensión- corriente del descargador [6].	11
Figura 3. 5. Característica no lineal de V-I de los descargadores de ZnO y SiC[5].	12
Figura 3. 6. Características típicas de voltaje-corriente para resistores no lineales de óxido metálico[6].	13
Figura 3. 7. Temperatura normalizada típica, a UC[6].	14
Figura 3. 8. Circuito y diagrama de tensiones para el efecto Ferranti [10].	15
Figura 3. 9. Desbalance de voltajes en condiciones de falla por sobretensión[10].	16
Figura 3. 10. Interrupción de corriente de falla, forma de onda [10].	17
Figura 3. 11. Resistencias de disparo y cierre [10].	17
Figura 3. 12. Desarrollo de una descarga atmosférica[10].	18
Figura 3. 13. Característica tensión-corriente del descargador de óxido de cinc [4].	19
Figura 4. 2. Lugar de la investigación experimental.	25
Figura 4. 3. Lugar donde se realizó la investigación cuantitativa.	26
Figura 4. 4. Métodos para analizar la corriente de fuga [11].	27
Figura 4. 5. Descargador de sobretensión CELECO[21].	31
Figura 4. 6. Descargador de sobretensión BALESTRO[22].	31
Figura 4. 7. Descargador de sobretensión OHIO BRASS[23].	32
Figura 4. 8. Descargador de sobretensión MCKLEAR[24].	32
Figura 4. 9. Modelo IEEE dependiente de la frecuencia[16].	33
Figura 4. 10. Característica no lineal para A0 y A1[16].	33
Figura 4. 11. Característica no lineal para A0 simulado en ATPDraw 7.2.	36
Figura 4. 12. Característica no lineal para A1 simulado en ATPDraw 7.2.	37
Figura 4. 13. Modelo IEEE del descargador simulado en ATPDraw 7.2.	37
Figura 4. 14. Características de la fuente HEIDELER.	38
Figura 4. 15. Ensayos de laboratorio.	40
Figura 4. 16. Probador de descargadores digital ALCL-80X[26].	41
Figura 4. 17. Montaje experimental para la medición del tercer armónico[27].	41
Figura 4. 18. Esquema detector del tercer armónico[12].	42
Figura 4. 19. Esquema del funcionamiento del descargador [11].	42
Figura 5. 1. Voltaje Tipo Rayo (CELECO).	45
Figura 5. 2. Corriente Tipo Rayo (CELECO).	46
Figura 5. 3. Capacitor Tipo Rayo (CELECO).	47
Figura 5. 4. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (CELECO).	47
Figura 5. 5. Voltaje Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.	48
Figura 5. 6. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.	48
Figura 5. 7. Capacitor Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.	49
Figura 5. 8. Voltaje Tipo Maniobra (CELECO).	49
Figura 5. 9. Corriente Tipo Maniobra (CELECO).	50
Figura 5. 10. Voltaje Tipo Rayo (BALESTRO).	53

Figura 5. 11. Corriente Tipo Rayo (BALESTRO). .....	53
Figura 5. 12. Capacitor Tipo Rayo (BALESTRO). .....	54
Figura 5. 13. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (BALESTRO). .....	54
Figura 5. 14. Voltaje Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga. ....	55
Figura 5. 15. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga .....	55
Figura 5. 16. Capacitor Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga. ....	56
Figura 5. 17. Voltaje Tipo Maniobra (BALESTRO). .....	57
Figura 5. 18. Corriente Tipo Maniobra (BALESTRO). .....	57
Figura 5. 19. Voltaje Tipo Rayo (OHIO BRASS). .....	60
Figura 5. 20. Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS). .....	61
Figura 5. 21. Capacitor Tipo Rayo (OHIO BRASS). .....	61
Figura 5. 22. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS). .....	62
Figura 5. 23. Voltaje Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga. ....	62
Figura 5. 24. Capacitor Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga. ....	63
Figura 5. 25. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga. ....	63
Figura 5. 26. Voltaje Tipo Maniobra (OHIO BRASS). .....	64
Figura 5. 27. Corriente Tipo Maniobra (OHIO BRASS). .....	64
Figura 5. 28. Voltaje Tipo Rayo (MCKLEAR). .....	67
Figura 5. 29. Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR). .....	68
Figura 5. 30. Capacitor Tipo Rayo (MCKLEAR). .....	68
Figura 5. 31. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR). .....	69
Figura 5. 32. Voltaje Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga. ....	69
Figura 5. 33. Capacitor Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga. ....	70
Figura 5. 34. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga. ....	70
Figura 5. 35. Voltaje Tipo Maniobra (MCKLEAR). .....	71
Figura 5. 36. Corriente Tipo Maniobra (MCKLEAR). .....	71
Figura 5. 37. Resultados de la medición en el osciloscopio del tercer armónico a 21°C y a 24°C. ....	73
Figura 5. 38. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Mcklear a 21°C y a 24°C. ....	73
Figura 5. 38. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Celeco a 21°C y a 24°C. ....	74
Figura 5. 39. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Balestro a 21°C y a 24°C. ....	75
Figura 5. 40. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Ohio Brass a 21°C y a 24°C. ....	75
Figura 5. 41. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores nuevos a 21°C y a 24°C. ....	76
Figura 5. 42. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores con menos de 10 años a 21°C y a 24°C. ....	77
Figura 5. 43. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores con más de 10 años a 21°C y a 24°C. ....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 información de los descargadores.....	40
Tabla 4. 1. Características técnicas de los descargadores seleccionados para el nivel de voltaje de distribución 13.8 kV. ....	30
Tabla 4. 2. Relación Voltaje en p.u vs Corrientes en las resistencias A0 Y A1[25]. ....	34
Tabla 4. 3. Componentes de la simulación en ATPDraw 7.2.....	38
Tabla 5. 1. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (CELECO).....	44
Tabla 5. 2. Resistencias variables para A0 y A1(CELECO).....	44
Tabla 5. 3. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(CELECO).....	45
Tabla 5. 4. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (BALESTRO).....	51
Tabla 5. 5. Resistencias variables para A0 y A1(BALESTRO). ....	51
Tabla 5. 6. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(BALESTRO).....	52
Tabla 5. 7. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (OHIO BRASS).....	58
Tabla 5. 8. Resistencias variables para A0 y A1(OHIO BRASS). ....	59
Tabla 5. 9. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(OHIO BRASS).....	59
Tabla 5. 10. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (MCKLEAR).....	65
Tabla 5. 11. Resistencias variables para A0 y A1(MCKLEAR). ....	66
Tabla 5. 12. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(MCKLEAR).....	66
Tabla 5. 13. Resultados de las mediciones del tercer armónico en los cuatro descargadores de sobretensión. ....	72

## **RESUMEN.**

**TITULO;** “ESTUDIO DE LAS CORRIENTES DE FUGA EN DESCARGADORES DE SOBRETENSION DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCIÓN”

**Autora:**

Adriana Karina León Chiluíza.

El presente proyecto de investigación está dedicado al análisis de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución (13.8kV), empleando normas vigentes nacionales e internacionales como: IEC 60099-4, IEC 60099-5, NTE INEN 3098, IEEE Std C62.11, ISO 9001, IEE Working group 3.4.11 y MEER.

En primera instancia se realizó una investigación bibliográfica acerca de los Descargadores de sobretensión, tipos de sobretensiones, corrientes de fuga, etc. Posteriormente se seleccionó los descargadores adecuados para el sistema eléctrico de distribución (13.8kV) en base a su voltaje de operación nominal, corriente de operación y clase de descarga; Además, se realizó mediciones en los laboratorios del complejo CATIGLATA perteneciente a la EEASA, donde se obtuvo datos del tercer armónico de la corriente de fuga en los cuatro descargadores seleccionados, también se consideró el modelo propuesto por la IEEE Working group 3.4.11 para ser analizado en el software ATPDraw 7.2 y se analiza la causa del envejecimiento de los descargadores de sobretensión nuevos, usados en menos de 10 años y usados por más de 10 años.

Finalmente, se obtiene resultados del modelamiento del descargador de sobretensión en el software ATPDraw 7.2, donde se analiza el funcionamiento del mismo de acuerdo a las curvas características de tensión, corriente y capacitor. Además, se analiza el valor del tercer armónico de la corriente de fuga el cual no debe superar el 2 % tal como lo establece la IEEE 519-199, donde el descargador de la marca Ohio Brass resultó tener mejor rendimiento y mejores características constructivas ya que a pesar de tener más de 10 años de uso presentó un valor de (0.11mA), por lo cual se afirma que el tercer armónico de la corriente de fuga es el causante del envejecimiento de los descargadores de sobretensión.

**Palabras Clave:** Descargador de Sobretensión, Corriente de fuga, Armónico, Rendimiento, Envejecimiento.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI  
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**

**TITLE: “STUDY OF LEAKAGE CURRENTS IN SURGE ARRESTERS OF  
ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS”**

**Author: Adriana Karina León**

**ABSTRACT**

**Keywords:**

## **AVAL DE TRADUCCION**

## **1 INFORMACIÓN GENERAL**

**Título:** Estudio de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución.

**Fecha de inicio:** octubre 2022

**Fecha de finalización:** febrero 2023

**Lugar de ejecución:** Patio de maniobras EEASA

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

**Carrera que auspicia:** Carrera de Ingeniería Eléctrica.

**Proyecto Macro Asociado:** Desarrollo de sistemas para el abastecimiento y uso del servicio de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

**Equipo de Trabajo:** Sistemas Eléctricos de Potencia

**Tutor de Titulación:**

Ing. Tutor: Edgar Roberto Salazar. MSc

**Estudiante/s:** Adriana Karina León Chiluiza

**Área de Conocimiento:** 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

**Línea de investigación:** Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:**

**Sublínea 2:** Control y optimización en el uso de la energía del sector Industrial, comercial y residencial.

**Grupos Temáticos:**

1. Eficiencia energética y desarrollo sostenible.

## **2 INTRODUCCIÓN**

### **2.1 EL PROBLEMA:**

#### **2.1.1 Situación Problémica:**

Para evitar fallas en los aparatos eléctricos conectados a la red, es necesario limitar las sobretensiones por debajo de los valores de las tensiones soportadas por dichos aislamientos. Los elementos encargados de esta misión son los descargadores o también conocidos como pararrayos. Estos deben actuar antes que se alcancen las tensiones soportadas por los aislamientos de los aparatos que protegen, cualquiera que sea las sobretensiones que puedan presentarse en el sistema. La necesidad de la Empresa Eléctrica Ambato se ha visto en poder tener una tabla de los valores admisibles por un estudio del nivel de degradación de los descargadores en base a la corriente de fuga de los mismos, para poder definir cuál de ellos esta degradado y poder reemplazarlos

La existencia de corrientes de fuga en los descargadores de sobretensión no es perceptible a los sentidos del ser humano, razón por la cual necesitan ser medidas para contabilizar su magnitud y la frecuencia con la que aparecen. Mientras mayor es la magnitud de este fenómeno la cantidad de energía que se pierde es significativa, consecuencia de esto las empresas distribuidoras de energía eléctrica tienen incremento de pérdidas técnicas, que finalmente se traduce en pérdidas económicas.

Por otra parte, las distribuidoras no cuentan con un registro actualizado de este fenómeno, para determinar las consecuencias que están ocasionando a su sistema tecnológico y económico por ende la imposibilidad de tomar acciones que las mitiguen.

#### **2.1.2 Formulación del problema:**

Determinar el nivel de resistencia idóneo del descargador para utilizar en redes de distribución considerando el tiempo de vida

### **2.2 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

Analizar el impacto del sistema fotovoltaico en los sistemas de iluminación.

330000 ciencias Tecnológicas / 3306 Ingeniería y Tecnología Eléctricas / 3306.99 Calidad de Energía

### **2.3 BENEFICIARIOS**

### **2.3.1 Beneficiarios directos**

La Empresa eléctrica Ambato S.A y los investigadores del presente proyecto de titulación.

### **2.3.2 Beneficiarios indirectos**

Los beneficiarios indirectos serían los usuarios de la Empresa Eléctrica Ambato S.A y el sistema Eléctrico Nacional.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN**

La ausencia de medidas actualizadas de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de potencia de una empresa distribuidora, no les permite cuantificar las pérdidas que existen por este efecto y tomar acciones para disminuirlas, el presente trabajo pretende estudiar este particular en los mencionados dispositivos, de tal manera poder contar con un procedimiento adecuado y permitir a las empresas encargadas de distribuir la energía disminuir los costos por este tipo de pérdidas de energía y emplear esos recursos en beneficio de sus usuarios.

Por lo tanto, es necesario probar y supervisar los descargadores para verificar su buen estado y su capacidad para proteger eficazmente la línea de distribución.

## **2.5 HIPÓTESIS**

Mediante las pruebas de corriente de tercer armónico a descargadores se podrá determinar cuál es el nivel de resistencia que debe tener en función del tiempo de vida y del tipo para instalarse en las redes de distribución en la Empresa Eléctrica Ambato.

## **2.6 OBJETIVOS:**

### **2.6.1 General:**

Medir los valores de las corrientes de fuga en los descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución en estado normal, alerta y falla.

### **2.6.2 Específicos:**

- Revisar el estado del arte del origen e impacto de la corriente de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución.

- Definir la metodología para las pruebas de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión.
- Analizar los resultados del nivel de resistencia de los descargadores según el tipo y el tiempo de vida
- Caracterización del descargador mediante software.

## 2.7 SISTEMA DE TAREAS

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividad (tareas)</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
<p>Revisar el estado del arte del origen e impacto de la corriente de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución.</p>	<p>Revisión bibliográfica</p> <p>Revisión de normativas nacionales e Internacionales de corrientes de fuga</p> <p>Análisis de la información esencial para la investigación</p>	<p>El estado del arte realizado adecuadamente al proyecto de investigación.</p>	<p>Libros</p> <p>Tesis</p> <p>Artículos</p> <p>Revistas tecnológicas</p> <p>Informes</p> <p>Técnicos</p> <p>Normativas</p> <p>Internet y motores de búsqueda</p>
<p>Definir la metodología para las pruebas de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión.</p>	<p>Recopilación de los resultados de las pruebas.</p> <p>Metodología de la norma.</p>	<p>Valores del tercer armónico de la corriente de fuga.</p>	<p>Bitácora</p>

<p>Analizar los resultados del nivel de resistencia de los descargadores según el tipo y el tiempo de vida</p>	<p>Tabulación de los datos recopilados en las pruebas</p>	<p>Valores que definen el envejecimiento de los descargadores de sobretensión.</p>	<p>Software</p>
<p>Caracterización del descargador mediante software.</p>	<p>Selección e implementación del modelo IEEE del descargador de sobretensión</p>	<p>Comportamiento de la forma de onda característica de la corriente y voltaje.</p>	<p>Software</p>

### 3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1 ANTECEDENTES

Los descargadores actúan como dispositivos limitadores de sobretensión para proteger el sistema de transmisión y distribución de sobretensión causadas por descargas atmosféricas y operaciones de conmutación, por lo tanto, su monitoreo de condición es vital para asegurar la confiabilidad del sistema eléctrico, el monitoreo de la condición basado en la corriente de fuga es el método más utilizado para determinar el envejecimiento del pararrayos de óxido de metal (MOSA) en el sitio. LA extracción del componente resistivo de la corriente de fuga es necesaria para el diagnóstico de salud exacto del descargador. En particular, se sabe que el componente del tercer armónico de la corriente resistiva está directamente relacionado con envejecimiento del descargador. los descargadores se instalan entre la fase y el terminal de tierra del equipo para que se descargue de manera segura la energía

En el año 2022 el proyecto de F. Campuez y M. Vega [1] se caracteriza el aislamiento eléctrico en los sistemas de distribución para de evaluar las sobretensiones de maniobra (SOV) y descargas atmosféricas (LOV) que podrían producirse por eventos internos o externos en la red mediante recopilación de los resultados obtenidos a través de ensayos realizados en el laboratorio de Alto Voltaje F-CIYA, para luego desarrollar la simulación en el software ATPDraw considerando las condiciones atmosféricas del lugar de estudio. Además, se evalúan las amplitudes de las sobretensiones bajo diferentes escenarios de operación y se las comparará con los niveles referenciales del aislamiento y datos obtenidos en los ensayos. Para la investigación se han tomado una muestra de seis aisladores, cuatro transformadores y dos cables, disponibles en el laboratorio de alto voltaje F-CIYA, como técnica principal se utilizaron registros de pruebas considerando los procedimientos y criterios de aceptabilidad definidos por la normativa de IEEE o IEC.

En el año 2009 un estudio experimental de H. Ibáñez [2] es llevado a cabo para determinar variaciones en las características eléctricas de los descargadores de ZnO ante el fenómeno de degradación. Las variables eléctricas examinadas son el coeficiente de no linealidad del descargador y la potencia disipada. Existen otros métodos para determinar el estado de funcionamiento de un descargador como por ejemplo el estudio de la componente resistiva de la corriente de fuga en A.C., que en todo caso no será tenido en cuenta en el presente trabajo. Los ensayos de laboratorio se realizaron acelerando el proceso de degradación mediante aplicación de energía a las muestras y simulando un efecto degradatorio mediante la aplicación

de calor. Los resultados obtenidos muestran variaciones en las variables eléctricas que pueden ser utilizadas a la hora de establecer un programa de revisión del estado de funcionamiento de los descargadores de sobretensión en las redes eléctricas.

Además, en el año 2014 en el proyecto de D. Poveda [3] se propone un método de envejecimiento para descargadores de sobretensión tipo distribución, el método propuesto consiste en la energización de los descargadores a su tensión máxima de operación MCOV durante un periodo no menor a 500 horas aplicándoles cada determinado tiempo un impulso de corriente tipo rayo o uno de larga duración. El método se implementó en el laboratorio de ensayos eléctricos LABE a cinco muestras iguales. Para lograr dicha implementación, fue necesario formular y montar los circuitos de prueba, así como escoger los métodos de medición más apropiados para medir: tensión residual, corriente de impulso, tensión máxima de operación y corriente de fuga. Con los datos obtenidos durante los ensayos se procedió a calcular la energía acumulada que soportó cada una de las muestras debida a los impulsos de corriente aplicados, así como el valor de la carga eléctrica. Por último, se buscó una correlación matemática entre la energía acumulada y las demás variables medidas o calculadas.

En el año 2009 en el estudio realizado por J. Rodríguez, J. Ramírez, M. Martínez y E. Da Silva [4] donde las condiciones de operación a frecuencia industrial definen un estado térmico del descargador (equilibrio térmico entre las pérdidas internas y lo disipado al ambiente); al ocurrir una sobretensión transitoria, la energía es inyectada de forma repentina, que traducido en temperatura puede o no superar su condición límite. En este artículo se trabaja sobre el modelo térmico del descargador (simulado en ATP) utilizado en sistemas de distribución (servicio normal de 12 y 18 kV nominales) para diferentes condiciones ambientales y de operación a frecuencia industrial, determinando su impacto en la capacidad energética del descargador y en su probabilidad de falla frente a fenómenos transitorios (sobretensiones atmosféricas); los resultados se comparan con las exigencias impuestas por las normas. Los resultados permiten correlacionar el límite térmico del descargador de óxido de cinc con la condición de operación a frecuencia industrial (60 Hz), con las condiciones ambientales y con los transitorios tipos impulsos.

De la misma forma en el año 2013 el presente de E. Cuenca [5] presenta el desarrollo e implementación de tres modelos de descargadores de sobre voltajes en el paquete computacional para análisis de transitorios electromagnéticos ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - ATP, en base a los datos proporcionados por los fabricantes, el primero propuesto por la IEEE, formado por dos resistencias no lineales (A0 y A1),

un filtro pasa bajos (R1 y L1), una inductancia asociada con los campos magnéticos (L0), una resistencia para estabilizar la integración numérica (R0) y una capacitancia de terminal a terminal del descargador (C), el segundo presentado por Pinceti y Giannettoni, que es una simplificación del modelo IEEE, y el tercero un modelo que consiste en una resistencia no lineal. Se aplican los modelos de descargadores a sistemas eléctricos de potencia de 230 y 500 kV y se analizan los transitorios ocasionados por sobre voltajes temporales, de maniobra y descargas atmosféricas. Con los resultados obtenidos en las simulaciones se hace la comparación de los modelos detallados y simplificados de descargadores de sobre voltajes.

Finalmente, en el año 2002 el estudio de J. Duran y N. Torres [6] tuvieron como objetivo principal de esta investigación establecer mediante la correlación de las pruebas de Corrientes de Fuga y Tangente Delta, el estado de los descargadores de sobretensión en subestaciones de alta tensión. Este trabajo se realizó en las subestaciones de alta tensión de CODENSA S.A. ESP; se escogió una muestra aproximada de 100 descargadores de sobretensión de Óxido de zinc a los cuales se les realizaron las pruebas de tangente delta y corrientes de fuga. Las pruebas de tangente delta se realizan con el equipo M4000 y las pruebas de corriente de fuga con el equipo LCM, Monitor de Corrientes de Fuga, en la prueba de corriente de fuga no es necesario des energizar el descargador como en la prueba de tangente delta. El presente documento contiene todas las etapas de la investigación, desde el conocimiento y utilización de los equipos nombrados anteriormente, pasando por la realización de las pruebas y finalizando con la correlación de los datos obtenidos.

## **3.2 ESTADO DEL ARTE**

En esta sección se puntualiza la principal información acerca del estudio de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución.

### **3.2.1 Fundamentos de los descargadores de distribución.**

Un descargador de sobretensión es un dispositivo que se utiliza para la protección de los sistemas de transmisión y de distribución contra sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas o por maniobras realizadas en el sistema[3].

Los descargadores de sobretensión juegan un papel importante en la protección de equipos y sistemas eléctricos de distribución de energía desde que empezaron a ser utilizados con tal fin. En un comienzo, se utilizaron descargadores con gaps colocados en serie con los elementos activos del descargador (carburo de silicio) e inclusive existen descargadores de óxido metálico

(ZnO) que cuentan con ésta misma forma constitutiva y que los mantiene desconectados de la red de energía bajo condiciones de operación normal [2]. Como se indica en la Figura 3. 1.

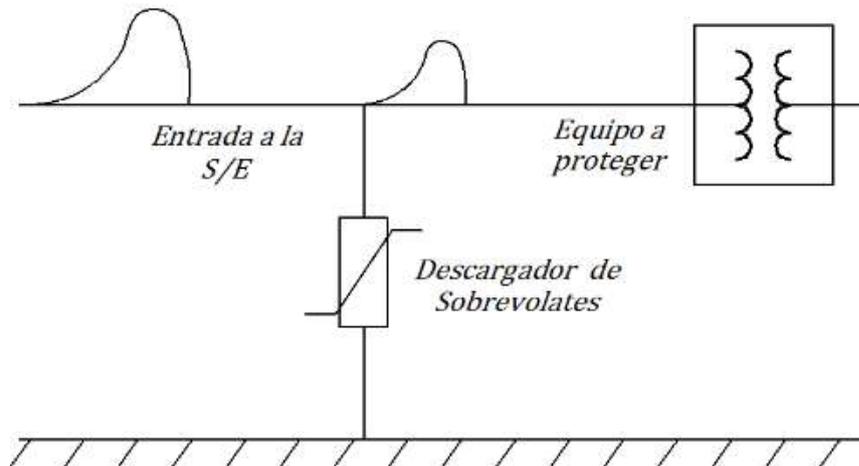


Figura 3. 1. Protección de un transformador mediante un descargador de Óxido Metálico [5].

A los descargadores de sobre voltajes también se los denomina apartarrayos porque en un principio su única misión era la de limitar los sobre voltajes ocasionados por descargas atmosféricas. Posteriormente se ampliaron sus funciones, utilizándose para otro tipo de sobre voltajes, como los de maniobra y temporales, por lo que es más adecuada la nomenclatura de descargadores de sobre voltajes[5].

### 3.2.2 Tipos de descargadores

A continuación, se presenta los dos tipos de descargadores de sobretensión como son:

#### 3.2.2.1 Descargadores de Carburo de Silicio

Conocidos como supresores de voltajes picos construido con resistores de carburo de silicio, entrehierros y envoltentes de porcelana o vidrio, actualmente en desuso[7]. estos varistores tienen la propiedad de tener una alta resistencia cuando el sistema se comporta normalmente y una resistencia muy baja para los casos en que se presentan sobretensiones, además poseen una característica negativa de temperatura, disminuyen su resistencia a medida que su temperatura aumenta; por tal razón los descargadores deben estar protegidos contra contaminación de manera que se evite la alteración en la distribución de tensiones en la superficie de la porcelana, lo cual es lo que aumenta la temperatura crítica que también se puede alcanzar por efecto de las descargas de larga duración (maniobra de interruptores)[6].

En los descargadores de sobretensión de carburo de silicio se presentan una serie de picos en el momento de la descarga que afectan el aislamiento, contrario a lo que ocurre en los descargadores de sobretensión de Óxido de zinc que no produce estos picos en el momento de la descarga; es por esto que actualmente se prefiere el uso de los descargadores de Óxido de zinc[6].

### 3.2.2.2 Descargadores de óxido metálico

Se conocen también como auto válvulas, supresores de voltajes pico, construidos con resistores no lineales (varistores) de óxido de Zinc y envolturas sintéticas (gomas siliconadas) denominadas polímeros[7]. En la Figura 3. 2 se da un ejemplo de la característica U-I de un descargador típico de OM conectado entre fase y tierra en un sistema 420 kV con neutro rígido a tierra. Sobre el eje de ordenadas se representan linealmente los valores de cresta de las tensiones, la característica se prolonga por una gama de corrientes desde 50  $\mu$ A hasta 50 KA, es decir, más de nueve décadas de magnitud[8].

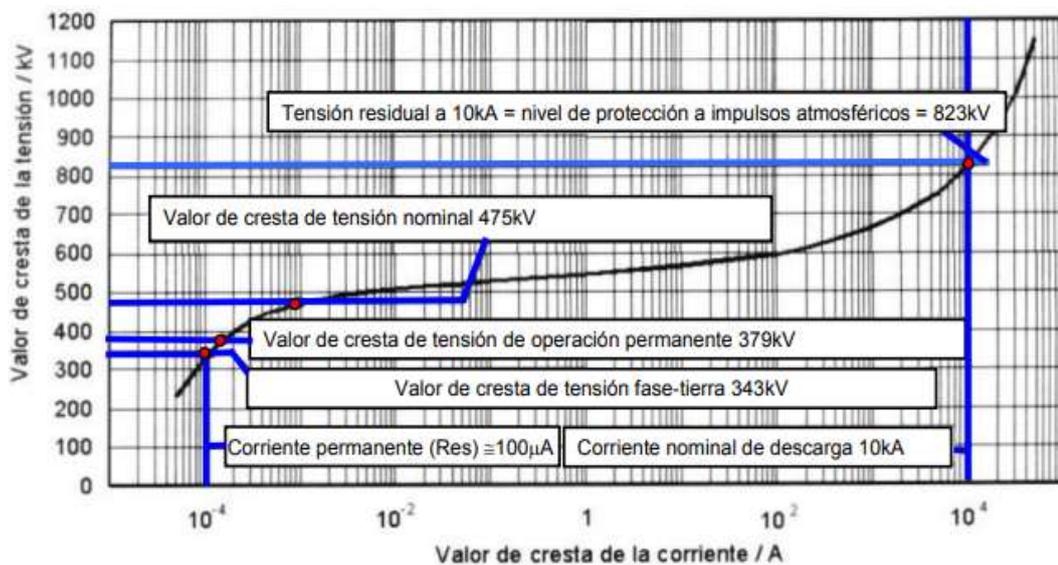


Figura 3. 2. Característica U-I de un descargador de OM típico en un sistema de 420 KV con neutro rígido a tierra[8].

En la Figura 3. 3, esquema de un descargador de óxido de Zinc, con envoltura polimérica para redes de distribución aéreas de medio voltaje, se identifica la envoltura polimérica, los varistores, terminales de línea y tierra, desconectores, base y tapa aislantes, envolturas de fibra de vidrio y resina epoxica [7].

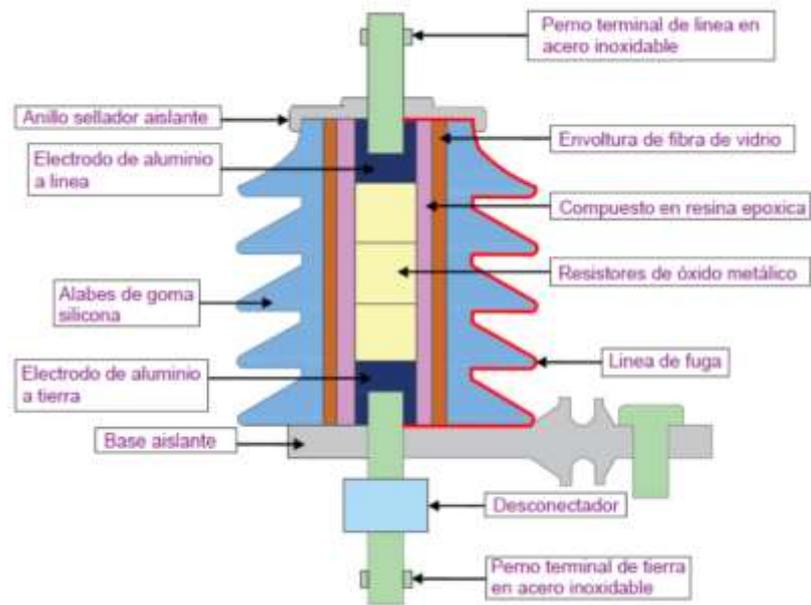


Figura 3. 3. Partes de un descargador de ZnO[7]

### 3.2.3 Principio de funcionamiento

Cuando aparece una tensión  $U$  en los terminales de descargador y se alcanza la tensión de reacción (tensión de cebado), se descargan los explosores permitiendo circular a través de las resistencias la llamada corriente de descarga, de esa manera la corriente produce una caída de tensión llamada tensión residual[6].

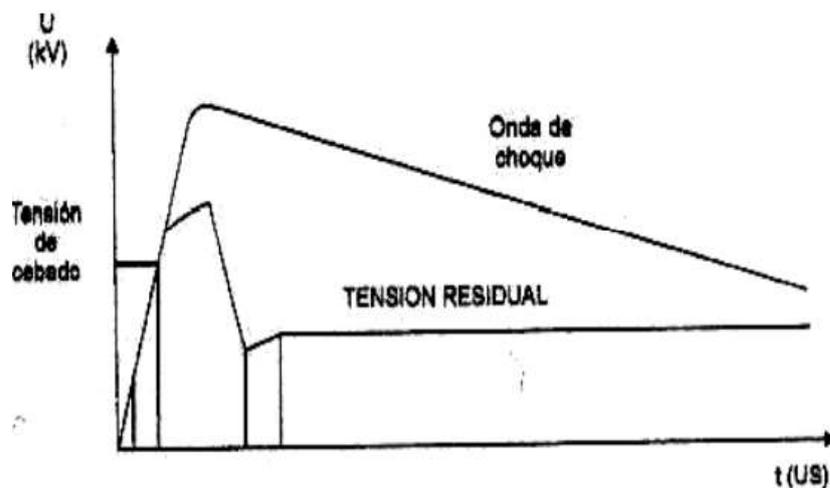


Figura 3. 4. Comportamiento tensión- corriente del descargador [6].

Cuando la descarga desaparece, la corriente a través de la resistencia y el arco en los explosores, corresponde a la tensión de operación normal. Esta corriente llamada corriente residual es interrumpida en los explosores, en donde por medio de un campo magnético que se

produce en una bobina (bobina de soplado magnético) se mueve el arco de corriente del sistema desde su punto de iniciación hasta un lugar más frío del gap en donde ocurre la extinción como se observa en la *Figura 3. 4* [6].

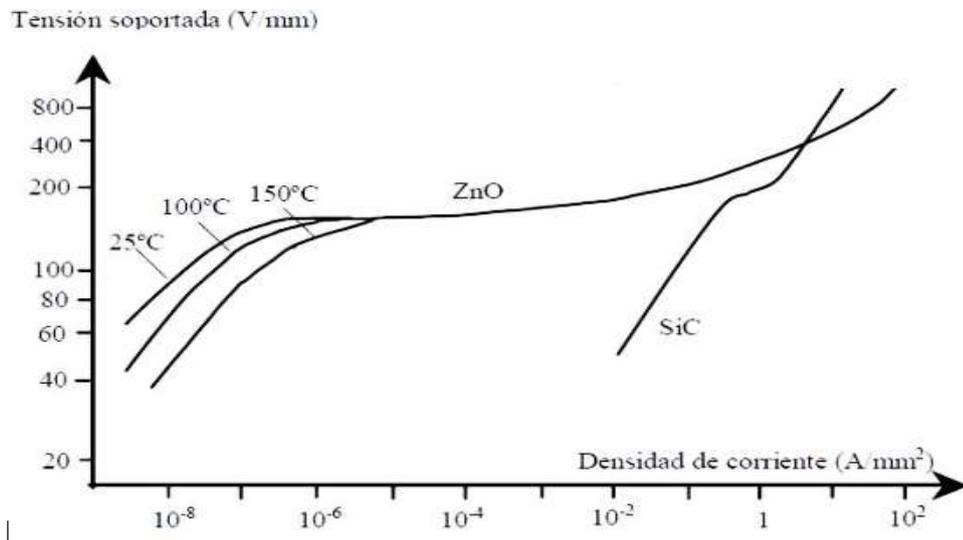


Figura 3. 5. Característica no lineal de V-I de los descargadores de ZnO y SiC[5].

En la *Figura 3. 5* se observa la curva característica de los descargadores de Carburo de Silicio, utilizan válvulas de resistencias no lineales de Carburo de Silicio en serie con una estructura de explosores para limitar la corriente, y llevar a tierra las cargas eléctricas asociadas a los sobre voltajes. Mientras que, los descargadores de sobre voltajes de Óxidos Metálicos disponen de unos elementos valvulares extremadamente no lineales. En condiciones normales de los voltajes de línea con respecto a tierra conducen unos pocos dex miliamperios de corriente de fuga, que pueden ser perfectamente tolerados de forma continua, por lo que existe una mínima pérdida de corriente asociada a su funcionamiento [5].

### 3.2.4 Corriente de Fuga en Descargadores de Óxido Metálico

La corriente de fuga AC se puede dividir en una parte resistiva y una capacitiva, o una componente capacitiva predominante y una pequeña parte resistiva., la cual muestra una medida típica de laboratorio de la corriente de fuga de un resistor no lineal de Óxido metálico cuando es energizado  $U_c$  a un voltaje equivalente  $U_c$  para el descargador completo[6].

### 3.2.5 Corriente de Fuga Capacitiva

La corriente de fuga capacitiva medida en el terminal de tierra del descargador es causada por la permisividad de los resistores no lineales de Óxido metálico y las capacitancias. No hay

evidencia que la corriente capacitiva puede cambiar significativamente con el deterioro de la característica corriente voltaje de los resistores no lineales de Óxido metálico. Por lo tanto, es difícil que las medidas de la corriente capacitiva puedan indicar la condición de los descargadores de Óxido metálico [6].

### 3.2.6 Corriente de Fuga Resistiva

A valores dados de voltaje y temperatura, la componente resistiva de la corriente de fuga es un indicador sensitivo de cambios en la característica corriente voltaje de resistores no lineales de Óxido metálico. La corriente resistiva puede ser entonces utilizada como una herramienta para indicar el diagnóstico de cambios en la condición de descargadores de Óxido metálico en servicio. Las características típicas de voltaje corriente resistivas y capacitivas para voltajes AC se muestran en la Figura 3. 6 [6].

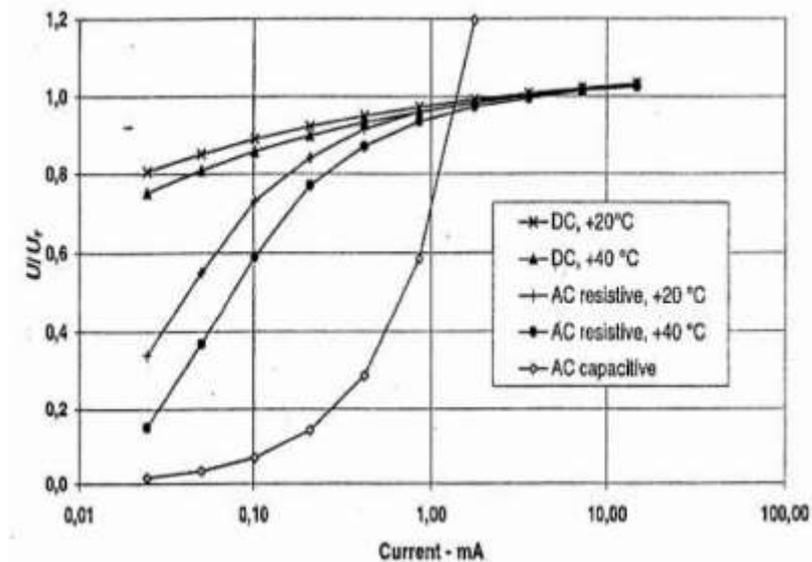


Figura 3. 6. Características típicas de voltaje-corriente para resistores no lineales de óxido metálico[6].

### 3.2.7 Armónicos en la Corriente de Fuga.

La característica no lineal de voltaje-corriente de los descargadores de Óxido metálico da aumento a los armónicos en la corriente de fuga cuando el descargador esta energizado con un voltaje sinusoidal. El contenido armónico depende de la magnitud de la corriente resistiva y el grado de no-linealidad, la cual es una función del voltaje y la temperatura. Como un ejemplo, el contenido del tercer armónico de la corriente resistiva es típicamente 10% al 40%. El contenido del armónico puede, entonces, ser usado como un indicador de la corriente resistiva como se muestra en la Figura 3. 7[6].

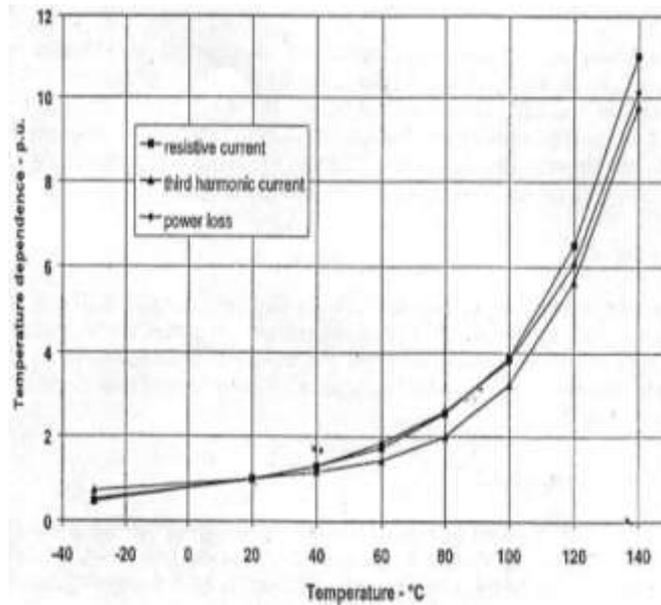


Figura 3. 7. Temperatura normalizada típica, a UC[6].

### 3.2.8 Corriente de Fuga Superficial

Como con cualquier aislador de campo, la corriente de fuga superficial externa ocurre temporalmente en el aislamiento del descargador en lluvia o en condiciones de alta humedad combinada con polución. Además, la corriente de fuga interna superficial puede aparecer con penetración de humedad. Durante las medidas, las corrientes superficiales pueden interferir con la corriente de fuga de los resistores, sin embargo, la sensibilidad de las corrientes superficiales internas y externas debe ser diferente para los diferentes métodos de medida. La influencia de la corriente de fuga superficial externa puede ser corregida, realizando las medidas en condiciones ambientales secas u otros métodos[6].

### 3.2.9 Rigidez dieléctrica

Los campos eléctricos de pequeño módulo polarizan los dieléctricos. O sea, orientan sus moléculas sin arrancar electrones de sus átomos. No producen, por tanto, corrientes de conducción en el dieléctrico, salvo las que puedan deberse a los pocos electrones libres que pueda haber. Pero, si aumenta el módulo del campo eléctrico, puede llegar a arrancar electrones ligados y, por tanto, a ionizar las moléculas del dieléctrico. Entonces el dieléctrico se hace conductor debido a los electrones que el campo ha arrancado, que pasan a ser libres, la corriente crece bruscamente y suele dañar al dieléctrico por elevación de su temperatura. Esa corriente se llama corriente disruptiva. El mayor valor del campo eléctrico que no produce este incremento brusco de corriente es la rigidez dieléctrica. Por eso una definición práctica de rigidez dieléctrica puede ser máximo campo eléctrico que puede soportar un dieléctrico sin perder sus propiedades aislantes[9].

### 3.2.10 Sobretensiones en sistemas eléctricos

Los relámpagos ocurren durante tormentas de lluvia, tormentas de nieve y otros fenómenos naturales. Sin embargo, en la mayoría de las áreas, Las tormentas de lluvia son la principal fuente de relámpagos. Las tormentas producen intra nubes, nube a nube y nube a relámpago de tierra. Los relámpagos dentro de la nube son los más frecuentes, pero los relámpagos de nube a tierra afectan la sobrecarga en las líneas de distribución [10].

#### 3.2.10.1 Sobretensiones a frecuencia industrial

Los equipos de un sistema de potencia deben tener la capacidad de hacer frente a sobretensiones temporales a frecuencia industrial. Estas pueden estar causadas por los eventos siguientes:

- Desconexión (rechazo de carga) de una carga grande que produce incremento de tensión en el sistema.
- La capacitancia de un cable sin carga, en combinación con una inductancia de transformador o generador podría incrementar la tensión en el final de la línea.
- Si la capacitancia y la inductancia serie se aproximan a la resonancia, la tensión de salida podría ser mucho mayor que la tensión de entrada tal como se muestra en la *Figura 3. 8*[10].

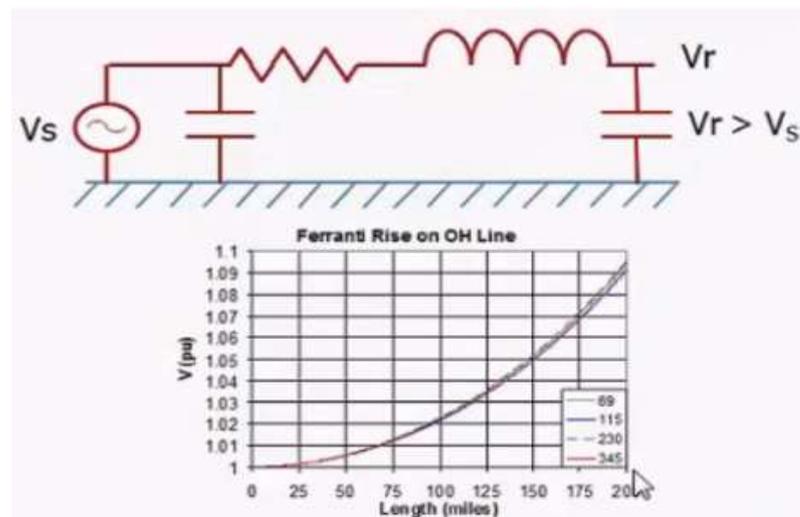


Figura 3. 8. Circuito y diagrama de tensiones para el efecto Ferranti [10] .

#### 3.2.10.2 Sobretensiones temporales

Si ocurre una falla a tierra en una red con neutro no aterrado, las fases saludables adoptarán una tensión  $\sqrt{3}$  veces mayor que la tensión de operación hasta que la falla sea despejada. Si el

sistema se aterrera a través de una impedancia, la sobretensión dependerá de la impedancia aterrada del neutro del transformador como se muestra en la *Figura 3. 9* [10].

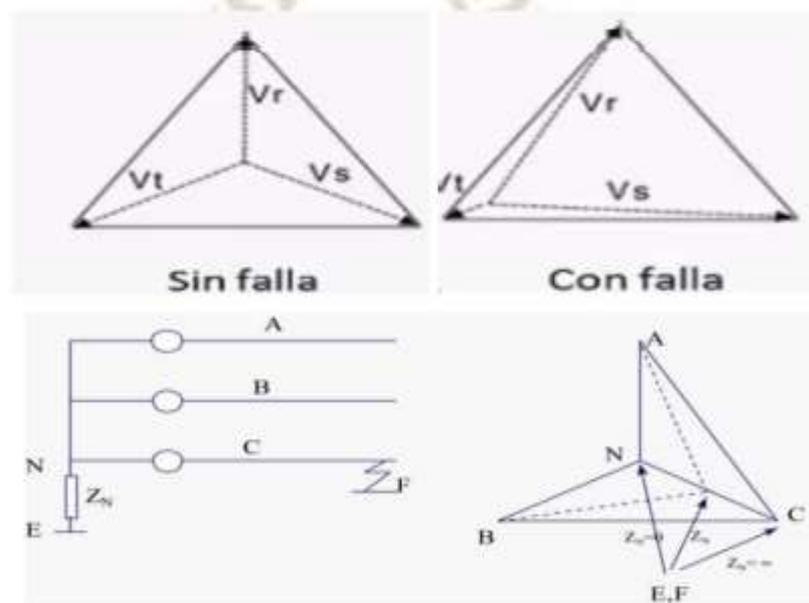


Figura 3. 9. Desbalance de voltajes en condiciones de falla por sobretensión[10].

### 3.2.10.3 Sobreteniones de maniobra

Un sistema de potencia contiene un gran número de capacitancias (principalmente capacitancia shunt de línea y condensadores de compensación) e inductancias (eje.: inductancias de fuga del transformador). Se manifiestan durante la ocurrencia de disturbios transitorios en la forma de oscilaciones amortiguadas[10].

Los ejemplos típicos son:

- Despeje de falla
- Corriente magnetizante del transformador
- Maniobras de capacitores
- Energización de líneas de transmisión sin carga, ondas viajeras
- Corriente de falla. Un flujo de corriente sinusoidal, solo limitado por la reactancia L.

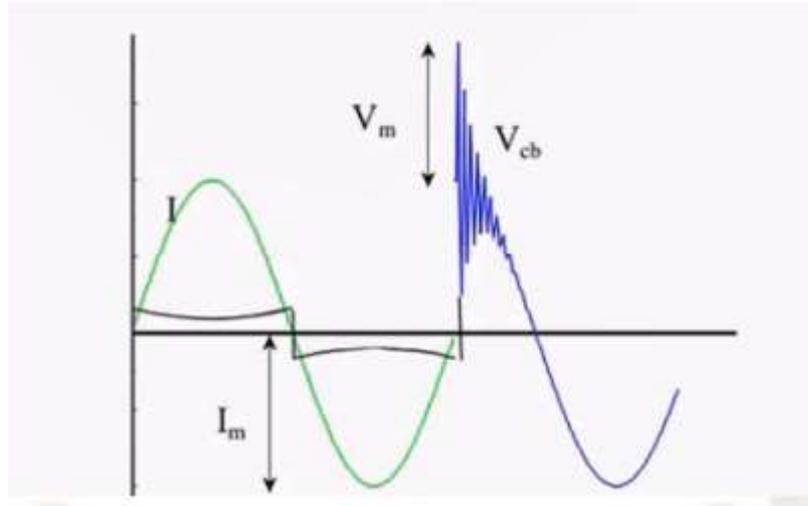


Figura 3. 10. Interrupción de corriente de falla, forma de onda [10].

Cuando el interruptor interrumpe la corriente de falla en el punto de corriente cero, la tensión a través del interruptor deberá recobrase para continuar con la tensión de suministro. La tensión de restablecimiento de alta frecuencia a través de los contactos del interruptor abierto se adiciona a la tensión de frecuencia industrial e introduce fatigas adicionales al aislamiento de los componentes del sistema de potencia, tal como se observa en la Figura 3. 10 [10].

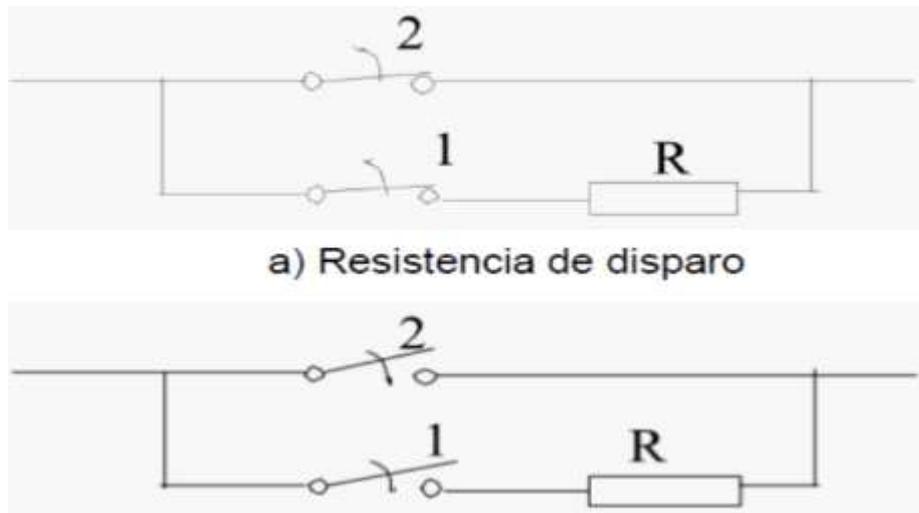


Figura 3. 11. Resistencias de disparo y cierre [10].

En la Figura 3. 11 se muestra la inserción por corto tiempo de resistencias de disparo y cierre en paralelo con el espacio separación de los contactos del interruptor principal, en el caso de un disparo, podría efectivamente reducir las sobretensiones de maniobra. Las resistencias de disparo drenan cargas atrapadas de la línea, mientras que, en el cierre, las resistencias producen oscilaciones amortiguadas en la energización de una línea[10].

#### 3.2.10.4 Sobretensiones por descargas atmosféricas

Aparte del devastador efecto de las descargas, el principal efecto en lo que al sistema de potencia concierne, tiene que ver con las sobretensiones por dichas descargas atmosféricas. La naturaleza de las descargas atmosféricas en la mayoría de las tormentas es cargada negativamente con un alto potencial respecto a tierra, alcanzando valores de varios cientos de MV como se observa en la *Figura 3. 12*. El campo eléctrico promedio entre las nubes y tierra es bajo debido a la altura de las nubes. Las descargas dentro de las nubes inician un movimiento de iones negativos descendentes para luego eventualmente establecer un canal a tierra[10].

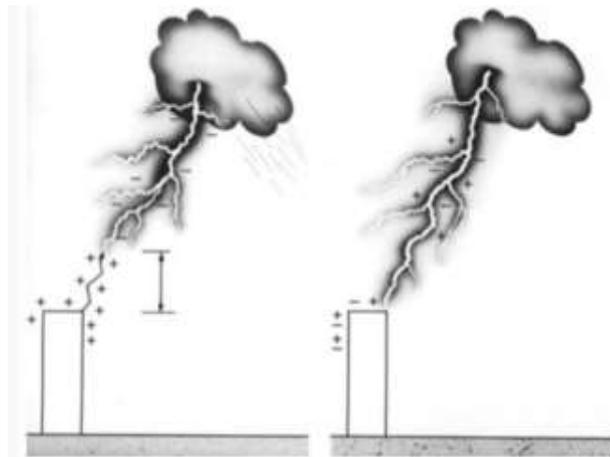


Figura 3. 12. Desarrollo de una descarga atmosférica[10].

### 3.2.11 Fallas en los descargadores.

Al evaluar el comportamiento de los descargadores de óxido de cinc, destaca tres aspectos relevantes

- corriente de fuga en función de la temperatura en la zona de bajo campo eléctrico
- campo eléctrico en el inicio del proceso de conducción
- capacidad de absorción de energía

El control del campo eléctrico en el inicio del proceso de conducción determina el espesor de material y se utiliza para definir el punto de conducción para una aplicación dada. La capacidad de absorción de energía va a definir el radio de los elementos de óxido de cinc. En las zonas de alto campo eléctrico, la conducción eléctrica es prácticamente independiente de la temperatura de operación, mientras que en las zonas de bajo campo eléctrico la conducción es fuertemente dependiente de la temperatura. Posterior a la operación del descargador por efecto de una sobretensión tipo impulso, la temperatura se eleva sustancialmente, modificando e incrementando la conducción en la zona de bajo campo eléctrico [4].

En consecuencia, el volumen de material de óxido de cinc debe responder a dos requerimientos:

- capacidad de absorción de energía durante el fenómeno tipo impulso
- temperatura máxima tolerable por el material posterior al impulso

### 3.2.11.1 Fallas durante los fenómenos tipo impulso

Si el elemento de óxido de cinc no es capaz de manejar el volumen de energía asociado a una sobretensión tipo impulso, la falla usualmente se debe a dos factores: - resquebrajamiento por esfuerzos mecánicos derivados de un calentamiento excesivo y no uniforme - perforación del elemento debido a puntos calientes que fusionan al material. La capa de aluminio sobre los elementos de óxido de cinc uniformiza la distribución de temperaturas en la superficie de contacto del material. La aparición de puntos calientes se debe a varios motivos: - defectos en los electrodos de contacto - presencia de impurezas dentro del material, que son partículas no conductoras - presencia de cavidades dentro del material - concentración de campo eléctrico en los bordes de los elementos[4].

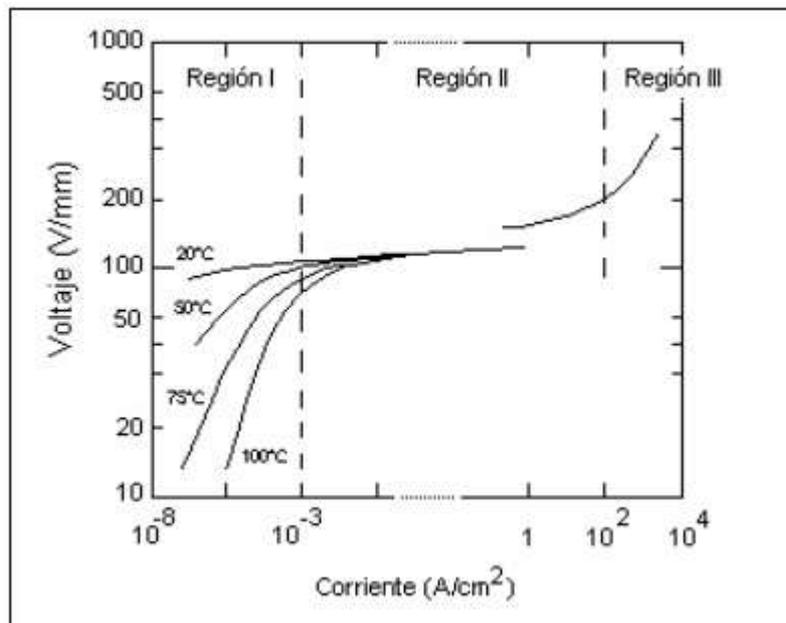


Figura 3. 13. Característica tensión-corriente del descargador de óxido de cinc [4].

### 3.2.11.2 Fallas en régimen permanente

La aplicación de la tensión en la región de bajo campo eléctrico se traduce en una corriente de fuga, de acuerdo a lo mostrado en la Figura 3. 13. La energía absorbida, traducida en pérdidas

joule, deben disiparse al ambiente, preservando el equilibrio térmico del elemento. Si esto no ocurre, existirá un incremento gradual de la energía absorbida, de las pérdidas Joule, originando un incremento de temperatura hasta la destrucción del material. En la región de bajo campo eléctrico la corriente de fuga a través del descargador denota una fuerte dependencia con la temperatura; la corriente a tensión nominal puede incrementar en un factor de 10 o más si la temperatura incrementa de 25 °C a 125 °C [4].

### **3.2.12 Criterios de selección de los descargadores de sobre voltajes**

Los criterios de selección de los descargadores que se describen a continuación, hacen referencia a aspectos eléctricos, mecánicos y ambientales, todos ellos importantes para garantizar la correcta operación y seguridad en la protección contra sobre voltajes transitorios mediante esquemas de protección con descargadores[5].

#### **3.2.12.1 Selección de la corriente nominal y la clase de descarga de línea**

La corriente nominal se escoge en función de los rangos de voltaje nominal como se presenta en el Anexo I, también se recomienda los valores de corriente nominal en función del voltaje máximo del sistema  $U_s$  como se muestra en el Anexo II [5].

#### **3.2.12.2 Selección de la línea de fuga**

La línea de fuga mínima debe ser al menos la exigida según el nivel de contaminación de la zona donde se instale según el *Anexo VIII*. Si los requisitos de fuga son superiores a 31 mm/kV, en ambientes con alto grado de contaminación, se debe consultar con los fabricantes para un diseño especial que cumpla con el revestimiento necesario para la fuga deseada[5].

#### **3.2.12.3 Análisis y comparación de las normas aplicables**

Según la norma IEC, 60099-4 y 60099-5, las condiciones principales para ser seleccionados los descargadores de sobre voltajes son:

- Voltaje de funcionamiento continuo
- Voltaje nominal
- Corriente nominal
- Clase de descarga de línea

- Clase de alivio de presión El Uc se selecciona de la misma forma que la norma ANSI, como indica el Anexo III[5].

El Voltaje nominal, que es la capacidad de TOVca los 10 segundos, se selecciona en comparación con el TOV del sistema requerido. La clase de descarga de la línea se selecciona mediante la comparación de la capacidad de energía del pararrayos con la descarga de energía requerida. La corriente nominal de descarga de un descargador se selecciona mediante el cálculo o estimación de la corriente de descarga debido a descargas atmosféricas que circula por el descargador. La clase de alivio de presión se selecciona en comparación con la corriente de falla del sistema. Así, la selección de los descargadores es prácticamente idéntica a el Anexo III[5].

### **3.2.13 Características de los descargadores de sobre voltajes de óxido metálico**

Las características necesarias para definir y seleccionar un descargador de sobre voltajes son:

- Voltaje asignado o nominal:
- Voltaje de operación continua:
- Capacidad del descargador frente a sobre voltajes temporales:
- Corriente nominal de descarga:
- Voltaje residual o de descarga
- Clase de alivio de presión
- Línea de fuga
- Tipo de aislamiento
- Frecuencia asignada[5].

#### **3.2.13.1 Voltaje asignado o nominal**

El voltaje asignado o nominal de un descargador es el valor eficaz (rms) máximo de voltaje a frecuencia industrial permisible entre sus terminales para el cual está previsto un funcionamiento correcto en condiciones de sobre voltajes temporales establecidos en los ensayos de funcionamiento según la norma internacional IEC 60099-4. Una vez realizado dicho ensayo, el valor del voltaje nominal del descargador corresponde a un valor normalizado inferior al obtenido en base a la ecuación (1). Los valores normalizados del voltaje asignado de

los descargadores (en kV rms) son establecidos por IEC 60099-4 como se indica en el Anexo IV[5].

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

### 3.2.13.2 Corriente nominal de descarga

La corriente nominal de descarga de un descargador es el valor de cresta del impulso de corriente tipo rayo (onda 8/20  $\mu$ s) que se usa para designar el descargador. El Anexo V muestra los valores normalizados en función del voltaje nominal del descargador según IEC 60099-4 y se aplica la ecuación (2) para calcular los sobre voltajes temporales[5].

$$TOV_c = \frac{k * U_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{T_t}{10} \right)^m \quad (2)$$

$U_s$  = Voltaje máximo del sistema

$k$  = Factor de falla a tierra

$T_t$  = Duración del sobre voltaje temporal en segundos

$m$  = Exponente que describe la característica del voltaje a frecuencia industrial

### 3.2.13.3 Clase de descarga de línea

La norma IEC 60099-5 (2000) ha definido la clase de descarga de línea como el valor relacionado con la capacidad de absorción de energía de los descargadores de 10kA y 20kA para la descarga de línea de gran longitud. De acuerdo con la norma IEC 60099-4 existen cinco clases de descarga de línea normalizada, para cada una de las clases se define una amplitud y una duración del impulso de corriente de larga duración que debe ser capaz de soportar el descargador. La normativa define los parámetros de ensayo que determinan la clase de descarga de línea del descargador. Estos parámetros se muestran en el Anexo VI, donde  $U_r$  es la tensión asignada del descargador[5].

### 3.2.13.4 Voltaje residual o de descarga

El voltaje residual ( $U_{res}$ ) de un descargador es el valor de cresta del voltaje que aparece entre los terminales de este durante el paso de la corriente de descarga. Su valor depende de la forma de onda y la magnitud de la corriente de descarga. Los voltajes residuales se obtienen para impulsos de corriente tipo maniobra 30/60  $\mu$ s para descargadores de 10 kA y 20 kA) y tipo rayo (8/20  $\mu$ s para todos los descargadores, independientemente de su corriente nominal, como se muestra en el Anexo VII[5].

### 3.2.13.5 Línea de fuga

La línea de fuga es la distancia medida a lo largo del aislamiento exterior del equipo, y es una medida de la capacidad del equipo respecto al riesgo de contorneo exterior en entornos contaminados. Se definen 4 niveles de contaminación, con una línea de fuga específica nominal mínima para cada uno de ellos, como muestra el Anexo VIII La línea de fuga mínima para un nivel de contaminación determinada se obtiene a partir de la línea de fuga especificada y del voltaje máximo del sistema como indica la ecuación (3)[5].

$$\text{Línea de fuga} \geq U_s * \frac{\text{mm}}{\text{kV}} \quad (3)$$

$U_s$  = Voltaje máximo del sistema

mm/kV = Línea de fuga específica nominal mínima

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detalla los métodos de investigación aplicables para obtener la información relevante acerca del estudio de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución. En la sección 4.1 se define los métodos de investigación que se utilizó en el proyecto, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el procedimiento lógico a seguir para el cumplimiento del proyecto de investigación, teniendo en cuenta la selección de los descargadores adecuados para los sistemas de distribución, mediciones de voltajes y armónicos, diseño del modelo del descargador en el software ATPDraw y presentación de soluciones.

### 4.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En esta sección se define los métodos de investigación aplicables al proyecto de investigación.

#### 4.1.1 Investigación de campo.

La Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. (EEASA), cuenta con el Complejo Eléctrico Operativo CATIGLATA en donde funciona el Centro Nacional de Capacitación y Entrenamiento del Sector Eléctrico; las áreas operativas, el centro de almacenamiento y los laboratorios se encuentra en una altitud de 2580 m.s.n.m. Las mediciones fueron ejecutadas en este lugar usando un transformador de 75 kVA para poder conectar, los descargadores a ser analizados, conectando el transformador a un banco de transformadores, este es el encargado de inyectar el voltaje necesario al transformador una vez hecha la conexión se verifica el valor de la puesta a tierra con el óhmetro debido a que la corriente de fuga también depende de puesta a tierra que se tenga, y empezar con las mediciones con la pinza Probador de corriente de fuga ALCL-80X, la que nos permite ver el valor del tercer armónico y el rms y para poder ver el tipo de onda se conecta el osciloscopio, teniendo limitaciones en el laboratorio como mediciones de temperatura para poder ver el compartamiento del descargador en otros climas debido que no dispone de un cuarto para ir controlando la misma.



Figura 4. 1. Lugar de la investigación experimental.

#### **4.1.2 Investigación experimental.**

Permite verificar la hipótesis a partir de simulaciones, utilizando software para el modelamiento de los descargadores y el estudio de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución.

#### **4.1.3 Investigación cuantitativa.**

Además, en el alimentador; techo propio de la provincia de Tungurahua, parroquia san Vicente de Picaihua, con una altitud de 2580 m.s.n.m, el día de las mediciones el clima variaba entre 20 a 24 °C que está conectado a un sistema de distribución de 13.8 kV, con la intención de obtener información real que ayude a la sustentación de este proyecto de investigación. Este proyecto de investigación tiene como objetivo obtener datos del tercer armónicos de corrientes por medio de la instalación de 12 descargadores distribuidos en 3 lotes(tipos); el primer lote de cuatro descargadores nuevos, el segundo lote de cuatro descargadores con menos de 10 años de uso, y el tercer lote con cuatro descargadores con más de 10 años de uso, las marcas de los descargadores que más se usan en los sistemas de distribución eléctrica, las cuatro marcas en cada lote, que cumplan con las especificaciones técnicas del MEER, el sistema tiene la puesta a tierra y un seccionador solo para la investigación; además de analizar el comportamiento de la corriente de fuga y la forma de onda del tercer armónico de corriente con las mediciones tomadas de cada descargador en diferente hora para poder tener datos pegados a la realidad, las mediciones realizadas con la con la pinza Probador de corriente de fuga ALCL-80X, obteniendo varios valores, en relación a las variables dependientes e independientes, así como en la

definición de resultados finales, mediante datos numéricos y la visualización de la simulación para verificar la hipótesis.



Figura 4. 2. Lugar donde se realizó la investigación cuantitativa.

#### 4.1.4 Metodología para el Análisis de la Corriente de Fuga

La evaluación de la condición basada en la corriente de fuga es el método más ampliamente elegido para poder monitorear el envejecimiento y el deterioro de los pararrayos de óxido de zinc en particular se considera que la componente resistiva de la corriente de fuga está directamente relacionada con la degradación del descargador [11].

La corriente de fuga se mide de dos maneras; modo en línea y fuera de línea del pararrayos, en el modo de línea, la corriente de fuga se obtiene sin desconectar el descargador de la red es este el método a usar que ya la pinza Leakage Current Clamp Tester ALCL-80X, el modo fuera de línea requiere la eliminación del descargador de operación[11].

El componente capacitivo de la corriente de fuga se atribuye a la capacitancia y la permitividad del elemento de óxido de zinc no lineal. Por otro lado, la corriente de fuga resistiva varía con los cambios en las características del ZnO, el voltaje aplicado y la temperatura ambiente [12]. La temperatura de la superficie del descargador de ZnO aumenta debido al

aumento continuo de la corriente resistiva [12]. Por lo tanto, un aumento en la magnitud de la corriente de fuga resistiva es una indicación del envejecimiento y deterioro del pararrayos de ZnO [13]. Por lo tanto, la extracción de la corriente de fuga resistiva es esencial para evaluar el estado actual del pararrayos de ZnO. Se han propuesto varias técnicas para poder medir la corriente de fuga total. En la Figura 4. 3 se indica la clasificación de estas y sus detalles se analizan en una tabla resumen como se muestra en el Anexo XVIII.

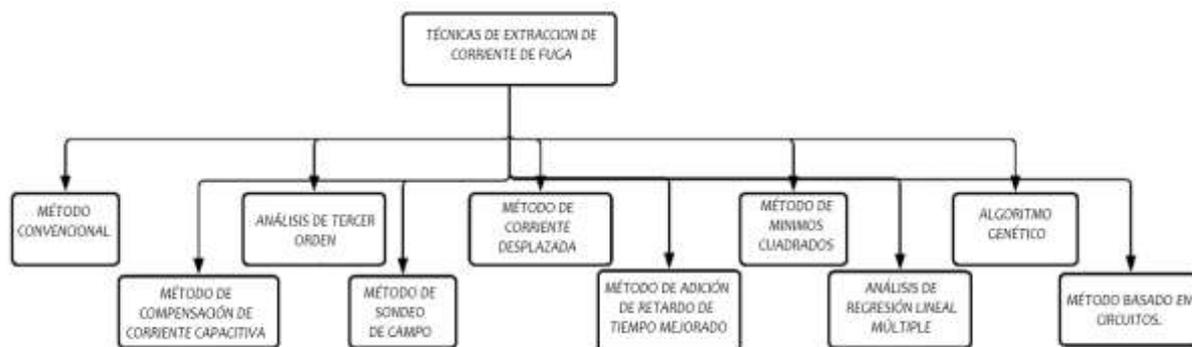


Figura 4. 3. Métodos para analizar la corriente de fuga [11].

## 4.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS

La presente sección define las distintas normativas nacionales e internacionales aplicadas al proyecto de investigación.

### 4.2.1 Norma IEC 60099-4

La norma IEC 60099-4 proporciona distintos parámetros que son utilizados en el presente caso de estudio, como los valores normalizados de corriente y voltaje de los descargadores referenciados en el Anexo I y Anexo II respectivamente, también permite identificar la clase de descarga de línea en base a los parámetros para el ensayo de descarga de línea en descargadores de 10 y 20 kA como se muestra en el Anexo VI y los valores de forma de onda y magnitud de la corriente de descarga sobre los que los fabricantes deben realizar ensayos para obtener los voltajes residuales tal como se indica en el Anexo VII[14].

### 4.2.2 Norma IEC 60099-5

La norma IEC versión 60099-5 define la línea de fuga específica nominal en función del nivel de contaminación referenciada en el Anexo VIII ya que es vital definir el estado físico del lugar para el caso de estudio, además especifica los valores característicos de la corriente nominal de descarga y valores habituales de la clase de descarga de línea en el Anexo II y Anexo V respectivamente, indispensable para seleccionar el descargador de sobretensión[15].

#### **4.2.3 IEEE Working Group 3.4.11**

Esta norma hace referencia al modelo del descargador de sobretensión que recomienda un grupo de investigación de la IEEE como se muestra en la Figura 4. 8, el cual es indispensable para simular adecuadamente en el software ATPDraw 7.2, además define las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8) para encontrar los valores que componen los elementos en el modelo IEEE además de las ecuaciones (9) y (10) que ayudan a calcular los valores de las resistencia variables A0 y A1 del descargador[16].

#### **4.2.4 IEEE Std C62.11**

El presente proyecto de investigación hace énfasis en la norma IEEE C62.11 la cual sirve para el modelamiento del descargador de sobretensión, también identifica y corrobora los valores habituales y nominales que se eligen para seleccionar el descargador a un nivel de voltaje de distribución 13.8 kV tal como lo define la tabla de los valores normalizados del máximo voltaje de operación continuo en el Anexo III[17].

#### **4.2.5 ISO 9001**

La norma ISO 9001 define las características técnicas que deben tener en cuenta los distintos fabricantes de descargadores de sobretensión para cumplir con el estándar de calidad que demanda el mercado tanto nacional como internacional, es por aquello que los descargadores seleccionados para el caso de estudio como son: Celeco, Balestro, Ohio Brass y Mcklaren hacen referencia a esta norma en su estado de fabricación[18].

#### **4.2.6 MEER**

Los lineamientos del Ministerio de electricidad y energías renovables (MEER), establecen para el caso de estudio que se tiene dos opciones para un descargador de 10 KA, clase 1 y clase 2 ( $U_s \leq 52 \text{ KV}$ ) y en el modelado del descargador se presentarán los valores establecidos por el MEER para el modelamiento en el software ATPDraw [19].

#### **4.2.7 Norma NTE INEN 3098**

La norma NTE INEN 3098 establece el máximo voltaje de la red para voltajes nominales superiores a 1 kV y que no supere los 35 kV, en el Anexo XVII se indican los diferentes niveles de voltajes requeridos, en cuanto al caso de estudio es necesario identificar el nivel de voltaje de distribución (13.8 kV) el cual servirá para calcular el voltaje continuo de operación del descargador de sobretensión[20].

### 4.3 SELECCIÓN DE DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN PARA 13.8 KV

En este apartado se detallará los principales criterios y cálculos para seleccionar adecuadamente los descargadores de sobretensión para un nivel de voltaje de distribución (13.8kV).

#### 4.3.1 Voltaje continuo de operación

Según los parámetros establecidos por la norma NTE INEN, el máximo voltaje de red para 13.8 kV es igual a 14.52 kV, pero debido a que es un voltaje fase-fase es necesario calcular el voltaje fase-tierra mediante la ecuación (1), ya que el descargador se instala entre fase y tierra.

$$U_c \geq \frac{14.52 \text{ kV}}{\sqrt{3}}$$

$$U_c \geq 8.38 \text{ kV}$$

#### 4.3.2 Capacidad para soportar sobretensiones temporales

Para un descargador de sobretensión se debe tener en cuenta que existe una baja impedancia a tierra con un factor k igual a 1.4 mientras que la duración del TOV es 1s, además para los diferentes diseños de descargadores el exponente m varía entre 0.022 y 0.018 por tanto es recomendable utilizar un valor promedio de 0.02 y utilizando la ecuación (2) se obtiene el siguiente resultado de sobretensiones temporales.

$$TOV_c = \frac{1.4 * 14.52}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{10} \right)^{0.02}$$

$$TOV_c = 11.20 \text{ kV}$$

#### 4.3.3 Corriente nominal y clase de descarga de línea

Para elegir la corriente nominal del descargador de sobretensión, la IEC 60099-4[14] establece rangos de corrientes nominales según los voltajes nominales como se muestra en el Anexo V, por lo cual para el voltaje 13.8 kV se tienen corrientes nominales de 2.5 kA, 5 kA, y 10 kA. Mientras tanto para la clase de descarga de línea se elige en base al Anexo VI, donde se tienen la clase 1 y 2 para la corriente nominal de 10 kA.

Además, en la norma MEER[19] se establece los valores del descargador para la protección de una línea aérea de 13.8 kV, con la intención de que el descargador pueda soportar impulsos de corriente muy severos se escogen los siguientes valores.

- Corriente nominal del descargador = 10 kA

- Clase de descarga de la línea = Clase 2

#### 4.3.4 Línea de fuga

Para calcular la línea de fuga se debe elegir la línea de fuga específica nominal mínima en función del nivel de contaminación, según el Anexo VIII corresponde a 25 mm/kV teniendo en cuenta las condiciones físicas del caso de estudio y aplicando la ecuación (3) se obtiene la línea de fuga para el descargador a un voltaje máximo del sistema de 14.52 kV.

$$\text{Línea de fuga} \geq 14.52 \text{ kV} * 25 \text{ mm/kV}$$

$$\text{Línea de fuga} \geq 363 \text{ mm}$$

#### 4.3.5 Especificaciones de los descargadores de sobretensión seleccionados

Para el caso de estudio de este proyecto de investigación se eligen 4 tipos de descargadores en función a los criterios de selección propuestos por normas nacionales e internacional como son NTE INEN 3098 [20], IEC 60099-4[14] y IEC 60099-5[15] para el nivel de voltaje de distribución 13.8 kV.

La Tabla 4. 1 indica que la corriente nominal de los descargadores a utilizarse debe ser de 10 kA, la clase de descarga debe ser clase 2, el voltaje continuo de operación debe ser mayor o igual a 8.38 kV, la capacidad para soportar sobretensiones temporales debe ser mayor o igual a 11.20 kV y la línea de fuga mayor o igual a 363 mm. Comparando estos valores con los 4 descargadores seleccionados se observa que todos cumplen con estos criterios y están aptos para instalarse en los sistemas de distribución de 13.8 kV donde se realizarán las pruebas de laboratorio.

Tabla 4. 1. Características técnicas de los descargadores seleccionados para el nivel de voltaje de distribución 13.8 kV.

	<b>Criterio</b>	<b>Celeco</b>	<b>Balestro</b>	<b>Ohio Brass</b>	<b>Mcklear</b>
<b>Corriente nominal</b>	10 kA	10 kA	10 kA	10 kA	10 kA
<b>Clase de descarga</b>	2	2	2	2	2
<b>Voltaje nominal</b>	14.52 kV	12 kV	15 kV	15 kV	15 kV
<b>Voltaje continuo de operación</b>	≥8.38 kV	10.2 kV	12.7 kV	12.7 kV	12.7 kV
<b>TOV (10s)</b>	≥11.20 kV	12.3 kV	12.9 kV	12.8 kV	12.5 kV
<b>Línea de fuga</b>	≥ 363 mm	420 mm	375 mm	391 mm	380 mm
	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>	<b>CUMPLE</b>

Los descargadores seleccionados tanto para las pruebas de laboratorio y modelamiento en ATPDraw son:

Marca CELECO [21] modelo B1857 descargador de óxido de zinc polimérico para sistemas de distribución, cumple con los parámetros de las normas la IEC60099-4[14] e IEEE C62.11[17] y por seguridad están diseñados para no romperse ante sobrecargas como se muestra en la , las características eléctricas acorde al criterio de selección como se indican en el Anexo XI y

Anexo XII.



Figura 4. 4. Descargador de sobretensión CELECO[21].

Marca BALESTRO[22] modelo PBP 15/X descargador de óxido de Zinc polimérico (silicón) como se muestra en la Figura 4. 5, cumplen con normas internacionales las cuales además de proteger al equipo ante descargas de sobretensiones, también son resistentes a cambios climáticos, altamente resistentes a radiaciones, etc. Las características eléctricas y mecánicas se presentan en los Anexo IX y Anexo X.

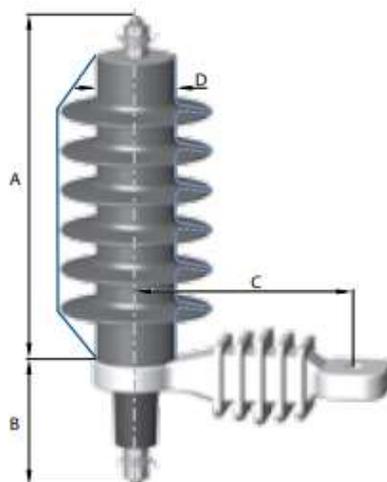


Figura 4. 5. Descargador de sobretensión BALESTRO[22].

Marca OHIO BRASS [23] modelo PVL-LP clase 2 descargador polimérico como se observa en la Figura 4. 6, cumple con la norma ISO 9001[18] y prevalece estrictos controles de acuerdo con la norma IEC 60099-4[14], sus envolventes poliméricas son resistentes al manejo brusco y no se fragmentarán en caso de una falla. Las características eléctricas y mecánicas están marcadas en los

Anexo *XIII* y Anexo *XIV*.



Figura 4. 6. Descargador de sobretensión OHIO BRASS[23].

Marca MCKLEAR [24] modelo 221613 descargador polimérico como se muestra en la Figura 4. 7, cumple con los parámetros de las normas IEC 60099-4[14] e IEEE C62. 11 [17], diseñados para resistir descargas en sistemas de distribución en media y alta tensión. Las características eléctricas y mecánicas están enmarcadas en los Anexo *XV* y Anexo *XVI*.



Figura 4. 7. Descargador de sobretensión MCKLEAR[24].

#### **4.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO IEEE DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

El modelo IEEE fue recomendado por IEEE W.G. 3.4.11[16], donde se estableció un modelo dependiente de la frecuencia como se muestra en la Figura 4. 8 conformados por A0 y A1 que representan las dos resistencias no lineales y están separadas por un filtro RL (resistor e inductor). Para corrientes de descarga de pararrayos con tiempo de subida lento, la influencia del filtro es muy pobre; por aquello, A0 y A1 están esencialmente en paralelo y caracterizan el comportamiento estático del descargador. Para corrientes de sobretensión frontales rápidas, la impedancia del filtro se vuelve más significativa, de hecho, la inductancia L1 deriva más corriente en la rama no lineal A0. Dado que A0 tiene un voltaje más alto para una corriente dada que A1, el modelo genera un voltaje mayor entre sus terminales de entrada, lo que coincide con las características dinámicas del descargador[16].

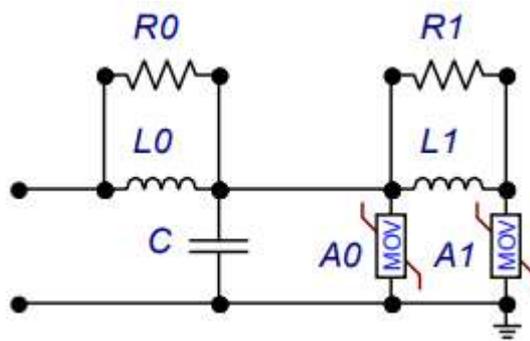


Figura 4. 8. Modelo IEEE dependiente de la frecuencia[16].

Las curvas propuestas para A0 y A1 se muestran en la Figura 4. 9 los valores por unidad se refieren al valor pico de la tensión residual medida durante una prueba de descarga con pico de corriente de impulso estándar de 10 kA ( $V_{r,8/20}$ ). Estas curvas deben ajustarse para lograr un buen ajuste con los voltajes residuales publicados para conmutar la descarga de sobre voltajes, la inductancia L0 representa la inductancia asociada con los campos magnéticos en las inmediaciones del Descargador. La resistencia R0 se utiliza para evitar oscilaciones numéricas cuando se ejecuta el modelo con un programa digital. la capacitancia C0 representa la capacitancia externa asociada a la altura del descargador[16].

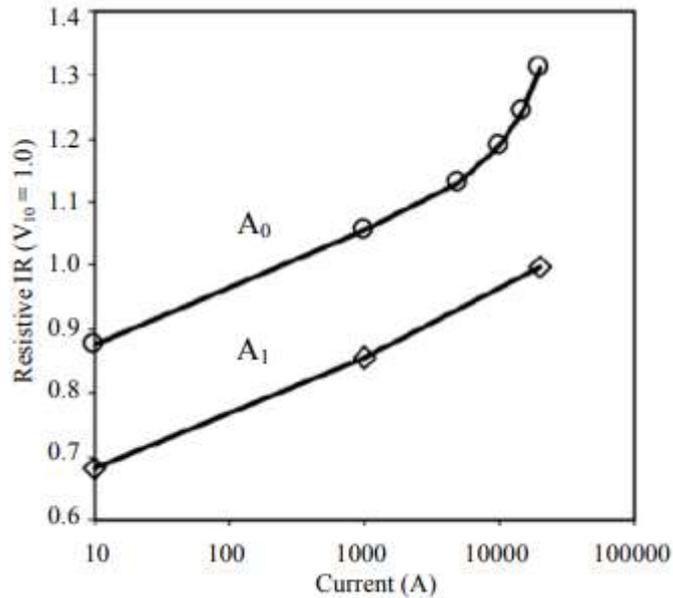


Figura 4. 9. Característica no lineal para A0 y A1[16].

#### 4.4.1 Parámetros del modelo IEEE para el descargador de sobretensión

Para calcular los parámetros del descargador de sobretensión se aplica las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), las mismas permiten encontrar el valor de las resistencias R0 y R1 en ohmios, las inductancias L0 y L1 en ( $\mu H$ ) y el Capacitor en ( $\rho F$ ).

Donde:

d = altura del descargador en metros

n = número de varistores o columnas en paralelo del descargador

Se debe tener en cuenta que para descargadores que operan en sistemas menores a 500 KV, generalmente son de una sola columna[7].

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (4)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} (\Omega) \quad (5)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (6)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} (\mu H) \quad (7)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} (\rho F) \quad (8)$$

#### 4.4.2 Cálculo de las resistencias variables A0 y A1

Para realizar el cálculo de las resistencias variables se debe utilizar la Tabla 4. 2, donde se presentan los valores por unidad referida al voltaje en las resistencias variables A0 y A1 en función de la corriente, estos valores han sido tomados del libro *Insulation Coordination for Power Systems* de Andrew R. Hileman[25].

$$V.A0(kV) = V.A0(p.u) * Upl \quad (9)$$

$$V.A1(kV) = V.A1(p.u) * Upl \quad (10)$$

Utilizando esta base en por unidad del voltaje que debe tener en cada resistencia (A0, A1), calculamos los voltajes en kV en función del voltaje residual del descargador al impulso tipo rayo, con las ecuaciones (9) y (10).

Tabla 4. 2. Relación Voltaje en p.u vs Corrientes en las resistencias A0 Y A1[25].

Corriente (KA)	V.A0 (p.u)	V.A1 (p.u)
10	0.875	
100	0.963	0.769
1000	1.05	0.85
2000	1.088	0.894
4000	1.125	0.925
6000	1.138	0.938
8000	1.169	0.956
10000	1.188	0.969
12000	1.206	0.975
14000	1.231	0.988
16000	1.25	0.994
18000	1.281	1
20000	1.313	1.006

Una vez encontrado los parámetros del descargador, se recomienda ajustarlos para obtener los valores de los voltajes residuales tanto para impulso tipo rayo (Upl) como para maniobras (Ups)[7], este proceso se realiza mediante el siguiente procedimiento:

- Ajustar L1, a través de un proceso iterativo, hasta obtener el voltaje residual por impulso tipo rayo (Upl) dado por el fabricante según el catálogo[7].
- Ajustar los valores A0 y A1, hasta obtener el valor del voltaje residual para maniobras (Ups) dado por el fabricante según el catálogo[7].

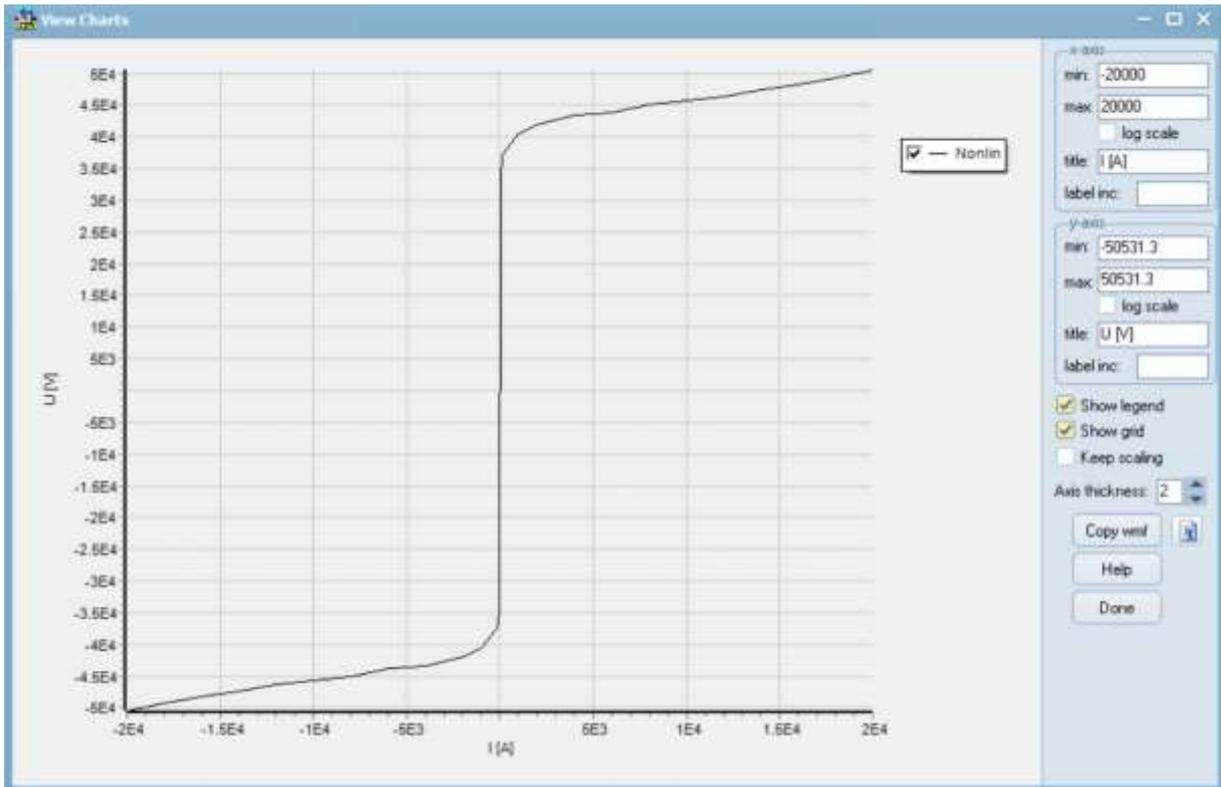


Figura 4. 10. Característica no lineal para A0 simulado en ATPDraw 7.2.

En la Figura 4. 11 y Figura 4. 12 se compara las formas de onda tanto para la característica no lineal A0 y A1 simuladas en el software ATPDraw 7.2 en base a los cálculos realizados de las resistencias variables de los diferentes descargadores.

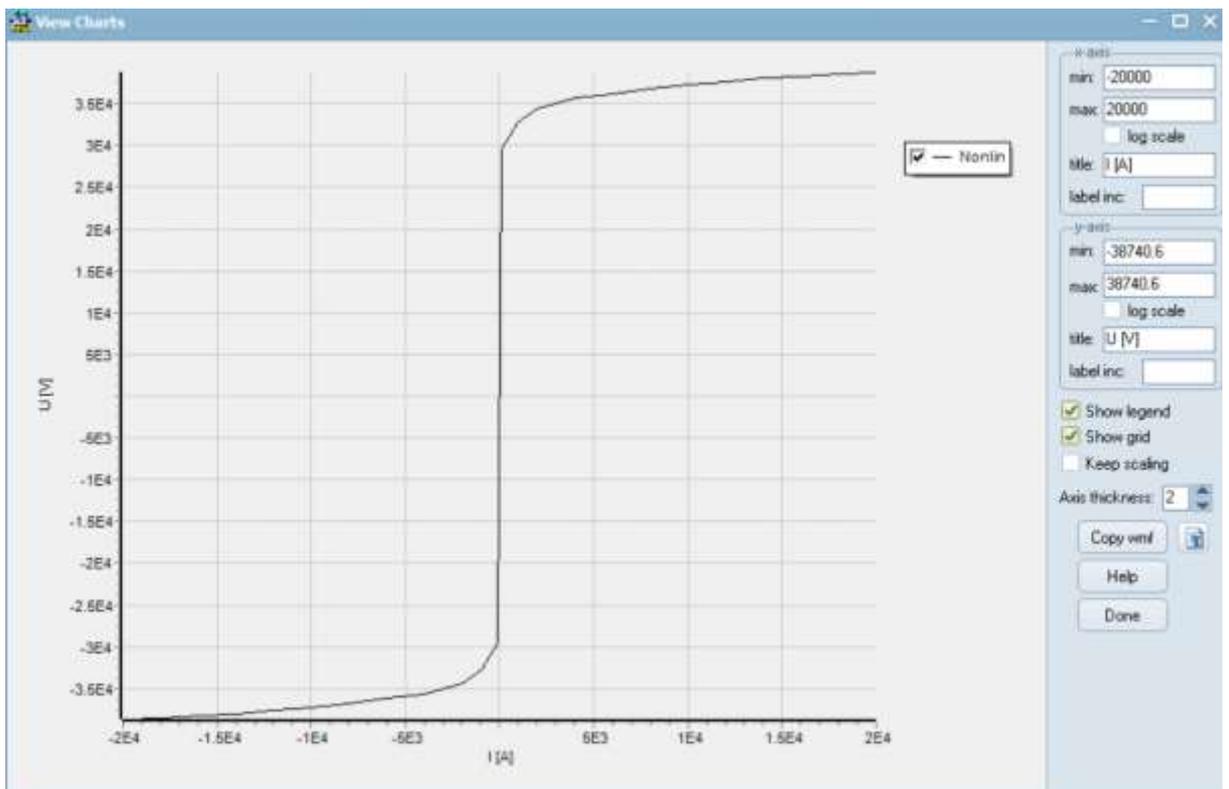


Figura 4. 11. Característica no lineal para A1 simulado en ATPDraw 7.2.

#### 4.4.3 Modelamiento del descargador de sobretensión en el software ATPDraw 7.2

Una vez identificado el modelo IEEE del descargador de sobretensión se procede a incorporarlo en el software ATPDraw 7.2 como se observa en la Figura 4. 12, donde se incluye elementos propios para su simulación con el fin de obtener los resultados esperados.

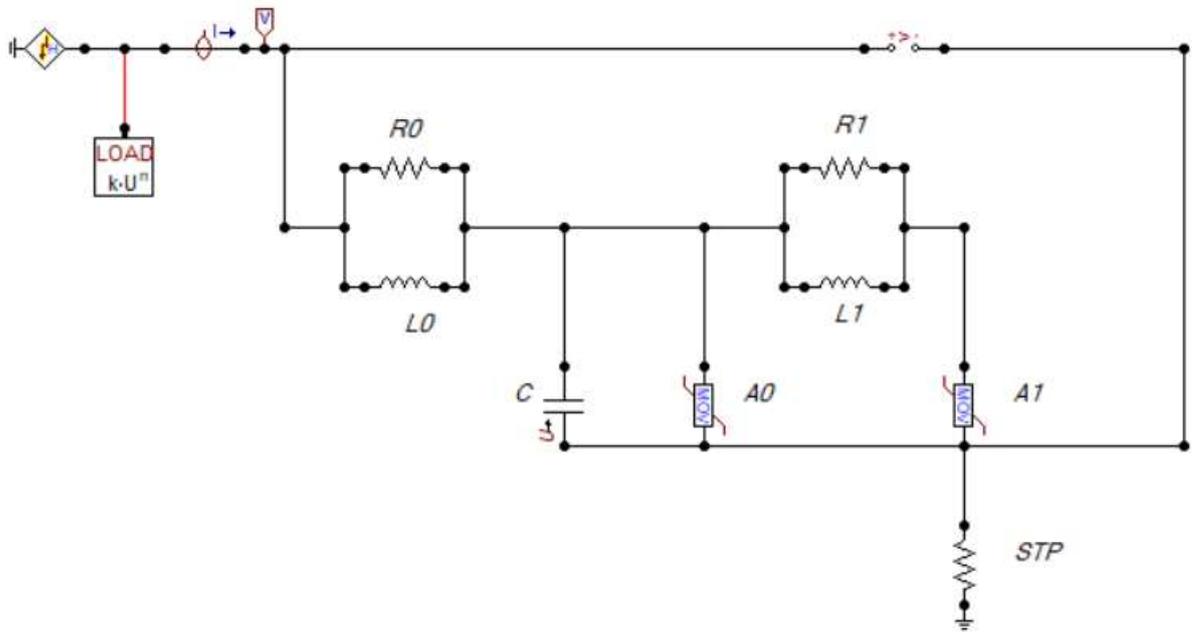


Figura 4. 12. Modelo IEEE del descargador simulado en ATPDraw 7.2.

En la Tabla 4. 3 se encuentra detallado los diferentes componentes eléctricos que serán utilizados para simular el modelo IEEE del descargador de sobretensión, dispone de una fuente de corriente HEIDLER la cual sirve para simular el impulso tipo rayo y tipo maniobra, además de introducir los tiempos de simulación para cada caso como se muestra en la Figura 4. 13.

Component: HEIDLER		
Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	2000
T <sub>f</sub>	s	3E-6
tau	s	3E-6
n		3.25
T <sub>start</sub>	s	0
T <sub>stop</sub>	s	1000

Figura 4. 13. Características de la fuente HEIDELER.

Además, se cuenta con probador de corriente y voltaje conectado al inicio del modelo para que se calcule las corrientes y voltajes, 2 resistores, 2 inductores y un capacitor que forman el modelo IEEE del descargador de sobretensión. También se incluye 2 componentes MOVN las cuales sirven para caracterizar las resistencias variables A0 y A1, una resistencia a tierra para estabilizar al circuito y una carga P y Q para observar cómo se comporta el descargador ante la presencia de la misma.

Tabla 4. 3. Componentes de la simulación en ATPDraw 7.2.

Componente	Cantidad	Característica
HEIDLER	1	Fuente
Open current probe	1	Monitor
Open voltage probe	1	Monitor
Open branch voltage probe	1	Monitor
Resistor	2	Elemento resistivo
inductor	2	Elemento inductivo
capacitor	1	Elemento capacitivo
MOVN	2	Resistencias variables
STP	1	Resistencia a tierra
LOAD	1	Carga P y Q

Para establecer las formas de ondas características de los descargadores de sobretensión se realizar las siguientes pruebas de calibración con sus respectivos datos como se indican a continuación.

- Prueba de calibración del voltaje residual al impulso tipo rayo se utiliza la siguiente onda con respecto a la corriente nominal:
  - ✓  $I_{nom} = 10 \text{ kA}$  / Onda de 8 / 20  $\mu\text{s}$
  - ✓ Frente de onda: 8  $\mu\text{s}$  (al 100 % de la amplitud de la corriente)
  - ✓ Tiempo de cola: 20  $\mu\text{s}$  (al 50 % de la amplitud de la corriente)
  - ✓  $U_{pl} = 31.6 \text{ kV}$
- Prueba de calibración del voltaje residual al impulso tipo maniobra, en esta ocasión se dispone de una diferente forma de onda debido a la variación de la corriente nominal:
  - ✓  $I_{m\acute{a}n} = 0.5 \text{ kA}$  / Onda de 30 / 60  $\mu\text{s}$
  - ✓ Frente de onda: 30  $\mu\text{s}$  (al 100 % de la amplitud de la corriente)
  - ✓ Tiempo de cola: 60  $\mu\text{s}$  (al 50 % de la amplitud de la corriente)
  - ✓  $U_{ps} = 23,4 \text{ kV}$
- Fuentes de corriente:
  - ✓ Tipo rayo: 10 kA / 8 - 20  $\mu\text{s}$
  - ✓ Tipo maniobras: 0,5 kA / 30 - 60  $\mu\text{s}$
- Tiempos:
  - ✓ Tiempo de integración:  $\Delta T = 1\text{E-}8 \text{ s}$ .
  - ✓ Tiempo de simulación:  $T_{max} = 50\text{E-}6 \text{ s}$ .

#### **4.5 RECONOCIMIENTO Y MEDICIÓN DEL TERCER ARMONICO DE CORRIENTE**

A continuación, se presentará la información más relevante acerca del lugar y las mediciones realizadas.

##### **4.5.1 Recolección de información**

Toda la información acerca del presente proyecto de investigación se realizó en los laboratorios técnicos de la EEASA S.A ubicado en la ciudad de Ambato, bodegas técnicas CATIGLATA como se muestra en la Figura 4. 14. Se decide realizar las pruebas en el transformador trifásico (75 kVA) con el propósito de observar las formas de ondas del tercer armónico por medio del osciloscopio.



Figura 4. 14. Ensayos de laboratorio.

#### 4.5.2 Descargadores seleccionados

De acuerdo a los parámetros establecidos por las normas IEC 60099-4 y 60099-5, se seleccionó el lote de cuatro descargadores hábiles en el mercado tal como se muestra en la siguiente Tabla 3. 1 y lo establece la norma MEER[19], estos descargadores poseen sus características constructivas y técnicas como se muestra en los Anexo IX, Anexo XI y

Anexo XIII.

Tabla 3. 1 información de los descargadores.

Nombre	Modelo	Peso (kg)
Balestro	PBP 15/ X	3,20
Celeco	B1857	3,10
Ohio Brass	PVI-LP	3,30
Mcklear	221613	2,40

#### 4.5.3 Instrumento para realizar las mediciones de laboratorio.

Para realizar la toma de medidas, en campo de cada descargador se usó el probador de descargadores digital ALCL-80X como se observa en la Figura 4. 15, existen diversas marcas y dispositivos para realizar esta medición, pero justamente esta es la pinza que la EEASA dispone, y con la que se realiza las mediciones del tercer armónico, ya que antiguamente se

usaba pruebas termográficas en donde se veían los puntos calientes y con eso se procedía a cambiar el descargador[26].



Figura 4. 15. Probador de descargadores digital ALCL-80X[26].

#### 4.5.4 Esquema de conexión para realizar la medición del tercer armónico

En la Figura 4. 16 se muestra el esquema del montaje en el laboratorio para realizar las mediciones de la corriente de fuga en base al tercer armónico, el cual comprende un osciloscopio digital, diodos Zener conectados espalda con espalda para protección contra sobretensiones y un ALCL-80X resistencia de derivación ( $R_{sh}$ ). El divisor capacitivo se utiliza para medir el voltaje aplicado. Mientras que, la corriente de fuga a través del varistor y el voltaje total aplicado se capturaron utilizando un osciloscopio de almacenamiento digital de dos canales y los valores del tercer armónico mediante el ALCL-80X[27].

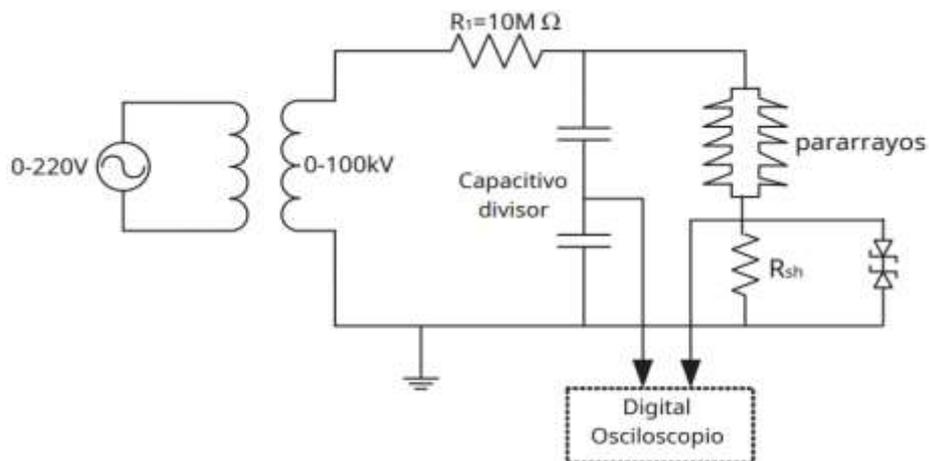


Figura 4. 16. Montaje experimental para la medición del tercer armónico[27].

Además, en la Figura 4. 17 se observa el esquema para detectar a corriente de fuga del descargador de sobretensión, el cual sirve para comprender parte de la metodología y el método que se ha utilizado en este proyecto de investigación para analizar y presentar posteriormente

los resultados del envejecimiento de los descargadores analizando el tercer armónico de corriente.

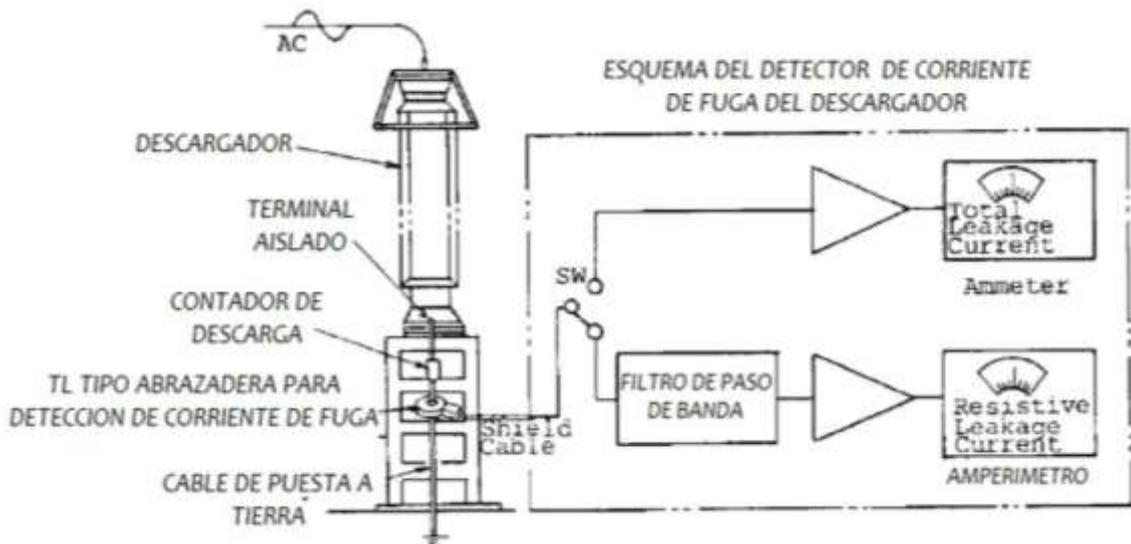


Figura 4. 17. Esquema detector del tercer armónico[12].

Parte de la investigación se centra en el comportamiento del descargador de sobretensión instalado en la red de distribución 13.8 kV, para lo cual se hace énfasis en la Figura 4. 18 que muestra como es el método de protección del descargador al momento de producirse una descarga eléctrica.



Figura 4. 18. Esquema del funcionamiento del descargador [11].

## 5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presenta y discute todos los resultados obtenidos del estudio de las corrientes de fuga en descargadores de sobretensión de los sistemas eléctricos de distribución, tal como el modelamiento de los diferentes descargadores, sus componentes y las formas de

ondas tanto de corriente y voltaje simuladas en el software ATPDraw 7.2, así como los resultados de las mediciones realizadas en laboratorios técnicos de la EEASA y el análisis propio de las corrientes de fuga para identificar el nivel de envejecimiento de los descargadores.

## 5.1 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL DESCARGADOR CELECO

A continuación, se muestran los resultados del modelamiento IEEE del descargador de sobretensión CELECO simulado en el software ATPDraw 7.2 desde los cálculos de sus parámetros principales hasta la discusión de las figuras obtenidas.

### 5.1.1 Cálculos de los parámetros del descargador CELECO modelo IEEE

El cálculo de los diferentes parámetros del modelo IEEE del descargador se realiza en base a las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), donde la altura total del descargador CELECO es 0.250 metros, según las características mecánicas identificadas en el

Anexo XII.

$$R_0 = 100 \frac{0.25}{1} (\Omega)$$

$$\mathbf{R_0 = 25(\Omega)}$$

$$R_1 = 65 \frac{0.25}{1} (\Omega)$$

$$\mathbf{R_1 = 16.25(\Omega)}$$

$$L_0 = 0.2 \frac{0.25}{1} (\mu H)$$

$$L_0 = 0.05(\mu H)$$

$$\mathbf{L_0 = 0.00005(mH)}$$

$$L_1 = 15 \frac{0.25}{1} (\mu H)$$

$$L_1 = 3.75(\mu H)$$

$$\mathbf{L_1 = 0.00375(mH)}$$

$$C = 100 \frac{1}{0.25} (\rho F)$$

$$C = 400(\rho F)$$

$$C = 0.0004(\mu F)$$

En la Tabla 5. 1 se establece el resumen de los parámetros del modelo IEEE del descargador con los valores de la capacidad de cada uno de los componentes a ser simulados, los resistores en ( $\Omega$ ), los inductores en (mH) y el capacitor en ( $\mu F$ ).

Tabla 5. 1. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (CELECO).

Parámetros	R0 ( $\Omega$ )	R1 ( $\Omega$ )	L0 (mH)	L1 (mH)	C ( $\mu F$ )
Valores	25	16.25	0.00005	0.00375	0.0004

### 5.1.2 Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador CELECO

Tomando en consideración la tensión máxima residual al impulso de corriente de rayo 8/20 us 10 kA del descargador CELECO (  $U_{pl} = 39.7$  kV), se procede a calcular los valores de las resistencias variables tanto para A0 y A1, aplicando las ecuaciones (9) y (10) descritas en el anterior capítulo, de esta manera se logra obtener los resultados presentados en la Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2. Resistencias variables para A0 y A1(CELECO)

Corriente (KA)	A0 (kV)	A1 (kV)
10	34737.5	
100	38231.1	30529.3
1000	41685	33745
2000	43193.6	35491.8
4000	44662.5	36722.5
6000	45178.6	37238.6
8000	46409.3	37953.2
10000	47163.6	38469.3
12000	47878.2	38707.5
14000	48870.7	39223.6
16000	49625	39461.8
18000	50855.7	39700
20000	52126.1	39938.2

### 5.1.3 Ajuste de las resistencias variables A0 y A1 del descargador CELECO

El ajuste de las resistencias variables A0 Y A1 es un procedimiento necesario para lograr caracterizar los valores propios de fabricación del descargador CELECO, el cual consiste en modificar estos valores hasta llegar al Upl deseado, la Tabla 5. 3 expresa los valores ajustados de las resistencias variables las mismas serán incluidas en la componente MOVN del software ATPDraw 7.2 para su correcta simulación.

Tabla 5. 3. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(CELECO)

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	31737.5	
100	35231.1	27529.3
1000	38685	30745
2000	40193.6	32491.8
4000	41662.5	33722.5
6000	42178.6	34238.6
8000	43409.3	34953.2
10000	44163.6	35469.3
12000	44878.2	35707.5
14000	45870.7	36223.6
16000	46625	36461.8
18000	47855.7	36700
20000	49126.1	36938.2

#### **5.1.4 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador**

##### **CELECO en ATPDraw 7.2**

En la Figura 5. 1 se observa el comportamiento del voltaje del modelo IEEE del descargador CELECO al momento de actuar ante un impulso tipo rayo de 10 kA, el valor Upl proporcionado por los datos del fabricante es de 39.7 kV según el Anexo XI, mientras que el valor pico Upl simulado en el software ATPDraw 7.2 es de 40.01 kV, donde se puede concluir que la simulación ha sido correcta por la semejanza de sus valores.

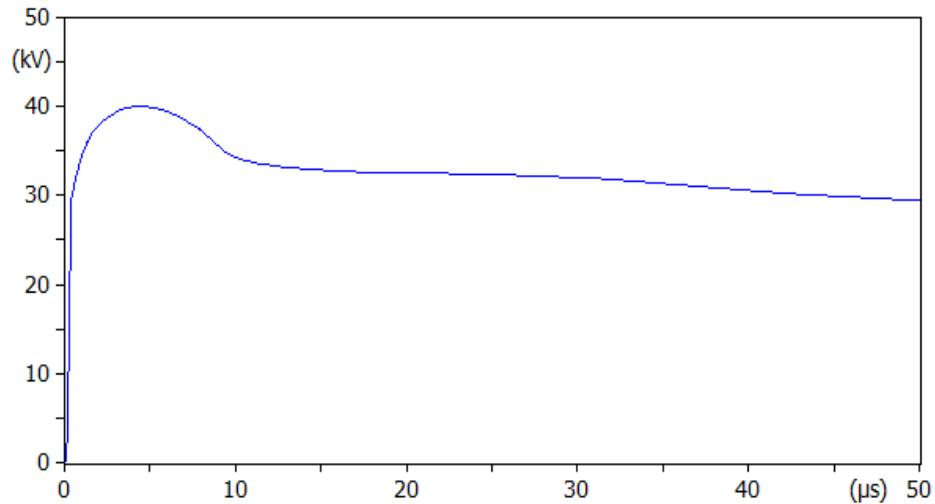


Figura 5. 1. Voltaje Tipo Rayo (CELECO).

El comportamiento de la corriente se lo puede observar en la Figura 5. 2, el valor pico de la corriente que puede soportar ante un impulso tipo rayo es de 10 kA, este valor ha sido especificado anteriormente en la selección del descargador para un sistema de distribución de 13.8 Kv.

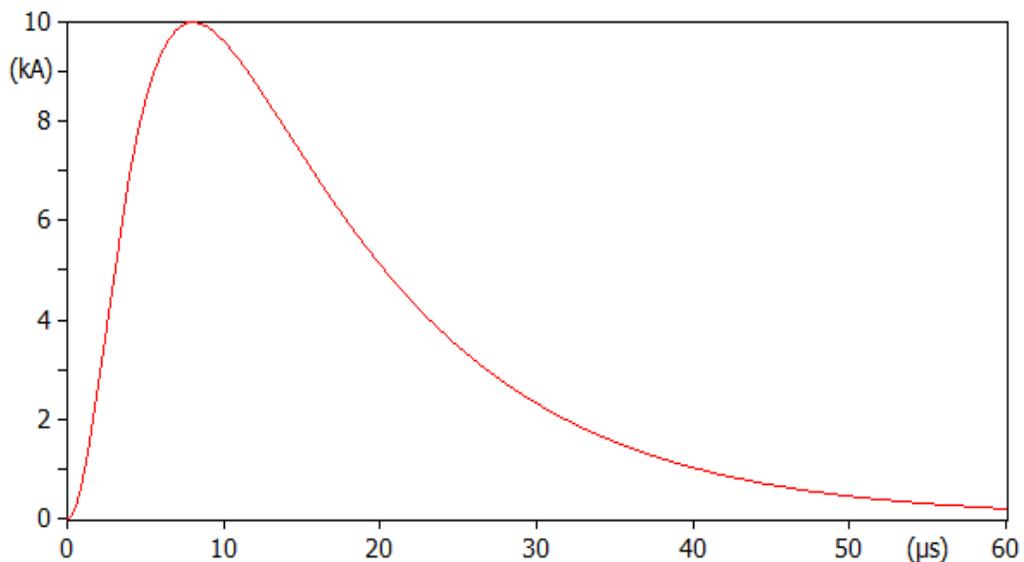


Figura 5. 2. Corriente Tipo Rayo (CELECO).

En la Figura 5. 3 se muestra el comportamiento del capacitor ante una descarga tipo rayo 10 kA, cuando la curva del capacitor permanece constantemente en cero significa que el descargador no ha soportado la descarga eléctrica por lo cual afecta al elemento que protegía, en este caso se observa como la curva del capacitor ante la descarga baja hasta llegar a cero pero inmediatamente busca restablecerse y mantener el voltaje adecuado, por lo que se deduce el correcto funcionamiento del descargador de sobretensión CELECO.

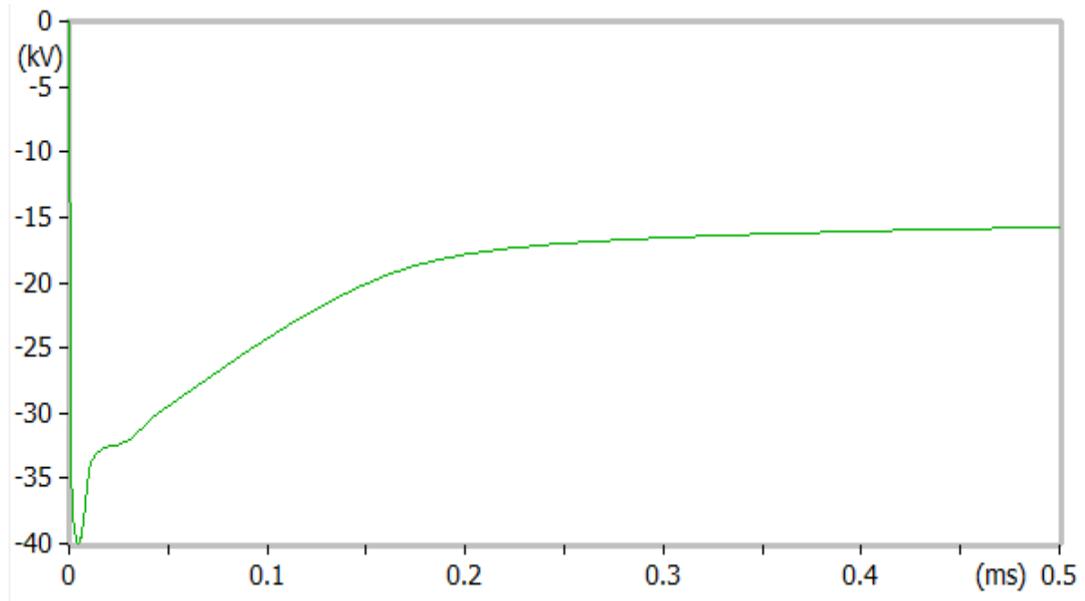


Figura 5. 3. Capacitor Tipo Rayo (CELECO).

El comportamiento del voltaje y la corriente ante un impulso tipo rayo se observa en la Figura 5. 4, donde la forma de onda de color azul representa el voltaje y de color rojo la corriente, para el correcto funcionamiento del descargador se dice que las dos formas de ondas deben ser simétricas con diferencia en sus valores picos para lograr la máxima protección de los equipos.

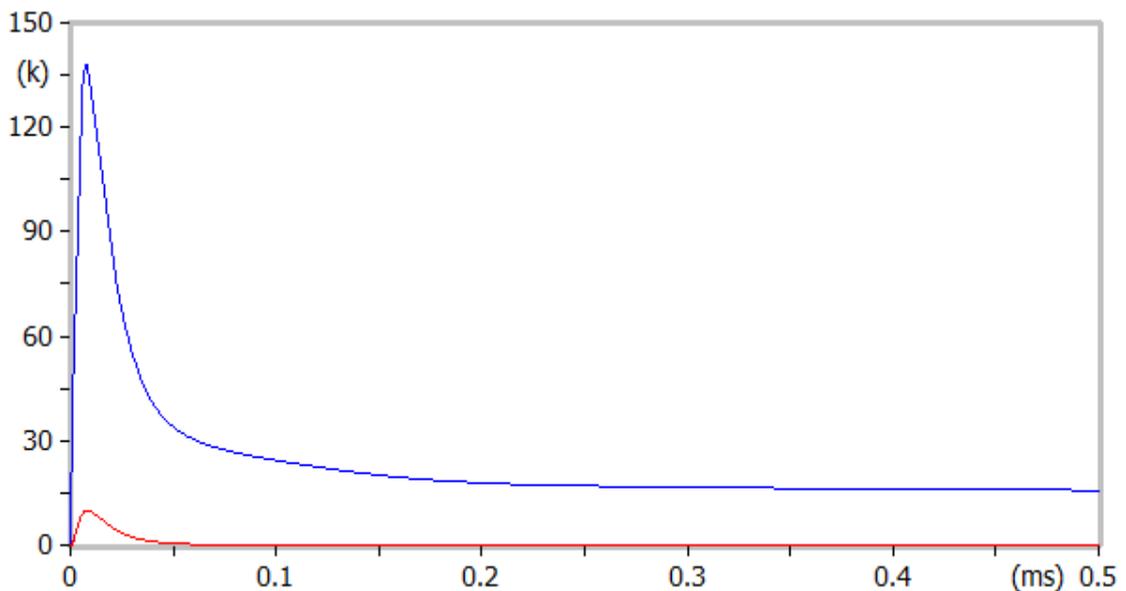


Figura 5. 4. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (CELECO).

### 5.1.5 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador CELECO en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q

La Figura 5. 4 muestra cómo se comporta el voltaje ante la incorporación de una carga de P y Q en el modelo IEEE, se observa como interfiere en la capacidad de soporte del voltaje de

impulso tipo rayo, haciendo que dicho valor presente una variación ante la descarga eléctrica generando a través de ella perturbaciones en su señal.

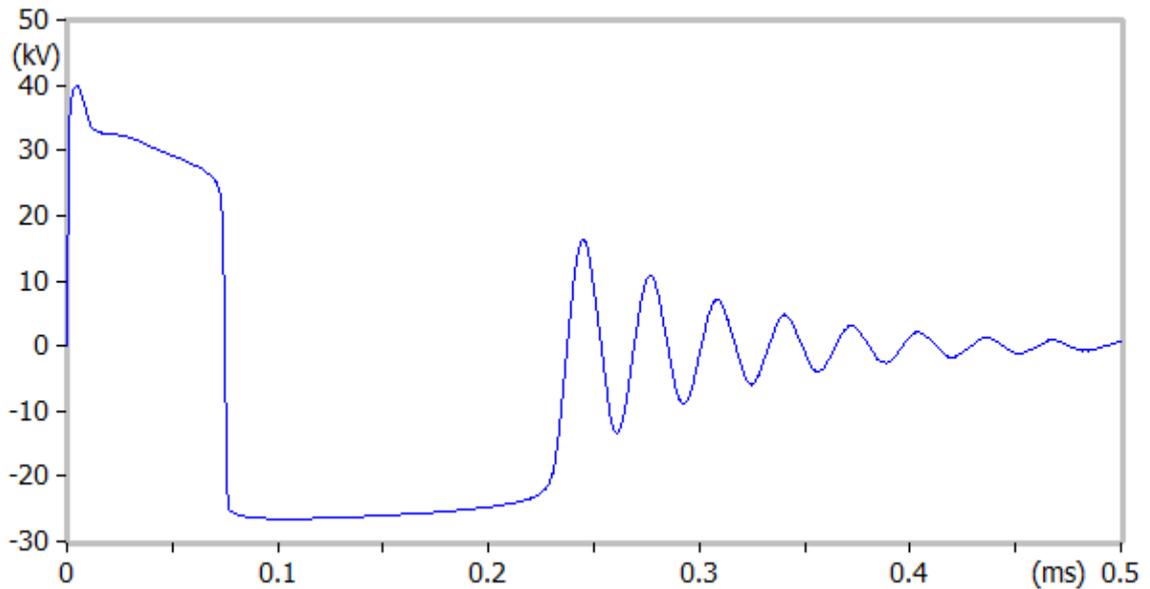


Figura 5. 5. Voltaje Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.

Mientras que en la Figura 5. 6 se observa cómo se comportan tanto el voltaje y la corriente ante la incorporación de la carga P y Q, donde claramente solo afecta al voltaje y la corriente mantiene su forma inicial al no presentar cambios en sus magnitudes.

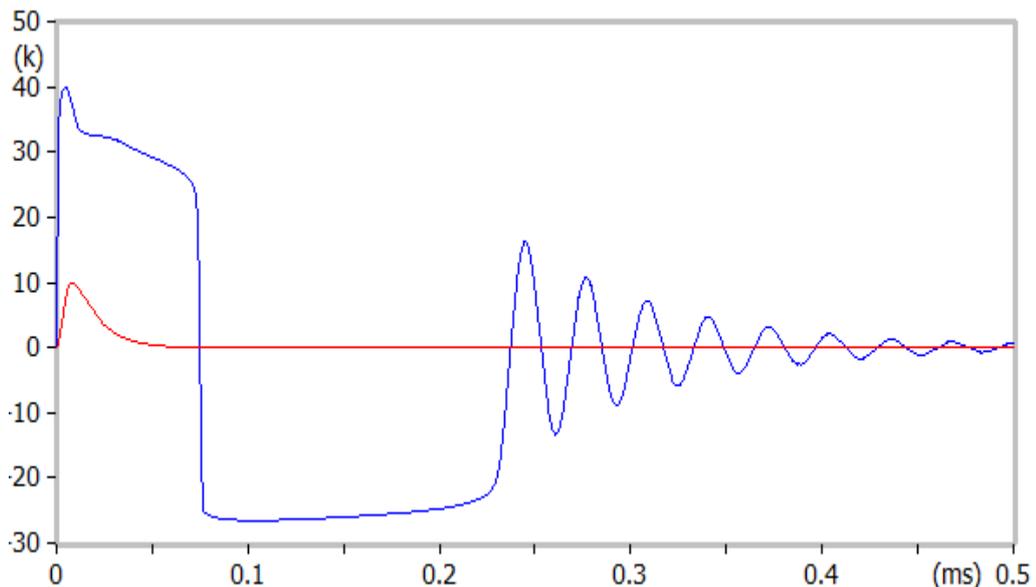


Figura 5. 6. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.

El capacitor claramente necesita de una carga entra para lograr restablecer su voltaje rápidamente, es por ello que al incorporar la carga P y Q se observa en la Figura 5. 7 como se

restablece el voltaje en menor tiempo a comparación de la Figura 5. 3 que tarda más tiempo en restablecerse al no presentar una carga.

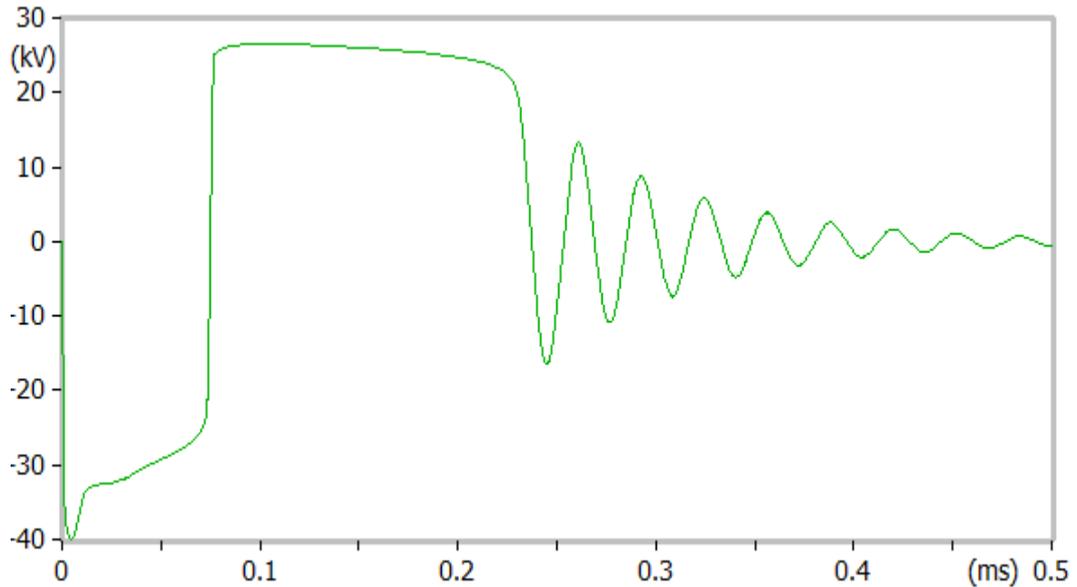


Figura 5. 7. Capacitor Tipo Rayo (CELECO) aplicando carga.

### 5.1.6 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador CELECO en ATPDraw 7.2

Para realizar la prueba del impulso tipo maniobra se calibra la fuente HEIDLER al valor nominal de corriente que se desea simular, en este caso fue de 2 kA por lo cual el valor Upl de referencia para el voltaje dado por el fabricante CELECO es de 35 kV, mientras que en la Figura 5. 8 se observa que el voltaje de impulso tipo maniobra alcanza los 35.59 kV, lo cual deduce la correcta simulación del descargador.

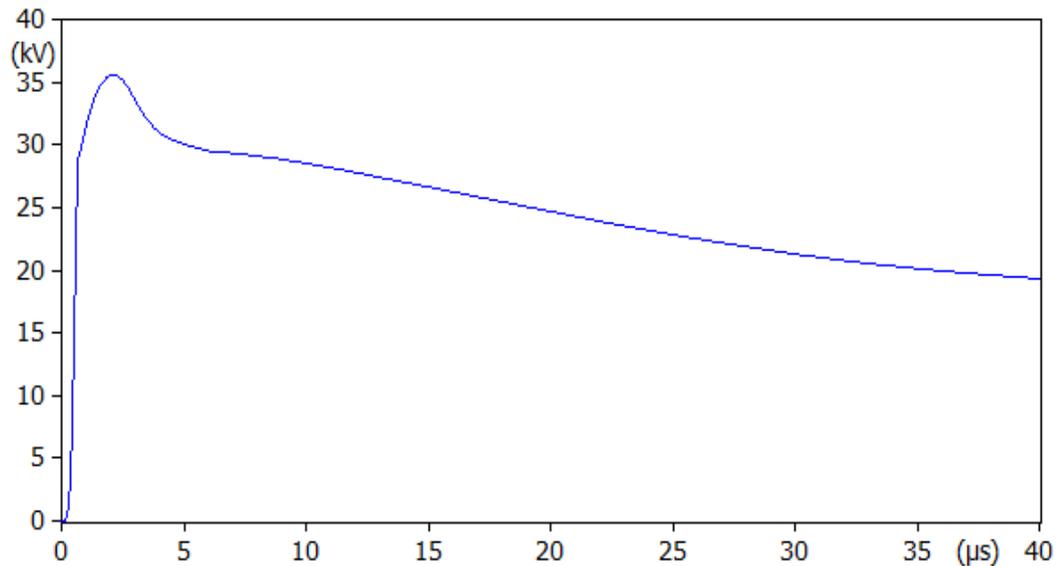


Figura 5. 8. Voltaje Tipo Maniobra (CELECO).

En la Figura 5. 9 se observa el comportamiento de la corriente al impulso tipo maniobra 2kA lo cual corrobora la correcta simulación al presentar el mismo valor de corriente pico incorporado al modelo IEEE del descargador de sobretensión.

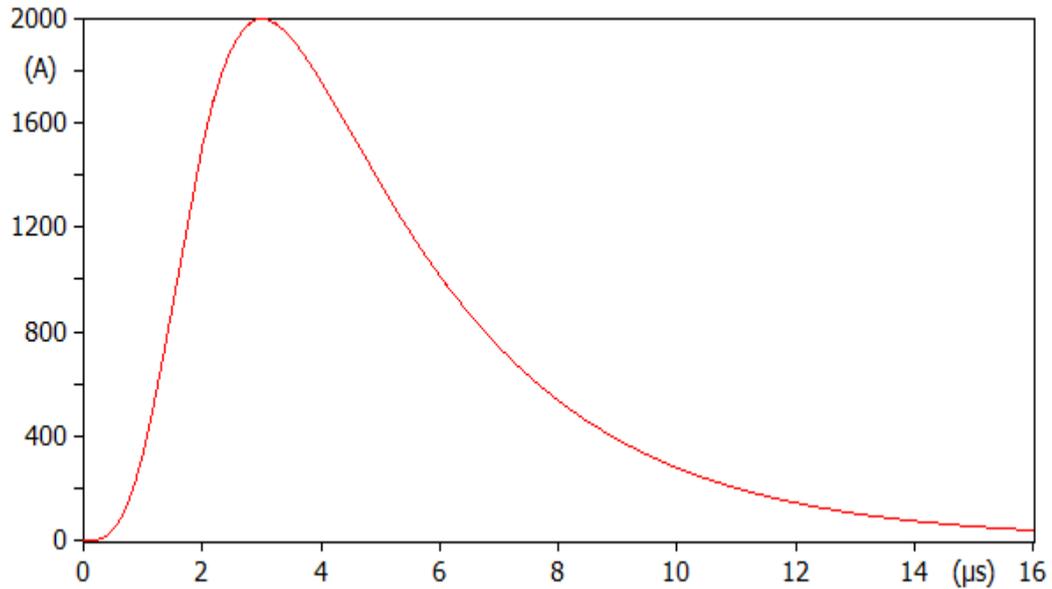


Figura 5. 9. Corriente Tipo Maniobra (CELECO).

## 5.2 RESULTADOS PARA EL MODLAMIENTO DEL DESACARGADOR BALESTRO

A continuación, se muestran los resultados del modelamiento IEEE del descargador de sobretensión BALESTRO simulado en el software ATPDraw 7.2, donde consta desde los cálculos de sus parámetros principales hasta la discusión de las figuras obtenidas.

### 5.2.1 Cálculos de los parámetros del descargador BALESTRO modelo IEEE

El cálculo de los diferentes parámetros del modelo IEEE del descargador se realiza en base a las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), donde la altura total del descargador BALESTRO es 0.306 metros, según las características mecánicas identificadas en el Anexo X.

$$R_0 = 100 \frac{0.306}{1} (\Omega)$$

$$R_0 = 30.6 (\Omega)$$

$$R_1 = 65 \frac{0.306}{1} (\Omega)$$

$$R_1 = 19.89 (\Omega)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{0.306}{1} (\mu H)$$

$$L_0 = 0.0612 (\mu H)$$

$$L_0 = \mathbf{0.0000612 (mH)}$$

$$L_1 = 15 \frac{0.306}{1} (\mu H)$$

$$L_1 = 4.59 (\mu H)$$

$$L_1 = \mathbf{0.00459 (mH)}$$

$$C = 100 \frac{1}{0.306} (\rho F)$$

$$C = 326.79 (\rho F)$$

$$C = \mathbf{0.000326 (\mu F)}$$

En la *Tabla 5. 4* se establece el resumen de los parámetros del modelo IEEE del descargador con los valores de la capacidad de cada uno de los componentes a ser simulados, los resistores en ( $\Omega$ ), los inductores en (mH) y el capacitor en ( $\mu F$ ).

Tabla 5. 4. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (BALESTRO).

<b>Parámetros</b>	<b>R0 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R1 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>L0 (mH)</b>	<b>L1 (mH)</b>	<b>C (<math>\mu F</math>)</b>
<b>Valores</b>	30.6	19.86	0.0000612	0.00459	0.000326

### 5.2.2 Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador BALESTRO

Considerando la tensión máxima residual al impulso de corriente de rayo 8/20 us 10 kA del descargador BALESTRO (  $U_{pl} = 49.5$  kV), se procede a calcular los valores de las resistencias variables tanto para A0 y A1, aplicando las ecuaciones (9) y (10) descritas en el anterior capítulo, de esta manera se logra obtener los resultados presentados en la *Tabla 5. 5*.

Tabla 5. 5. Resistencias variables para A0 y A1(BALESTRO).

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	43312.5	
100	47668.5	38065.5
1000	51975	42075
2000	53856	44253

4000	55687.5	45787.5
6000	56331	46431
8000	57865.5	47322
10000	58806	47965.5
12000	59697	48262.5
14000	60934.5	48906
16000	61875	49203
18000	63409.5	49500
20000	64993.5	49797

### 5.2.3 Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador BALESTRO

El ajuste de las resistencias variables A0 Y A1 es un procedimiento necesario para lograr caracterizar los valores propios de fabricación del descargador BALESTRO, el cual consiste en modificar estos valores hasta llegar al Upl deseado, en la Tabla 5. 6 se define los valores ajustados de las resistencias variables las mismas serán incluidas en la componente MOVN del software ATPDraw 7.2 para su correcta simulación.

Tabla 5. 6. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(BALESTRO)

Corriente (KA)	A0 (kV)	A1 (kV)
10	40312.5	
100	44668.5	34065.5
1000	48975	39075
2000	50856	41253
4000	52687.5	42787.5
6000	53331	43431
8000	54865.5	44322
10000	55806	44965.5
12000	56697	45262.5
14000	57934.5	45906
16000	58875	46203
18000	60409.5	46500
20000	61993.5	46797

### 5.2.4 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2

En la Figura 5. 10 se observa el comportamiento del voltaje del modelo IEEE del descargador BALESTRO al momento de actuar ante un impulso tipo rayo de 10 kA, el valor Upl proporcionado por los datos del fabricante es de 49.5 kV acorde con el Anexo IX, mientras que

el valor pico  $U_{pl}$  simulado en el software ATPDraw 7.2 es de 50.39 kV, donde se puede concluir que la simulación ha sido correcta debido a la semejanza de sus valores.

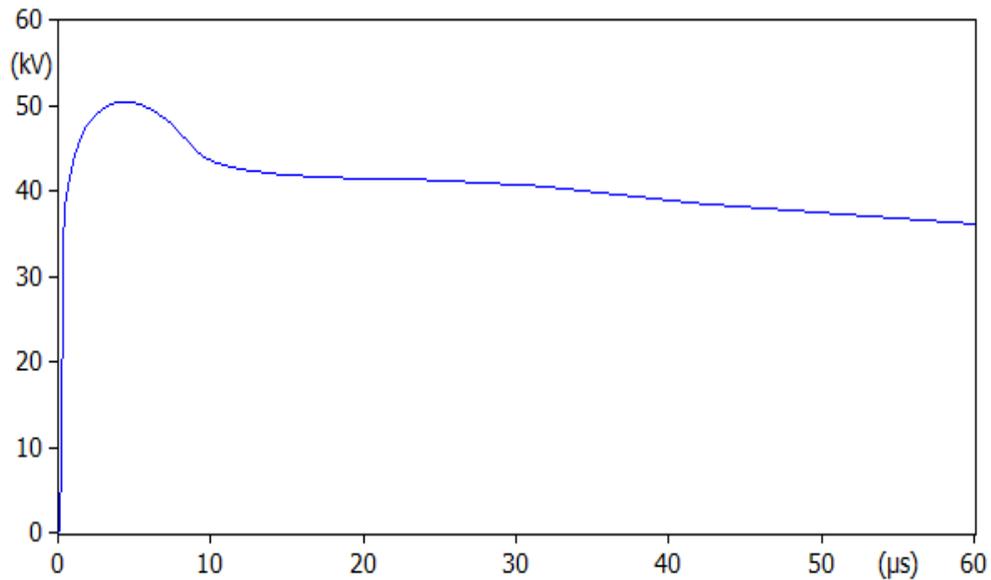


Figura 5. 10. Voltaje Tipo Rayo (BALESTRO).

El comportamiento de la corriente se lo puede observar en la Figura 5. 11, el valor pico de la corriente que puede soportar ante un impulso tipo rayo es de 10 kA, este valor ha sido especificado anteriormente en la selección del descargador para un sistema de distribución de 13.8 Kv.

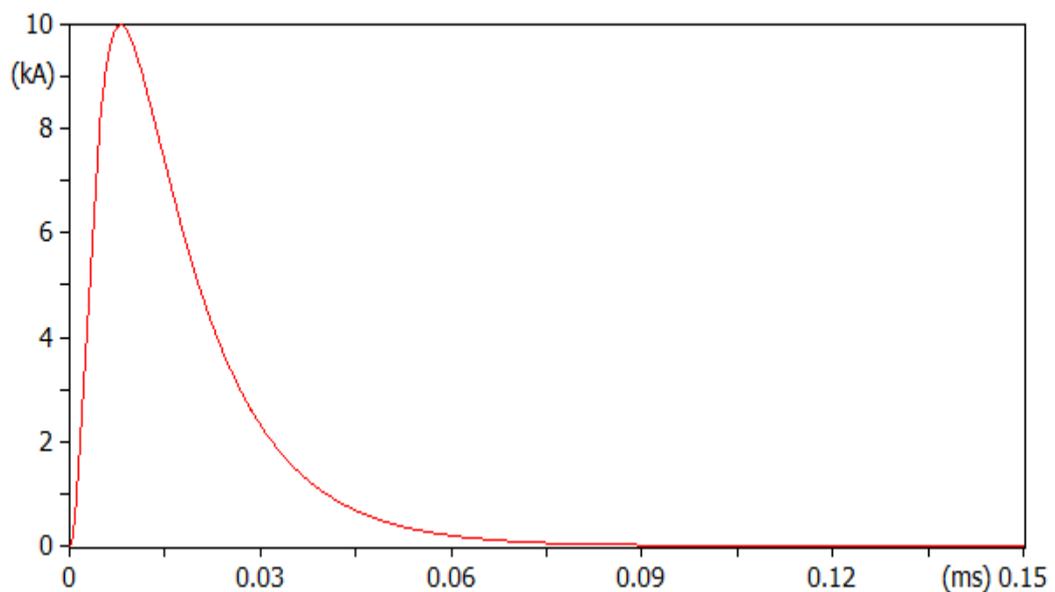


Figura 5. 11. Corriente Tipo Rayo (BALESTRO).

En la Figura 5. 12 se muestra el comportamiento del capacitor ante una descarga tipo rayo 10 kA, cuando la curva del capacitor permanece constantemente en cero significa que el

descargador no ha soportado la descarga eléctrica por lo cual afecta al elemento que protegía, en este caso se observa como la curva del capacitor ante la descarga baja hasta llegar a cero pero inmediatamente busca restablecerse y mantener el voltaje adecuado, por lo que se deduce el correcto funcionamiento del descargador de sobretensión BALESTRO.

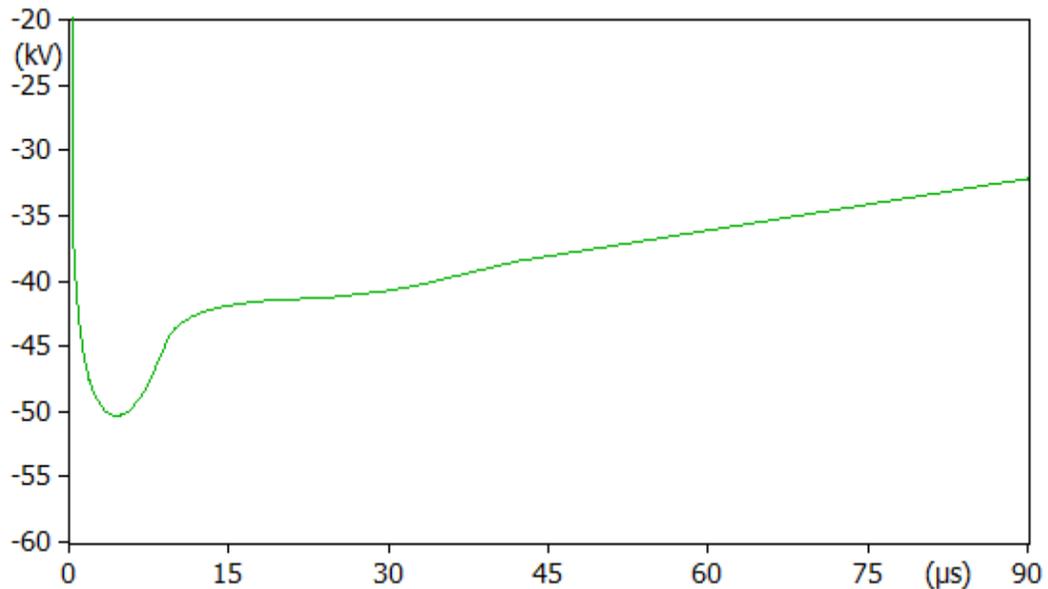


Figura 5. 12. Capacitor Tipo Rayo (BALESTRO).

El comportamiento del voltaje y la corriente ante un impulso tipo rayo se observa en la Figura 5. 13, donde la forma de onda de color azul representa el voltaje y de color rojo la corriente, para el correcto funcionamiento del descargador se dice que las dos formas de ondas deben ser simétricas con diferencia en sus valores picos para lograr la máxima protección de los equipos.

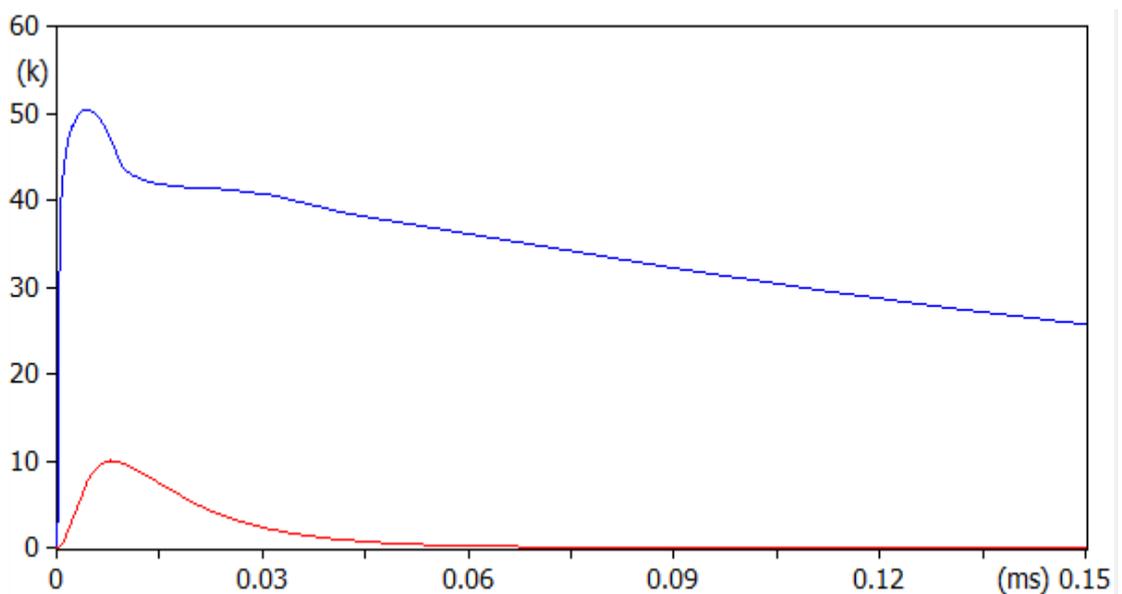


Figura 5. 13. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (BALESTRO).

### 5.2.5 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q

La Figura 5. 14 muestra cómo se comporta el voltaje ante la incorporación de una carga de P y Q en el modelo IEEE, se observa como interfiere en la capacidad de soporte del voltaje de impulso tipo rayo, haciendo que dicho valor presente una variación ante la descarga eléctrica generando a través de ella perturbaciones en su señal.

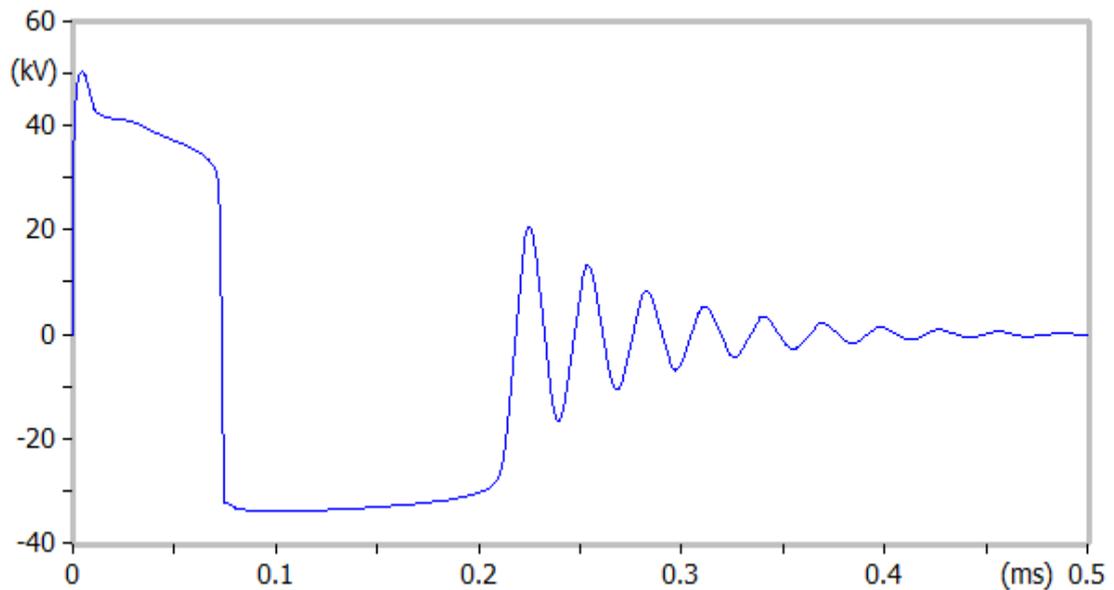


Figura 5. 14. Voltaje Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga.

Mientras que en la Figura 5. 15 se observa cómo se comportan tanto el voltaje y la corriente ante la incorporación de la carga P y Q, donde claramente solo afecta al voltaje y la corriente mantiene su forma inicial al no presentar cambios en sus magnitudes.

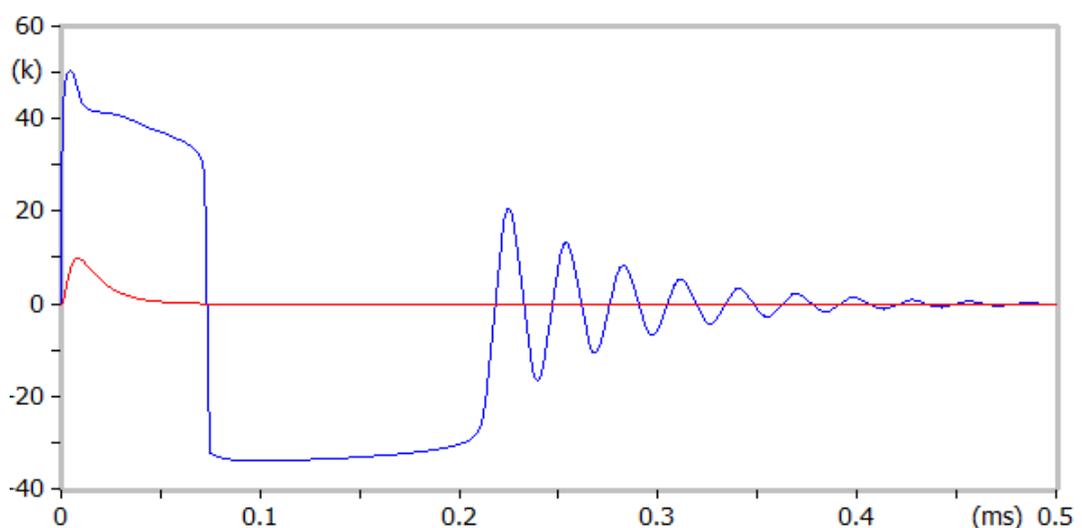


Figura 5. 15. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga

El capacitor claramente necesita de una carga entra para lograr restablecer su voltaje rápidamente, es por ello que al incorporar la carga P y Q se observa en la Figura 5. 16 como se restablece el voltaje en menor tiempo a comparación de la Figura 5. 12 que tarda más tiempo en restablecerse al no presentar una carga.

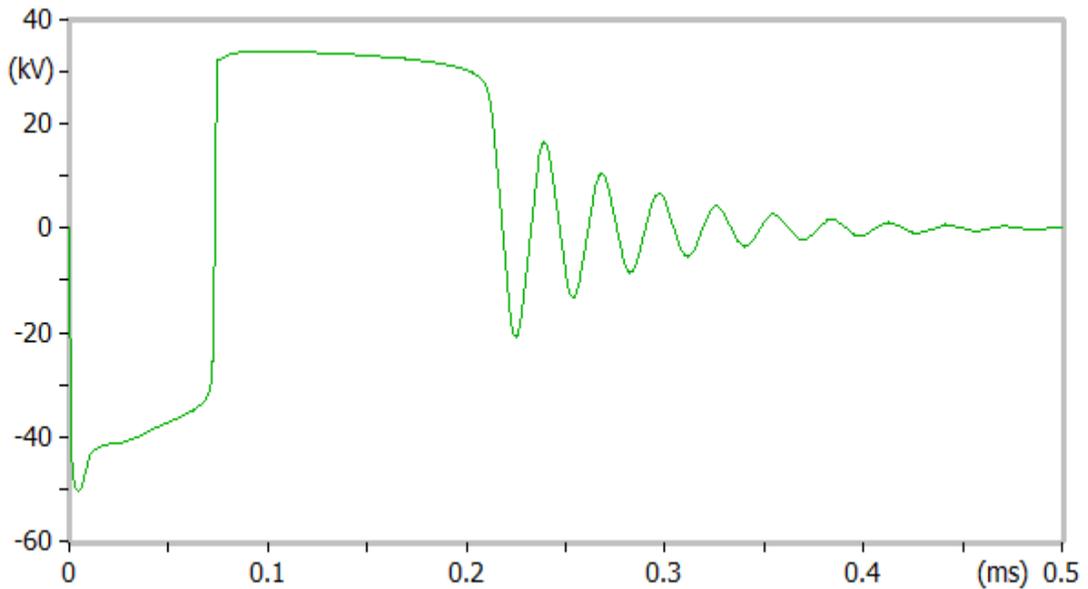


Figura 5. 16. Capacitor Tipo Rayo (BALESTRO) aplicando carga

### 5.2.6 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador BALESTRO en ATPDraw 7.2

Para realizar la prueba del impulso tipo maniobra se calibra la fuente HEIDLER al valor nominal de corriente que se desea simular, en este caso fue de 2.5 kA por lo cual el valor  $U_{pl}$  de referencia para el voltaje dado por el fabricante BALESTRO es de 46.7 kV, mientras que en la Figura 5. 17 se observa que el voltaje de impulso tipo maniobra alcanza los 46.41 kV, lo cual deduce la correcta simulación del descargador.

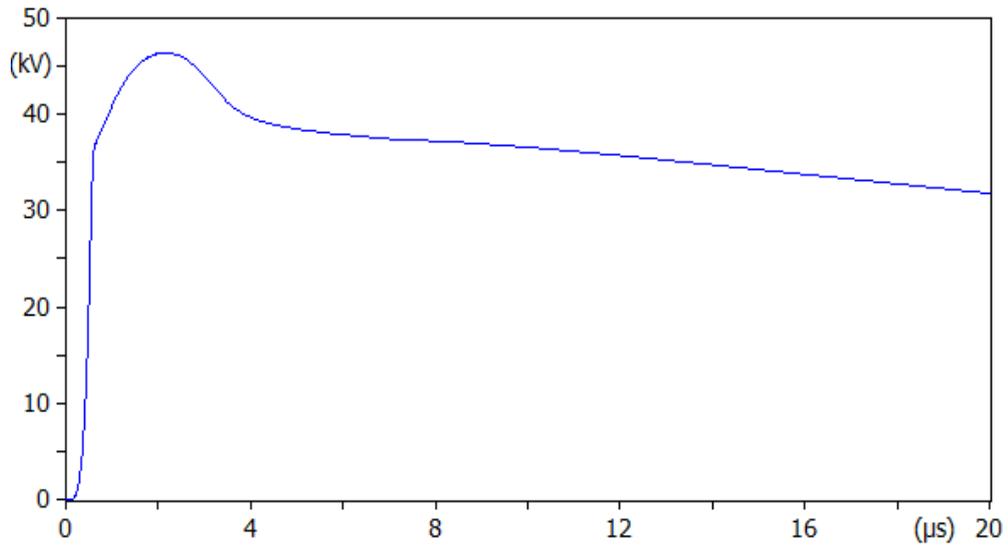


Figura 5. 17. Voltaje Tipo Maniobra (BALESTRO).

En la Figura 5. 18 se observa el comportamiento de la corriente al impulso tipo maniobra 2.5 kA lo cual corrobora la correcta simulación al presentar el mismo valor de corriente pico incorporado al modelo IEEE del descargador de sobretensión.

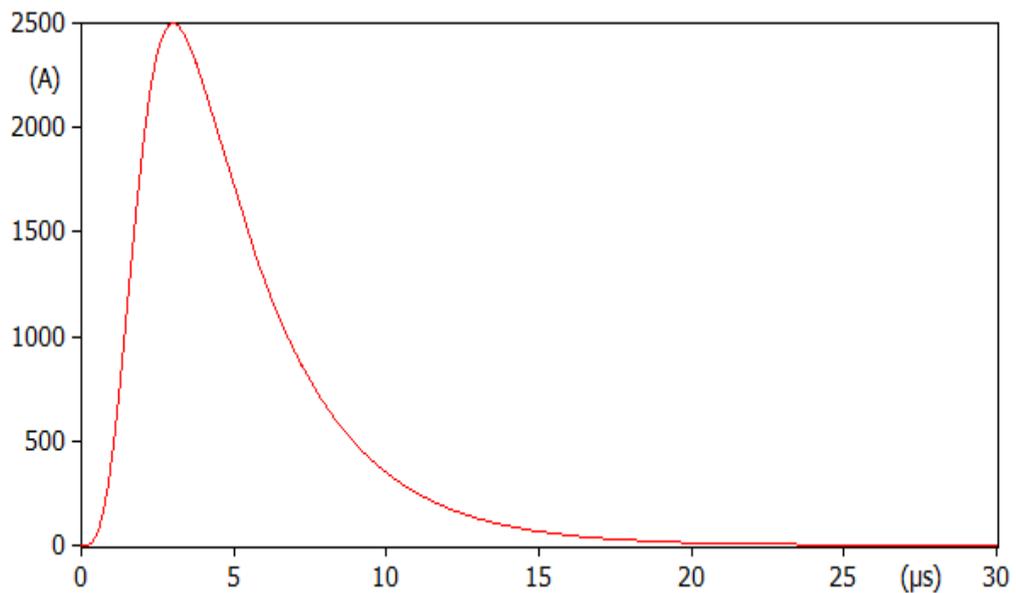


Figura 5. 18. Corriente Tipo Maniobra (BALESTRO).

### 5.3 RESULTADOS PARA EL MODELAMIENTO DEL DESCARGADOR OHIO BRASS

A continuación, se muestran los resultados del modelamiento IEEE del descargador de sobretensión OHIO BRASS simulado en el software ATPDraw 7.2 desde los cálculos de sus parámetros principales hasta la discusión de las figuras obtenidas.

### 5.3.1 Cálculos de los parámetros del descargador OHIO BRASS modelo IEEE

El cálculo de los diferentes parámetros del modelo IEEE del descargador se realiza en base a las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), donde la altura total del descargador OHIO BRASS es 0.310 metros, según las características mecánicas identificadas en el Anexo XIV.

$$R_0 = 100 \frac{0.310}{1} (\Omega)$$

$$\mathbf{R_0 = 31(\Omega)}$$

$$R_1 = 65 \frac{0.310}{1} (\Omega)$$

$$\mathbf{R_1 = 20.15(\Omega)}$$

$$L_0 = 0.2 \frac{0.310}{1} (\mu H)$$

$$L_0 = 0.062(\mu H)$$

$$\mathbf{L_0 = 0.0000620(mH)}$$

$$L_1 = 15 \frac{0.310}{1} (\mu H)$$

$$L_1 = 4.65(\mu H)$$

$$\mathbf{L_1 = 0.00465(mH)}$$

$$C = 100 \frac{1}{0.310} (\rho F)$$

$$C = 322.58(\rho F)$$

$$\mathbf{C = 0.000322(\mu F)}$$

En la Tabla 5. 7 se establece el resumen de los parámetros del modelo IEEE del descargador con los valores de la capacidad de cada uno de los componentes a ser simulados, los resistores en ( $\Omega$ ), los inductores en (mH) y el capacitor en ( $\mu F$ ).

Tabla 5. 7. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (OHIO BRASS).

Parámetros	<b>R0</b> ( $\Omega$ )	<b>R1</b> ( $\Omega$ )	<b>L0</b> (mH)	<b>L1</b> (mH)	<b>C</b> ( $\mu F$ )
------------	------------------------	------------------------	----------------	----------------	----------------------

<b>Valores</b>	31	20.15	0.0000620	0.00465	0.000322
----------------	----	-------	-----------	---------	----------

### 5.3.2 Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador OHIO

#### BRASS

Tomando en consideración la tensión máxima residual al impulso de corriente de rayo 8/20 us 10 kA del descargador OHIO BRASS ( $U_{pl} = 40.6$  kV), se procede a calcular los valores de las resistencias variables tanto para A0 y A1, aplicando las ecuaciones (9) y (10) descritas en el anterior capítulo, de esta manera se logra obtener los resultados presentados en la Tabla 5. 8.

Tabla 5. 8. Resistencias variables para A0 y A1(OHIO BRASS).

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	35525	
100	39097.8	31221.4
1000	42630	34510
2000	44172.8	36296.4
4000	45675	37555
6000	46202.8	38082.8
8000	47461.4	38813.6
10000	48232.8	39341.4
12000	48963.6	39585
14000	49978.6	40112.8
16000	50750	40356.4
18000	52008.6	40600
20000	53307.8	40843.6

### 5.3.3 Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador OHIO BRASS

El ajuste de las resistencias variables A0 Y A1 es un procedimiento necesario para lograr caracterizar los valores propios de fabricación del descargador OHIO BRASS, el cual consiste en modificar estos valores hasta llegar al  $U_{pl}$  deseado, la Tabla 5. 9 expresa los valores ajustados de las resistencias variables las mismas serán incluidas en la componente MOVN del software ATPDraw 7.2 para su correcta simulación.

Tabla 5. 9. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(OHIO BRASS).

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	32525	
100	36097.8	28221.4
1000	39630	31510

2000	41172.8	33296.4
4000	42675	34555
6000	43202.8	35082.8
8000	44461.4	35813.6
10000	45232.8	36341.4
12000	45963.6	37585
14000	46978.6	37112.8
16000	47750	37356.4
18000	48008.6	37600
20000	50307.8	37843.6

### 5.3.4 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2

En la Figura 5. 19 se observa el comportamiento del voltaje del modelo IEEE del descargador CELECO al momento de actuar ante un impulso tipo rayo de 10 kA, el valor Upl proporcionado por los datos del fabricante es de 40.6 kV según el Anexo XI, mientras que el valor pico Upl simulado en el software ATPDraw 7.2 es de 41.53 kV, donde se puede concluir que la simulación ha sido correcta por la semejanza de sus valores.

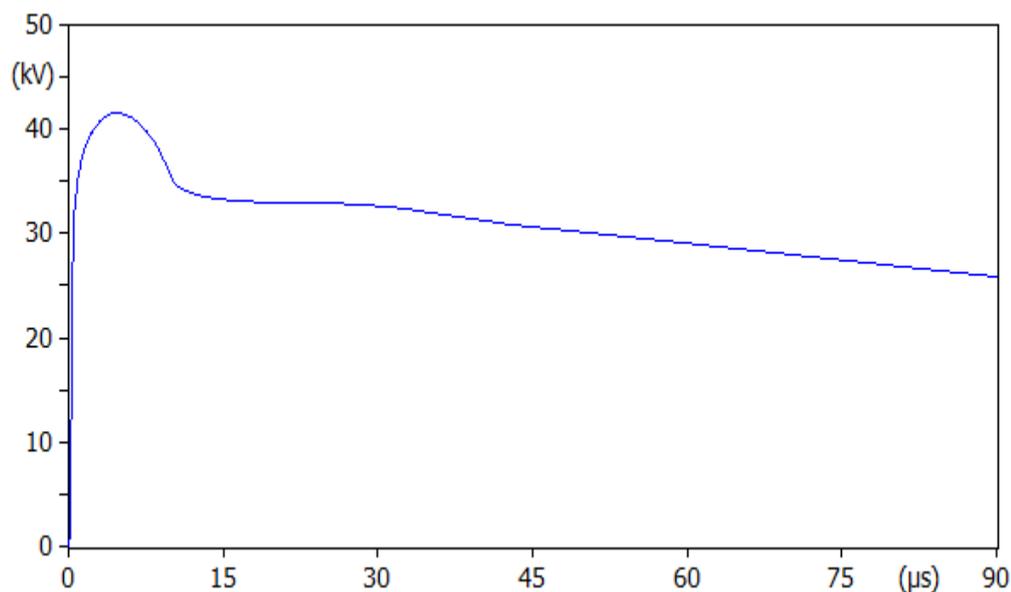


Figura 5. 19. Voltaje Tipo Rayo (OHIO BRASS).

El comportamiento de la corriente se lo puede observar en la Figura 5. 20, el valor pico de la corriente que puede soportar ante un impulso tipo rayo es de 10 kA, este valor ha sido especificado anteriormente en la selección del descargador para un sistema de distribución de 13.8 Kv.

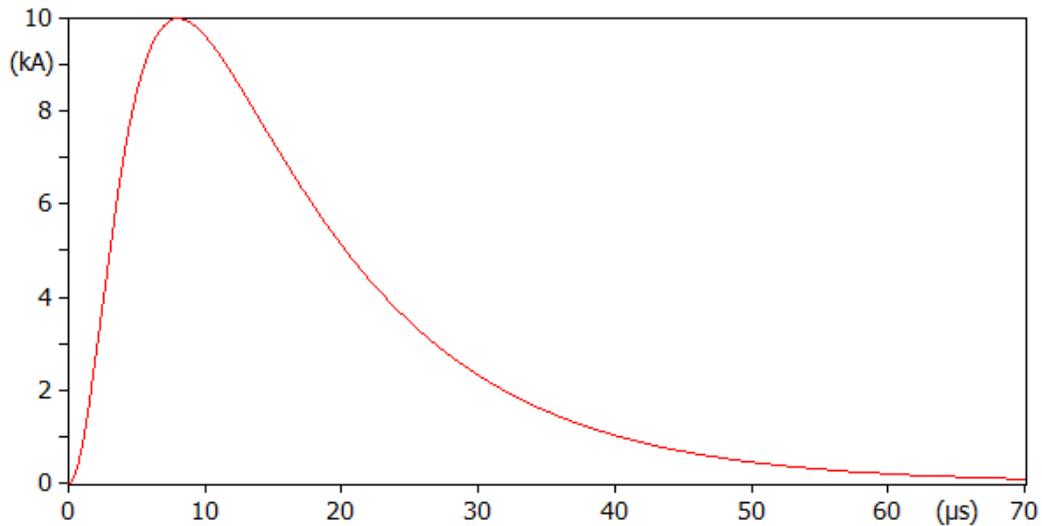


Figura 5. 20. Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS).

En la Figura 5. 21 se muestra el comportamiento del capacitor ante una descarga tipo rayo 10 kA, cuando la curva del capacitor permanece constantemente en cero significa que el descargador no ha soportado la descarga eléctrica por lo cual afecta al elemento que protegía, en este caso se observa como la curva del capacitor ante la descarga baja hasta llegar a cero pero inmediatamente busca restablecerse y mantener el voltaje adecuado, por lo que se deduce el correcto funcionamiento del descargador de sobretensión OHIO BRASS.

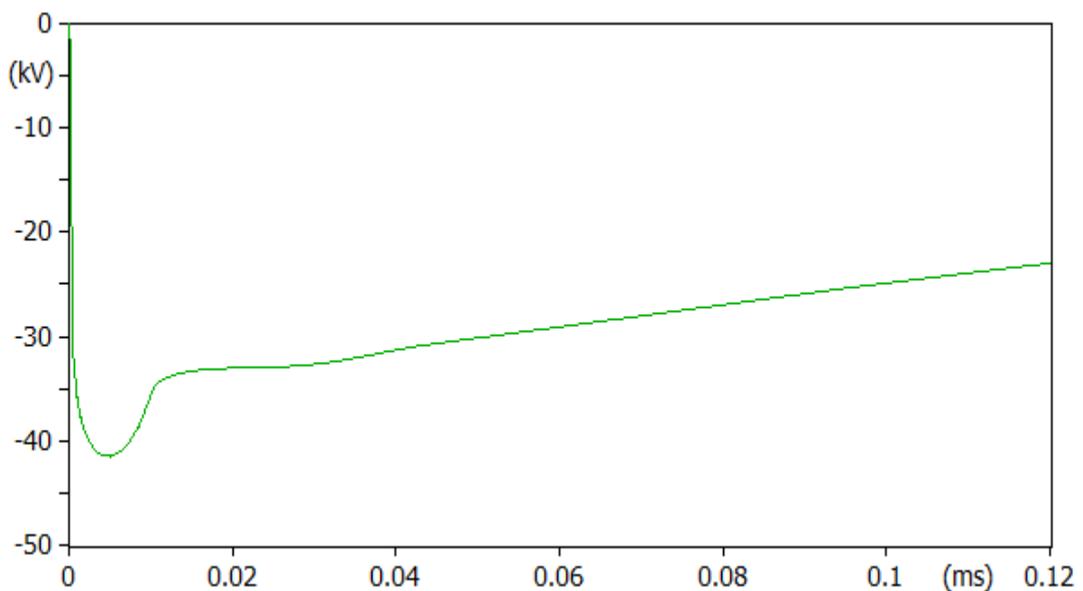


Figura 5. 21. Capacitor Tipo Rayo (OHIO BRASS).

El comportamiento del voltaje y la corriente ante un impulso tipo rayo se observa en la Figura 5. 22, donde la forma de onda de color azul representa el voltaje y de color rojo la corriente,

para el correcto funcionamiento del descargador se dice que las dos formas de ondas deben ser simétricas con diferencia en sus valores picos para lograr la máxima protección de los equipos.

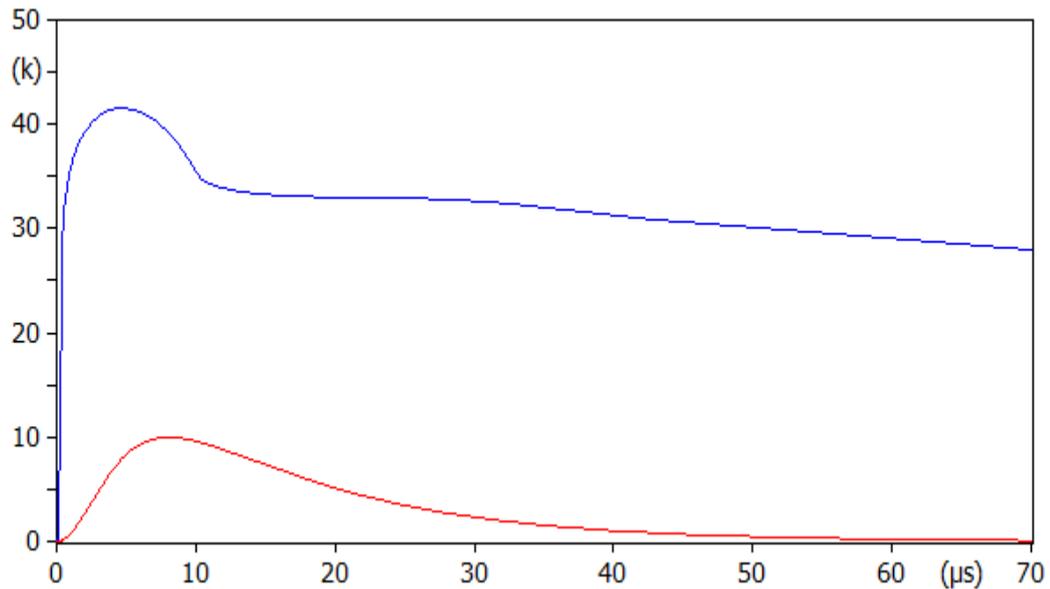


Figura 5. 22. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS).

### 5.3.5 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q

La Figura 5. 23 muestra cómo se comporta el voltaje ante la incorporación de una carga de P y Q en el modelo IEEE, se observa como interfiere en la capacidad de soporte del voltaje de impulso tipo rayo, haciendo que dicho valor presente una variación ante la descarga eléctrica generando a través de ella perturbaciones en su señal.

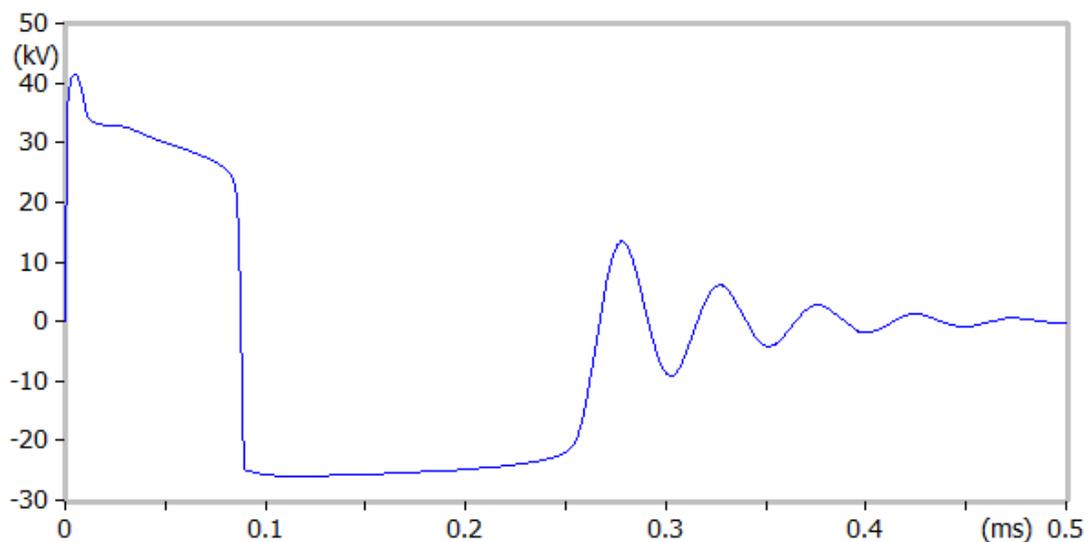


Figura 5. 23. Voltaje Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga.

El capacitor claramente necesita de una carga entra para lograr restablecer su voltaje rápidamente, es por ello que al incorporar la carga P y Q se observa en la Figura 5. 24 como se restablece el voltaje en menor tiempo a comparación de la Figura 5. 21 que tarda más tiempo en restablecerse al no presentar una carga.

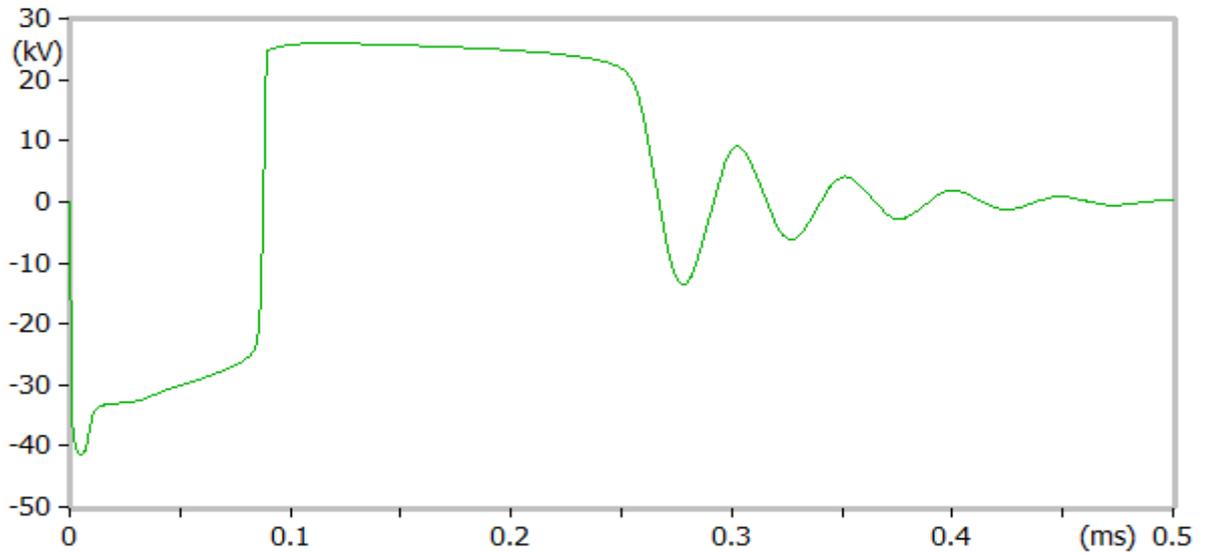


Figura 5. 24. Capacitor Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga.

Mientras que en la Figura 5. 25 se observa cómo se comportan tanto el voltaje y la corriente ante la incorporación de la carga P y Q, donde claramente solo afecta al voltaje y la corriente mantiene su forma inicial al no presentar cambios en sus magnitudes.

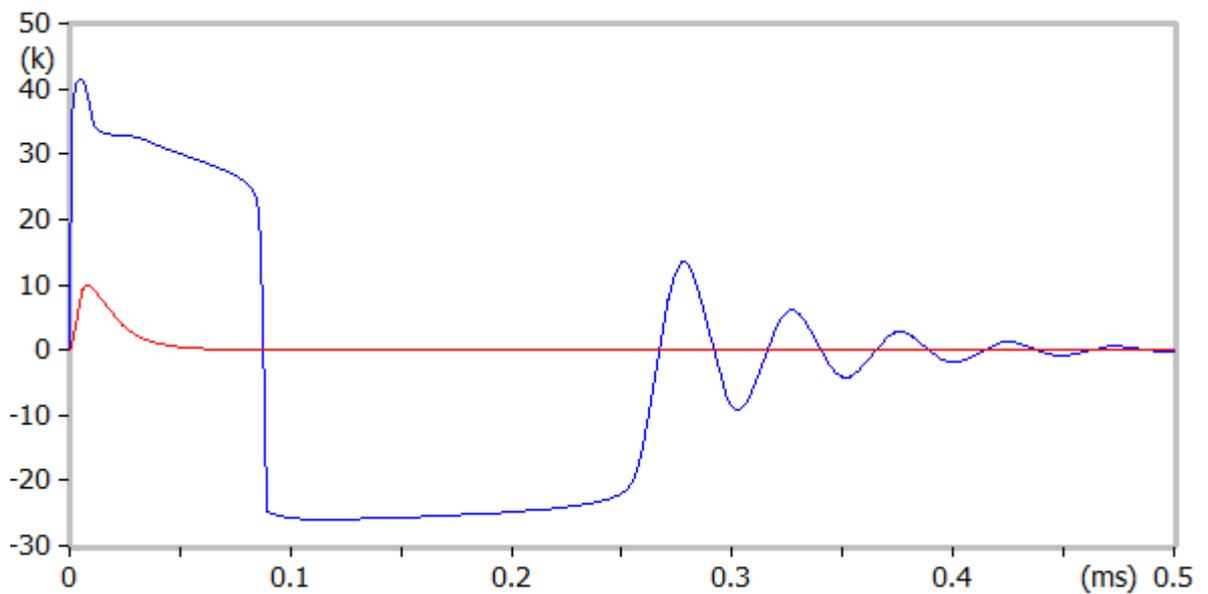


Figura 5. 25. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (OHIO BRASS) aplicando carga.

### 5.3.6 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador OHIO BRASS en ATPDraw 7.2

Para realizar la prueba del impulso tipo maniobra se calibra la fuente HEIDLER al valor nominal de corriente que se desea simular, en este caso fue de 3 kA por lo cual el valor Upl de referencia para el voltaje dado por el fabricante OHIO BRASS es de 36 kV, mientras que en la Figura 5. 26 se observa que el voltaje de impulso tipo maniobra alcanza los 38.88 kV, lo cual deduce la correcta simulación del descargador.

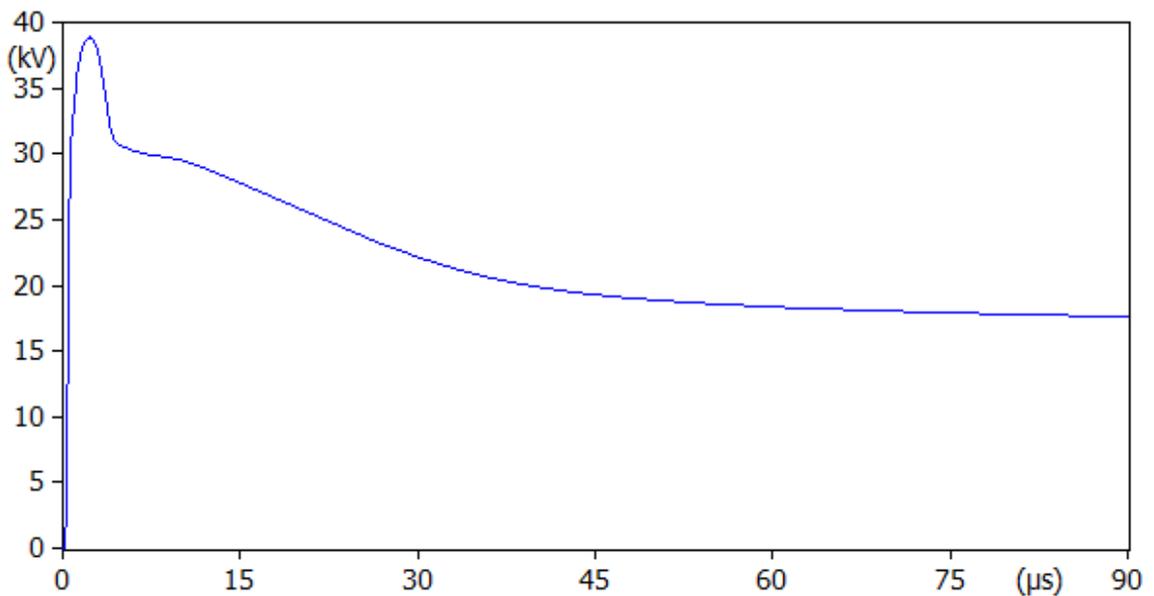


Figura 5. 26. Voltaje Tipo Maniobra (OHIO BRASS).

En la Figura 5. 27 se observa el comportamiento de la corriente al impulso tipo maniobra 3 kA lo cual corrobora la correcta simulación al presentar el mismo valor de corriente pico incorporado al modelo IEEE del descargador de sobretensión.

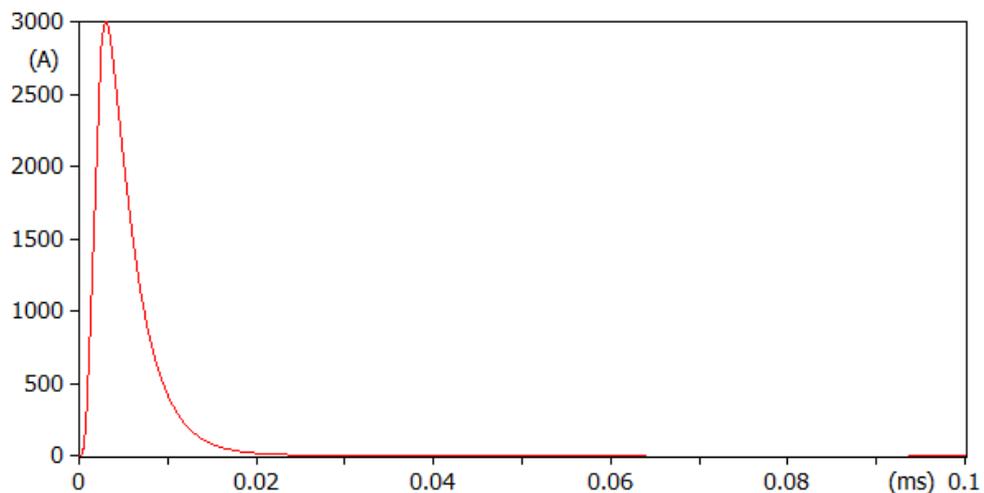


Figura 5. 27. Corriente Tipo Maniobra (OHIO BRASS).

## 5.4 RESULTADOS PARA EL MODELAMIENTO DEL DESCARGADOR MCKLEAR

A continuación, se muestran los resultados del modelamiento IEEE del descargador de sobretensión MCKLEAR simulado en el software ATPDraw 7.2 desde los cálculos de sus parámetros principales hasta la discusión de las figuras obtenidas.

### 5.4.1 Cálculos de los parámetros del descargador MCKLEAR modelo IEEE

El cálculo de los diferentes parámetros del modelo IEEE del descargador se realiza en base a las ecuaciones (4), (5), (6), (7) y (8), donde la altura total del descargador MCKLEAR es 0.344 metros, según las características mecánicas identificadas en el Anexo XVI.

$$R_0 = 100 \frac{0.344}{1} (\Omega)$$

$$R_0 = 34.4(\Omega)$$

$$R_1 = 65 \frac{0.344}{1} (\Omega)$$

$$R_1 = 22.36(\Omega)$$

$$L_0 = 0.2 \frac{0.344}{1} (\mu H)$$

$$L_0 = 0.0688(\mu H)$$

$$L_0 = 0.0000688(mH)$$

$$L_1 = 15 \frac{0.344}{1} (\mu H)$$

$$L_1 = 5.16(\mu H)$$

$$L_1 = 0.00516(mH)$$

$$C = 100 \frac{1}{0.344} (\rho F)$$

$$C = 290.79(\rho F)$$

$$C = 0.000290(\mu F)$$

En la Tabla 5. 10 se establece el resumen de los parámetros del modelo IEEE del descargador con los valores de la capacidad de cada uno de los componentes a ser simulados, los resistores en ( $\Omega$ ), los inductores en (mH) y el capacitor en ( $\mu F$ ).

Tabla 5. 10. Resultados de los parámetros del modelo IEEE (MCKLEAR).

<b>Parámetros</b>	<b>R0 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R1 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>L0 (mH)</b>	<b>L1 (mH)</b>	<b>C (<math>\mu F</math>)</b>
<b>Valores</b>	34.4	22.36	0.0000688	0.00516	0.000290

#### 5.4.2 Cálculos de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador MCKLEAR

Tomando en consideración la tensión máxima residual al impulso de corriente de rayo 8/20 us 10 kA del descargador MCKLEAR ( $U_{pl} = 40.5$  kV), se procede a calcular los valores de las resistencias variables tanto para A0 y A1, aplicando las ecuaciones (9) y (10) descritas en el anterior capítulo, de esta manera se logra obtener los resultados presentados en la Tabla 5. 11.

Tabla 5. 11. Resistencias variables para A0 y A1(MCKLEAR).

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	3368.7	
100	37056.3	29596.9
1000	40425	32725
2000	41868.8	34409.5
4000	43312.3	35612.5
6000	43793.8	36093.6
8000	44996.9	36815.6
10000	45718.5	37296.5
12000	46440.6	37517.5
14000	47403.1	38180.5
16000	48125	38259.4
18000	49328.1	38500
20000	50531.5	38740.6

#### 5.4.3 Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1 del descargador MCKLEAR

El ajuste de las resistencias variables A0 Y A1 es un procedimiento necesario para lograr caracterizar los valores propios de fabricación del descargador MCKLEAR, el cual consiste en modificar estos valores hasta llegar al  $U_{pl}$  deseado, la Tabla 5. 12 expresa los valores ajustados de las resistencias variables las mismas serán incluidas en la componente MOVN del software ATPDraw 7.2 para su correcta simulación.

Tabla 5. 12. Ajuste de las resistencias variables para A0 y A1(MCKLEAR).

<b>Corriente (KA)</b>	<b>A0 (kV)</b>	<b>A1 (kV)</b>
10	3568.7	
100	39056.3	31596.9

1000	42425	30725
2000	43868.8	32409.5
4000	45312.3	33612.5
6000	45793.8	38093.6
8000	46996.9	38815.6
10000	47718.5	39296.5
12000	48440.6	39517.5
14000	49403.1	40180.5
16000	50125	40259.4
18000	51328.1	40500
20000	52531.5	40740.6

#### 5.4.4 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2

En la Figura 5. 28 se observa el comportamiento del voltaje del modelo IEEE del descargador MCKLEAR al momento de actuar ante un impulso tipo rayo de 10 kA, el valor  $U_{pl}$  proporcionado por los datos del fabricante es de 40.5 kV según el Anexo XV, mientras que el valor pico  $U_{pl}$  simulado en el software ATPDraw 7.2 es de 42.26 kV, donde se puede concluir que la simulación ha sido correcta por la semejanza de sus valores.

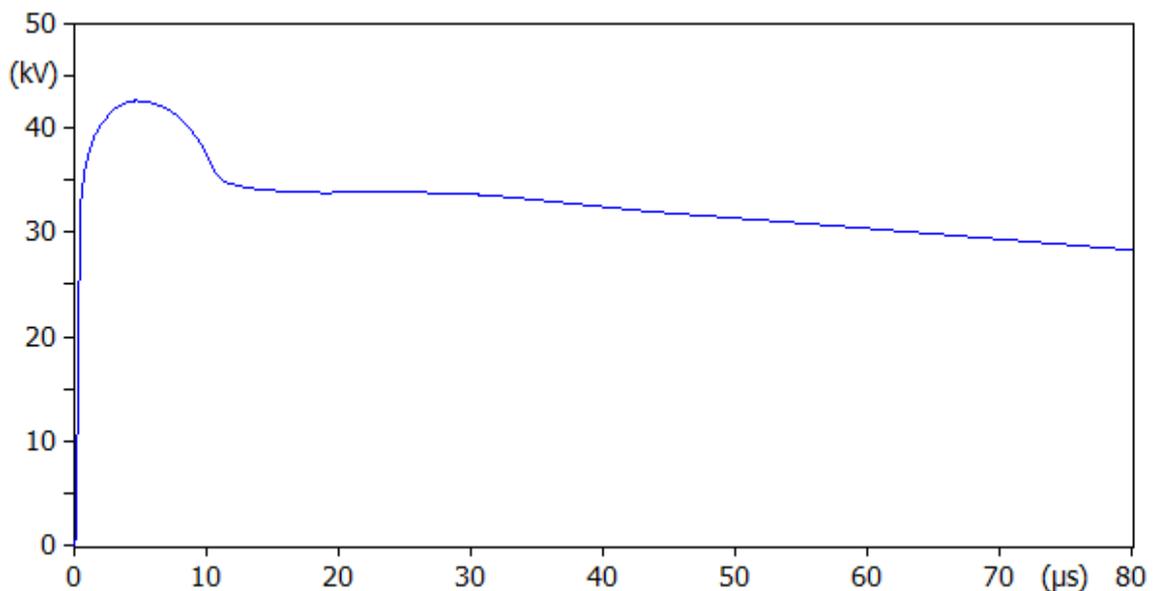


Figura 5. 28. Voltaje Tipo Rayo (MCKLEAR).

El comportamiento de la corriente se lo puede observar en la Figura 5. 29, el valor pico de la corriente que puede soportar ante un impulso tipo rayo es de 10 kA, este valor ha sido especificado anteriormente en la selección del descargador para un sistema de distribución de 13.8 Kv.

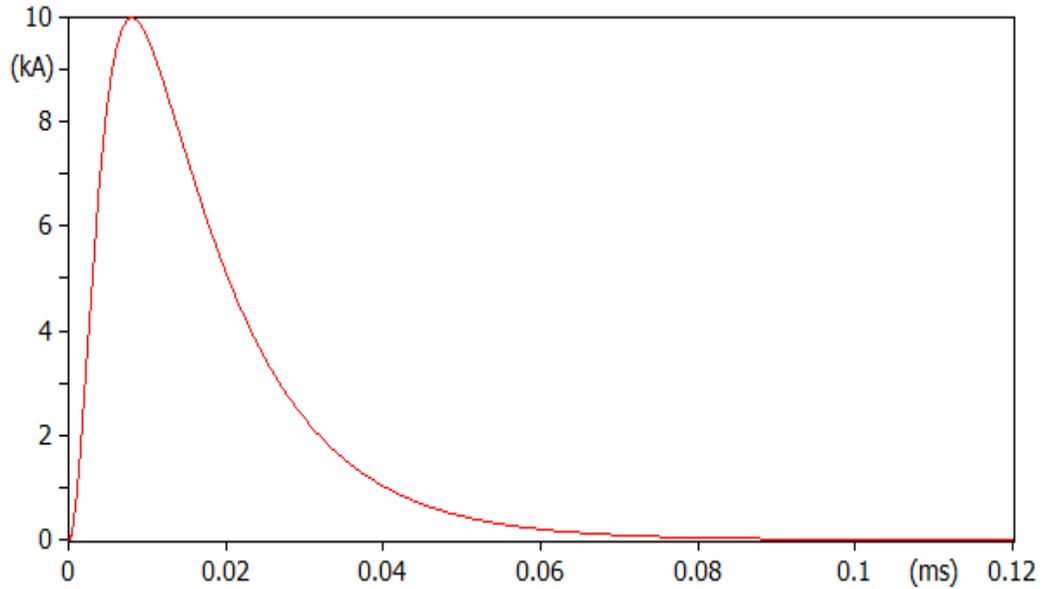


Figura 5. 29. Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR).

En la Figura 5. 30 se muestra el comportamiento del capacitor ante una descarga tipo rayo 10 kA, cuando la curva del capacitor permanece constantemente en cero significa que el descargador no ha soportado la descarga eléctrica por lo cual afecta al elemento que protegía, en este caso se observa como la curva del capacitor ante la descarga baja hasta llegar a cero pero inmediatamente busca restablecerse y mantener el voltaje adecuado, por lo que se deduce el correcto funcionamiento del descargador de sobretensión MCKLEAR.

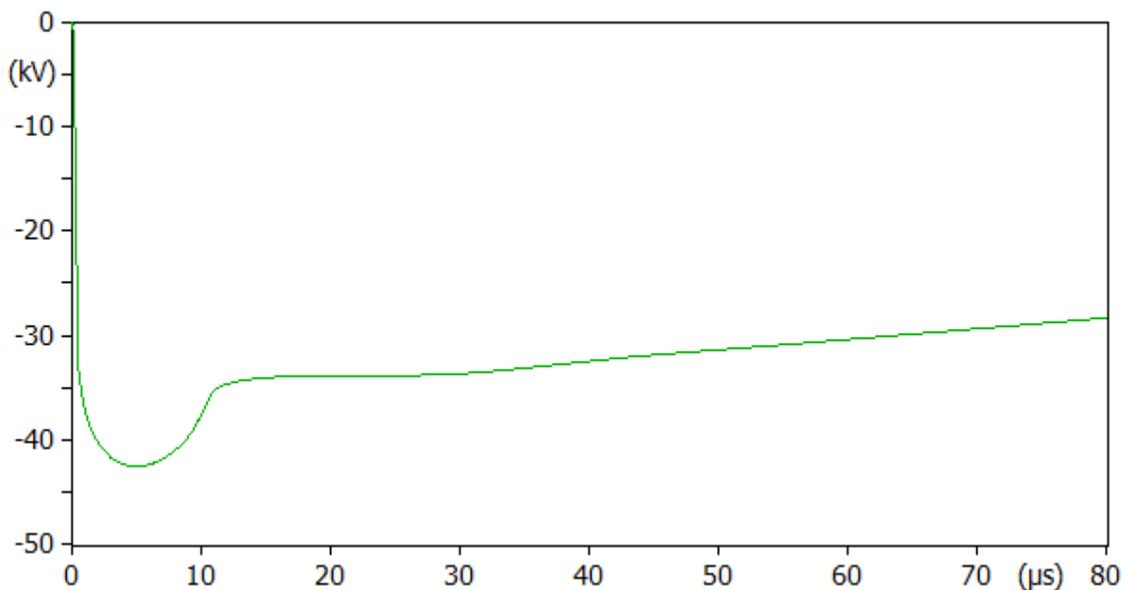


Figura 5. 30. Capacitor Tipo Rayo (MCKLEAR).

El comportamiento del voltaje y la corriente ante un impulso tipo rayo se observa en la Figura 5. 31, donde la forma de onda de color azul representa el voltaje y de color rojo la

corriente, para el correcto funcionamiento del descargador se dice que las dos formas de ondas deben ser simétricas con diferencia en sus valores picos para lograr la máxima protección de los equipos.

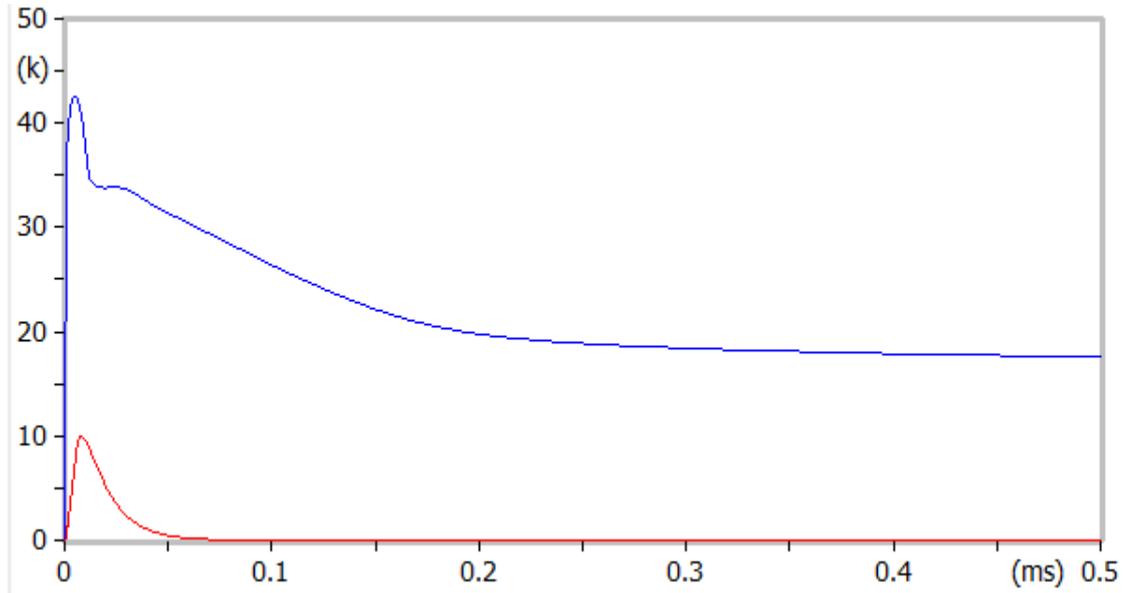


Figura 5. 31. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR).

#### 5.4.5 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Rayo del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2 aplicando una carga P y Q

La Figura 5. 32 muestra cómo se comporta el voltaje ante la incorporación de una carga de P y Q en el modelo IEEE, se observa como interfiere en la capacidad de soporte del voltaje de impulso tipo rayo, haciendo que dicho valor presente una variación ante la descarga eléctrica generando a través de ella perturbaciones en su señal.

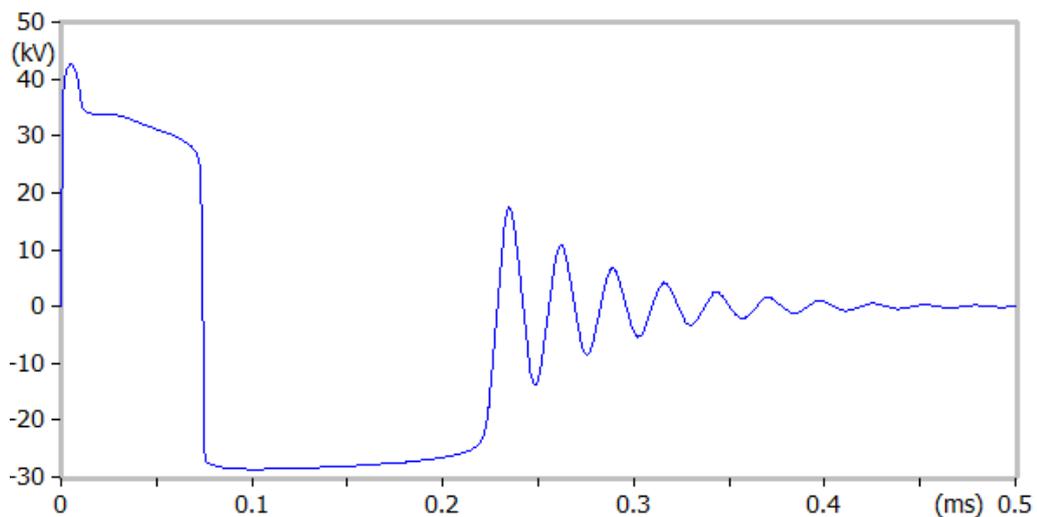


Figura 5. 32. Voltaje Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga.

El capacitor claramente necesita de una carga entra para lograr restablecer su voltaje rápidamente, es por ello que al incorporar la carga P y Q se observa en la Figura 5. 33 como se restablece el voltaje en menor tiempo a comparación de la Figura 5. 30 que tarda más tiempo en restablecerse al no presentar una carga.

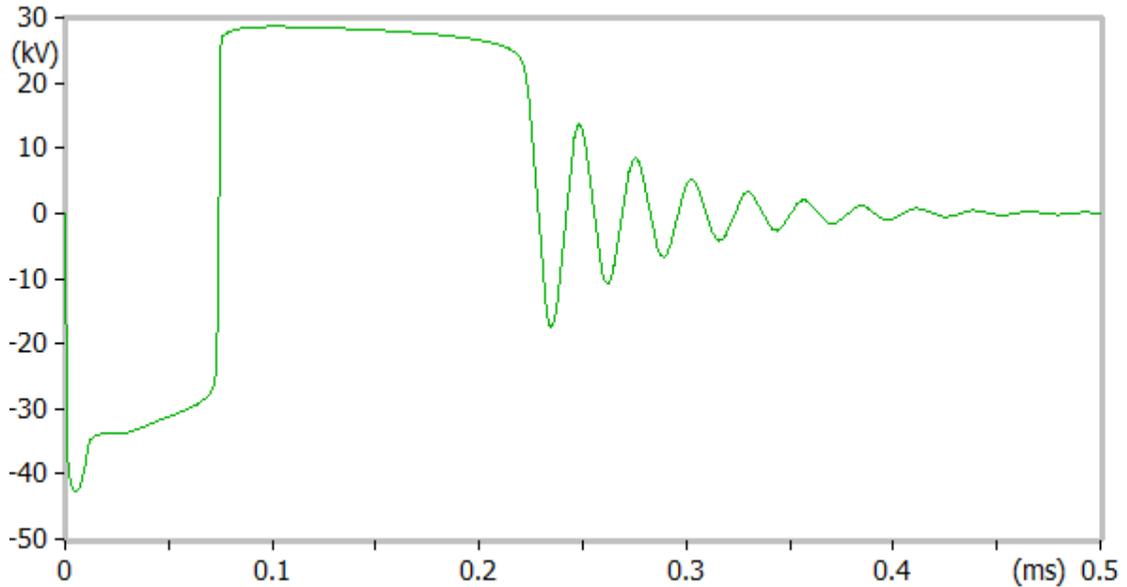


Figura 5. 33. Capacitor Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga.

Mientras que en la Figura 5. 34 se observa cómo se comportan tanto el voltaje y la corriente ante la incorporación de la carga P y Q, donde claramente solo afecta al voltaje y la corriente mantiene su forma inicial al no presentar cambios en sus magnitudes.

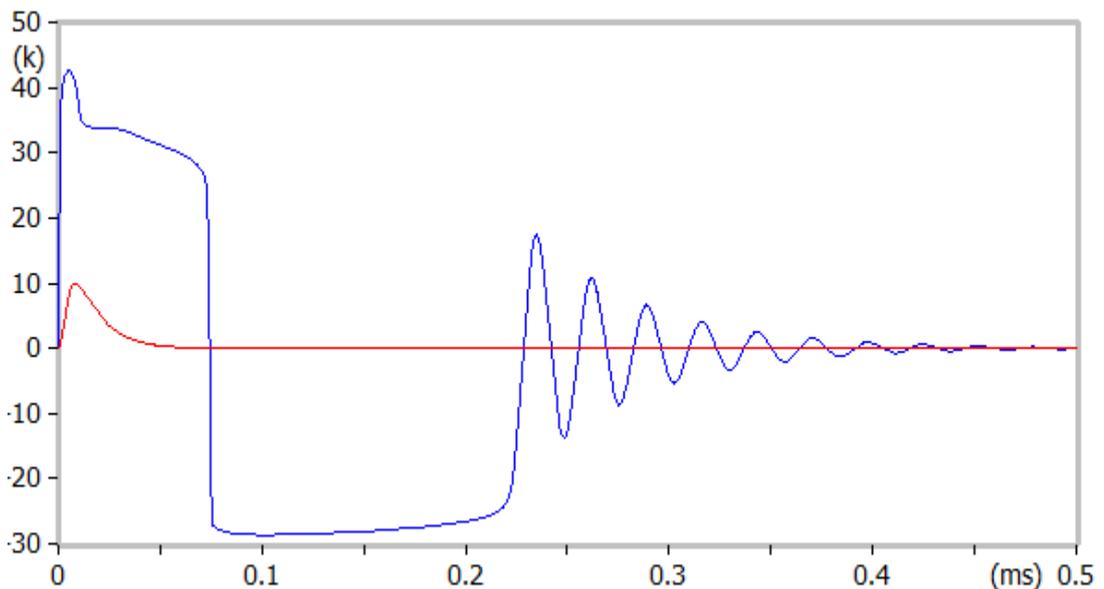


Figura 5. 34. Voltaje y Corriente Tipo Rayo (MCKLEAR) aplicando carga.

#### 5.4.6 Resultados de la simulación Voltaje-Corriente Tipo Maniobra del descargador MCKLEAR en ATPDraw 7.2

Para realizar la prueba del impulso tipo maniobra se calibra la fuente HEIDLER al valor nominal de corriente que se desea simular, en este caso fue de 2 kA por lo cual el valor  $U_{pl}$  de referencia para el voltaje dado por el fabricante MCKLEAR es de 37 kV, mientras que en la Figura 5. 35 se observa que el voltaje de impulso tipo maniobra alcanza los 38.53 kV, lo cual deduce la correcta simulación del descargador.

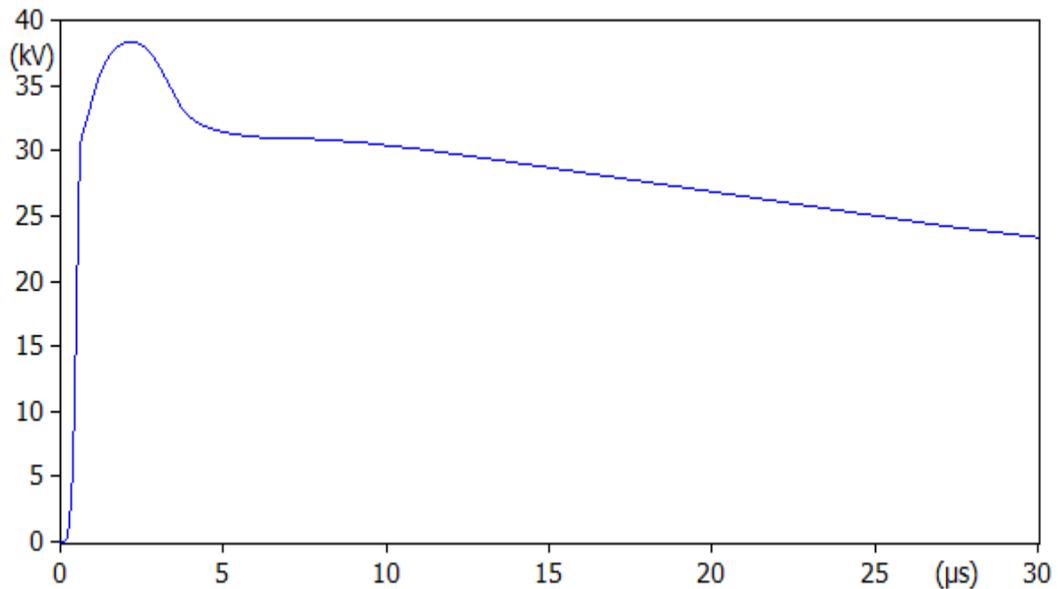


Figura 5. 35. Voltaje Tipo Maniobra (MCKLEAR).

En la Figura 5. 36 se observa el comportamiento de la corriente al impulso tipo maniobra 2kA lo cual corrobora la correcta simulación al presentar el mismo valor de corriente pico incorporado al modelo IEEE del descargador de sobretensión.

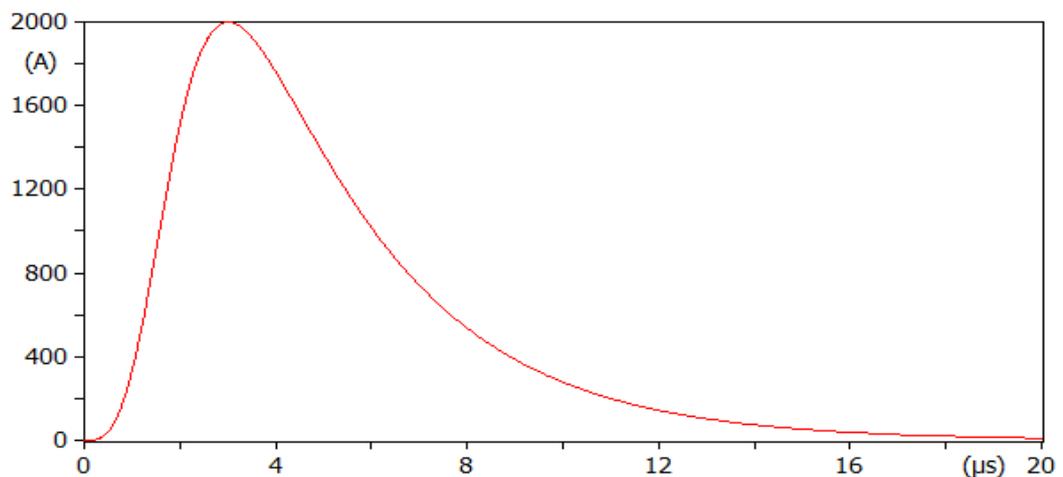


Figura 5. 36. Corriente Tipo Maniobra (MCKLEAR).

## 5.5 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE LABORATORIO EN LOS DESCARGADORES DE SOBRETENSIÓN

La Tabla 5. 13 muestra los componentes del tercer armónico de la corriente de fuga medida en los tres escenarios como son: para un descargador nuevo, menos de 10 años y más de 10 años de uso. De la misma manera se presentan los resultados de las cuatro marcas de descargadores que se utilizaron para el ensayo como son: Mcklear, Celeco, Balestro y Ohio Brass, en todos los casos se realizó las pruebas tomando en cuenta las temperaturas (21°C y 24°C) con el objetivo de analizar el envejecimiento de los descargadores tipo poliméricos.

Tabla 5. 13. Resultados de las mediciones del tercer armónico en los cuatro descargadores de sobretensión.

Temperatura	Muestras	Mcklear (mA)	Celeco (mA)	Balestro (mA)	Ohio Brass (mA)
21 ° C	Nuevos	0.022	0.012	0.013	0.0042
	Menos de 10 años	0.031	0.03	0.025	0.019
	Más de 10 años	0.38	0.25	0.18	0.11
24 ° C	Nuevos	0.022	0.012	0.013	0.0042
	Menos de 10 años	0.012	0.019	0.03	0.019
	Más de 10 años	0.22	0.21	0.18	0.97

Las mediciones tomadas en el laboratorio también muestran resultados del comportamiento del tercer armónico de la corriente de fuga en el descargador de sobretensión como se observa en la Figura 5. 37, la misma indica ciertas perturbaciones en la señal a causa del envejecimiento y las pérdidas de las propiedades protectoras del descargador de sobretensión.

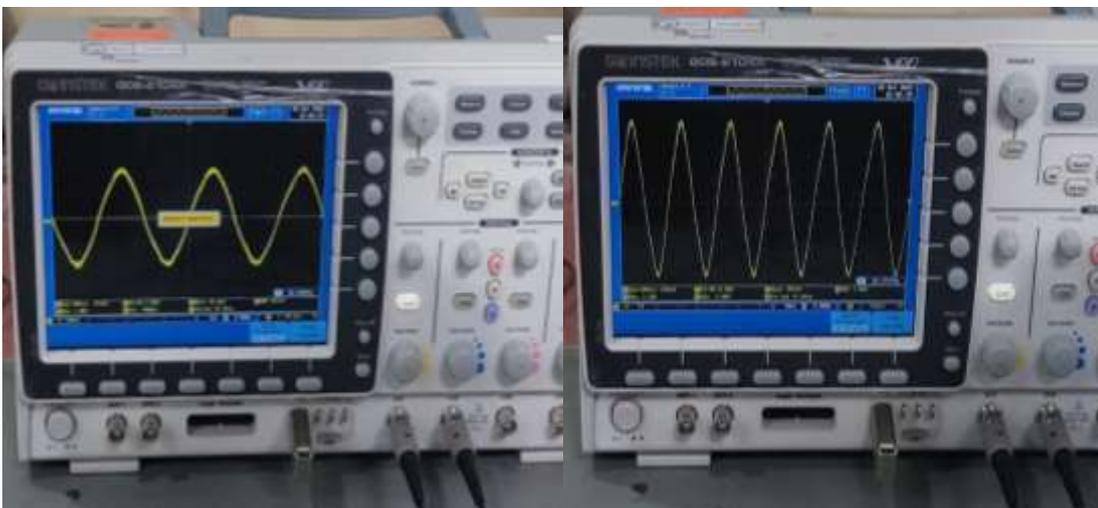


Figura 5. 37. Resultados de la medición en el osciloscopio del tercer armónico a 21°C y a 24°C.

### 5.5.1 Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Mcklear

En la Figura 5. 38 se analiza el comportamiento del tercer armónico de la corriente de fuga del descargador Mcklear, los descargadores nuevos presentan un valor bajo del tercer armónico (0.022 mA) a una temperatura de 21°C, mientras el que está en servicio con menos de 10 años presenta un leve incremento (0.031 mA), lo cual indica que podría posicionarse en el estado “Alerta”, finalmente el que está en servicio por más de 10 años presenta un valor considerablemente alto (0.38 mA), e indica que se encuentra en el estado “Falla” y es propenso a no soportar una descarga eléctrica y provocar daños en los dispositivos al cual proteja.

Al mismo tiempo supera el valor propuesto por la norma IEEE 519-1992 [28], el cual indica que el tercer armónico de la corriente de fuga no debe ser mayor al 2% de la fundamental, finalmente al presentar una temperatura 24°C se observa que los valores disminuyen levemente, esto sucede ya que es una temperatura ambiente y los descargadores tipo poliméricos están diseñados para no mostrar cambios ante cambios leves de temperaturas.

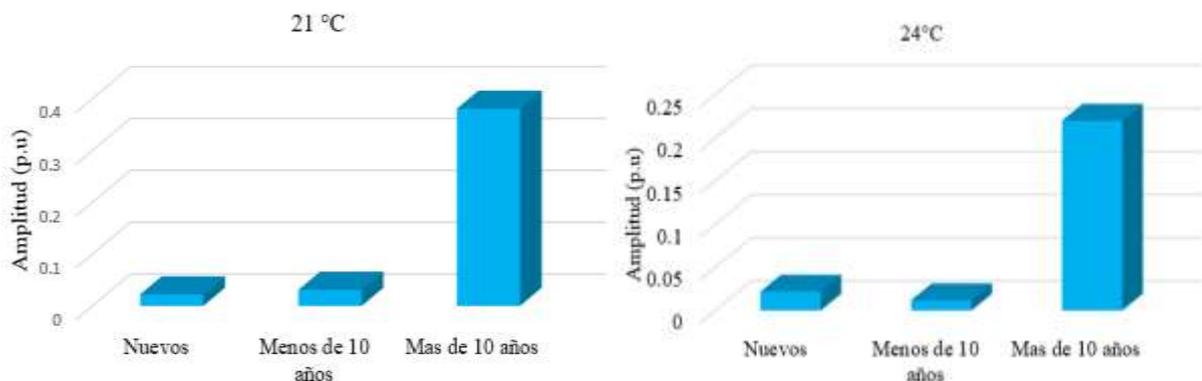


Figura 5. 38. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Mcklear a 21°C y a 24°C.

### 5.5.2 Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Celeco

En la Figura 5. 39 se analiza el comportamiento del tercer armónico de la corriente de fuga del descargador Celeco, los descargadores nuevos presentan un valor bajo del tercer armónico (0.012 mA) a una temperatura de 21°C, mientras el que está en servicio con menos de 10 años presenta un leve incremento (0.03 mA), lo cual indica que podría posicionarse en el estado “Alerta”, finalmente el que está en servicio por más de 10 años presenta un valor considerablemente alto (0.25mA), e indica que se encuentra en el estado “Falla” y es propenso a no soportar una descarga eléctrica y provocar daños en los dispositivos al cual proteja.

Al mismo tiempo supera el valor propuesto por la norma IEEE 519-1992 [28], el cual indica que el tercer armónico de la corriente de fuga no debe ser mayor al 2% de la fundamental, finalmente al presentar una temperatura 24°C se observa que los valores disminuyen levemente, esto sucede ya que es una temperatura ambiente y los descargadores tipo poliméricos están diseñados para no mostrar cambios ante cambios leves de temperaturas.

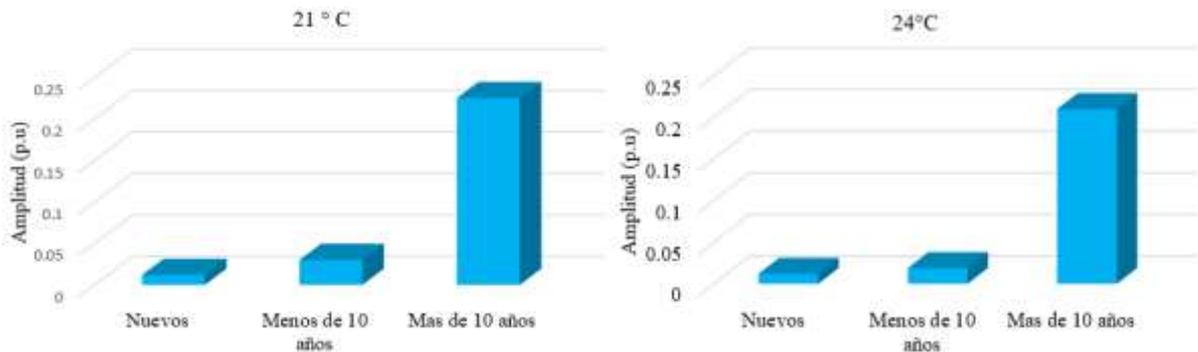


Figura 5. 39. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Celeco a 21°C y a 24°C.

### 5.5.3 Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Balestro

En la Figura 5. 38 se analiza el comportamiento del tercer armónico de la corriente de fuga del descargador Balestro, los descargadores nuevos presentan un valor bajo del tercer armónico (0.013 mA) a una temperatura de 21°C en comparación a los dos descargadores antes analizados, mientras el que está en servicio con menos de 10 años presenta un leve incremento (0.025 mA), lo cual indica que podría posicionarse en el estado “Alerta”, finalmente el que está en servicio por más de 10 años presenta un valor considerablemente alto (0.18 mA), e indica que se encuentra próximo al estado de “Falla” y es propenso a no soportar una descarga eléctrica y provocar daños en los dispositivos al cual proteja.

No supera el propuesto por la norma IEEE 519-1992 [28], el cual indica que el tercer armónico de la corriente de fuga no debe ser mayor al 2% de la fundamental, pero debe mantenerse en alerta y si es factible realizar el cambio del descargador, finalmente al presentar una temperatura 24°C se observa que los valores disminuyen levemente, esto sucede ya que es una temperatura ambiente y los descargadores tipo poliméricos están diseñados para no mostrar cambios ante cambios leves de temperaturas.

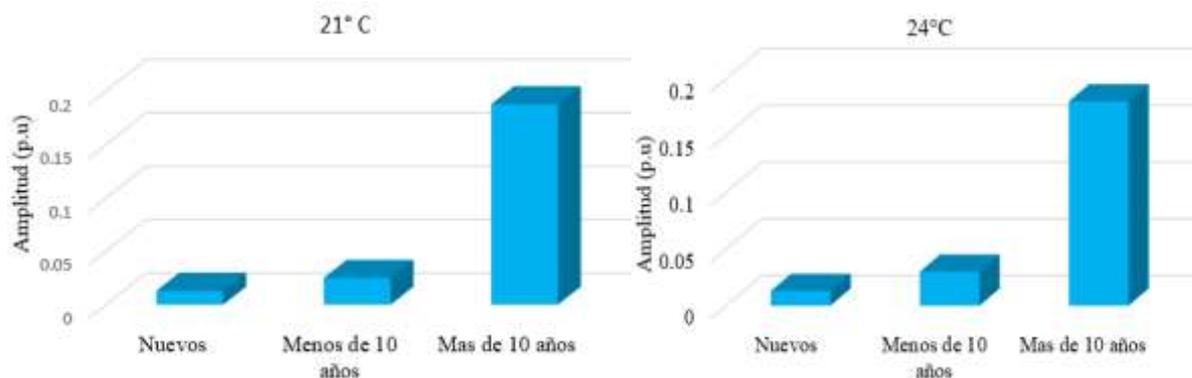


Figura 5. 40. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Ballestro a 21°C y a 24°C.

#### 5.5.4 Resultados del tercer armónico de corriente de fuga del descargador Ohio Brass

En la Figura 5. 38 se analiza el comportamiento del tercer armónico de la corriente de fuga del descargador Ohio Brass, los descargadores nuevos presentan un valor bajo del tercer armónico (0.0042 mA) a una temperatura de 21°C, mientras el que está en servicio con menos de 10 años presenta un leve incremento (0.019 mA), lo cual indica que podría posicionarse en el estado “Alerta”, finalmente el que está en servicio por más de 10 años presenta un valor considerablemente alto (0.11 mA), e indica que se encuentra en el estado moderado, aun esta propenso a presentar daños con fuertes descargas eléctricas.

Se considera que no supera el valor propuesto por la norma IEEE 519-1992 [28], el cual indica que el tercer armónico de la corriente de fuga no debe ser mayor al 2% de la fundamental, finalmente al presentar una temperatura 24°C se observa que los valores disminuyen levemente, esto sucede ya que es una temperatura ambiente y los descargadores tipo poliméricos están diseñados para no mostrar cambios ante cambios leves de temperaturas.

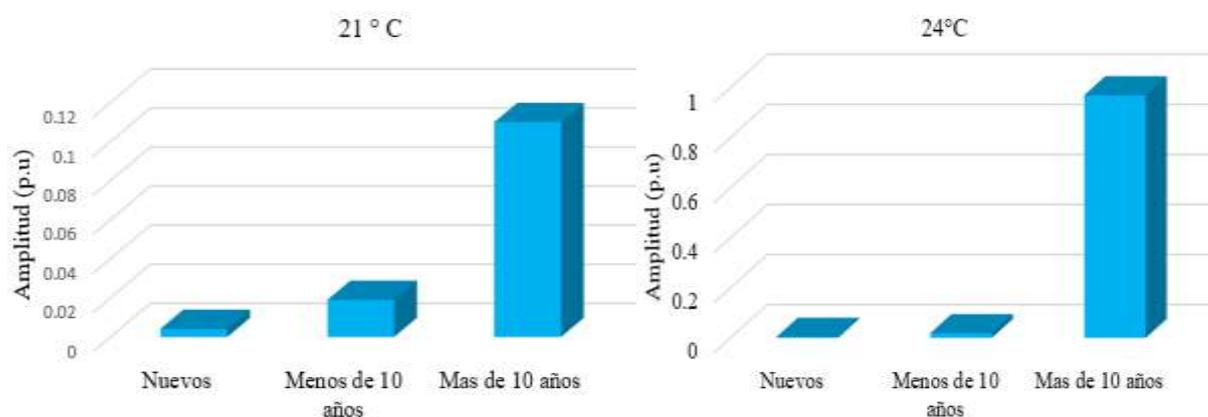


Figura 5. 41. Comportamiento del tercer armónico en el descargador Ohio Brass a 21°C y a 24°C.

### 5.5.5 Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión nuevos

Ahora, en cambio se analiza los valores del tercer armónico de corriente de fuga de los cuatro descargadores nuevos como se muestra en la Figura 5. 42 tanto a 21 °C y a 24°C, donde se observa que el descargador Ohio Brass presenta el valor más bajo (0.0042 mA) a comparación del Mcklear (0.022 mA) y es posible deducir que el descargador Ohio Brass presenta una mejor composición en su fabricación y por lo tanto un mejor rendimiento en los sistemas de distribución eléctrica.

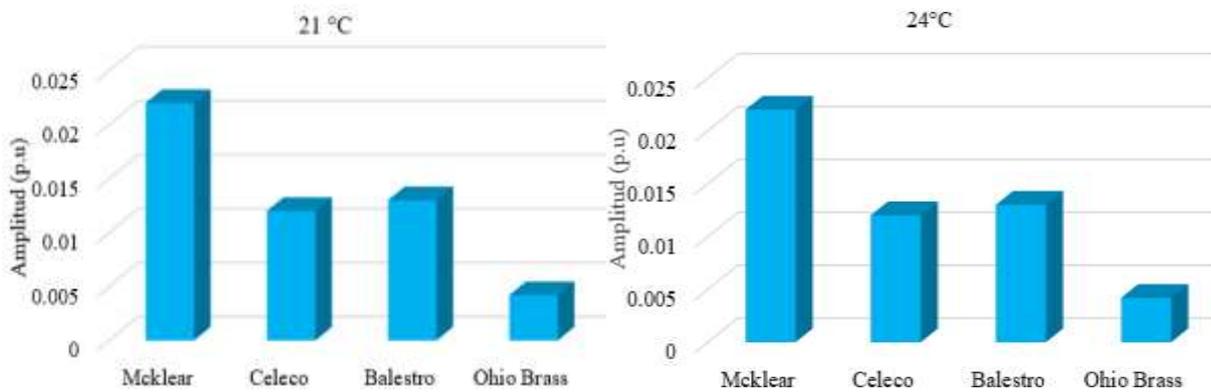


Figura 5. 42. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores nuevos a 21°C y a 24°C.

### 5.5.6 Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión menos de 10 años

Con respecto al comparación de los valores del tercer armónico de corriente de fuga de los cuatro descargadores con menos de 10 años de uso que se muestran en la Figura 5. 43 tanto a 21 °C y a 24°C, donde se observa que el descargador Ohio Brass sigue presentando un valor considerablemente bajo (0.019 mA) a comparación del Mcklear (0.031 mA) y de los demás descargadores, se sigue tenido en cuenta que el descargador Ohio Brass presenta una mejor composición en su fabricación y por lo tanto un mejor rendimiento en los sistemas de distribución eléctrica.

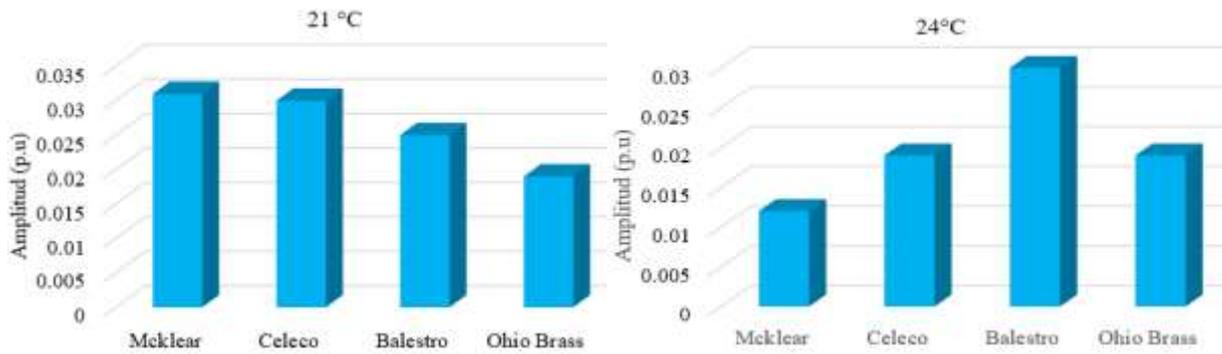


Figura 5. 43. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores con menos de 10 años a 21°C y a 24°C.

### 5.5.7 Comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga en descargadores de sobretensión más de 10 años

Finalmente, los valores del tercer armónico de corriente de fuga de los cuatro descargadores con más de 10 años de uso que se muestran en la Figura 5. 44 tanto a 21 °C y a 24°C, donde se observa que el descargador Ohio Brass se mantiene presentando un valor considerablemente bajo (0.011 mA) a comparación del Mcklear (0.38 mA), el Celeco (0.22 mA) y Balestro (0.18 mA), en base al parámetro de la norma IEEE 519-1992 [28] el cual indica que el tercer armónico de la corriente de fuga no debe ser mayor al 2% de la fundamental, se considera que el descargador Mcklear y Celeco cumplieron su vida útil de trabajo y deben ser remplazados por unos nuevos, en cambio los descargadores Ohio Brass y Balestro presentan una mayor durabilidad y podrían estar en observación.

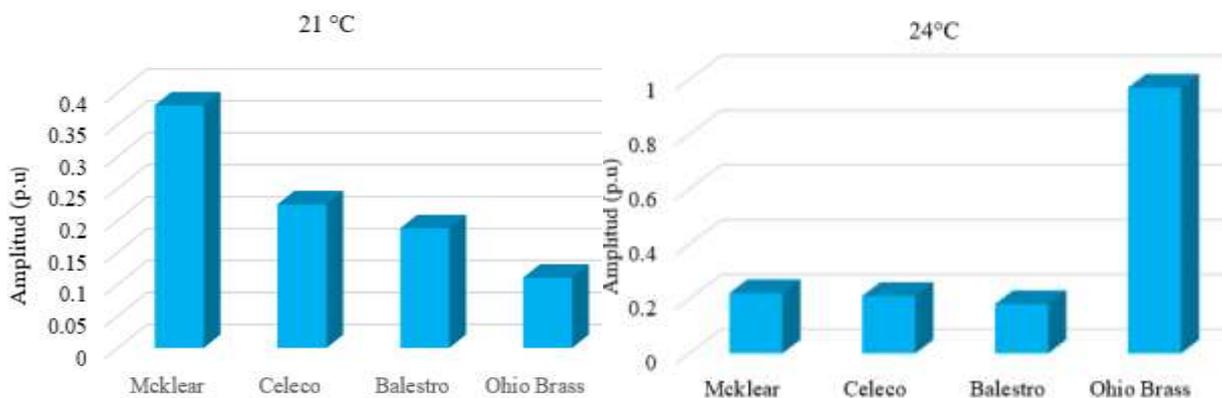


Figura 5. 44. Comportamiento del tercer armónico en los cuatro descargadores con más de 10 años a 21°C y a 24°C.

### 5.5.8 Estados del envejecimiento de los descargadores de sobretensión

Considerando que el envejecimiento de los descargadores de sobretensión viene relacionado directamente con el comportamiento del tercer armónico de corriente de fuga, se establece los siguientes estados en los que se encuentran los diferentes descargadores analizados en este proyecto de investigación como se muestra en la Tabla 5. 14.

Donde, en base a los parámetros indicados en la IEEE-519-1992 [28], el valor del tercer armónico no debe superar el 2% con respecto a la fundamental, los descargadores nuevos analizados a una temperatura 21°C en las cuatro marcas se encuentran en el estado “Normal”, mientras que los menos de 10 años de uso se encuentran en estado “Normal” a excepción del descargador Celeco que presentan un aumento en el valor del tercer armónico, finalmente los descargadores con más de 10 años de uso están en el estado “Falla” como son el Mcklear y Celeco al superar el 2 % establecido, en cambio el Balastro y Ohio Brass se mantienen en el estado “Alerta”.

Tabla 5. 14. Estados del envejecimiento de los descargadores

<b>Temperatura</b>	<b>Muestras</b>	<b>Mcklear</b>	<b>Celeco</b>	<b>Balestro</b>	<b>Ohio Brass</b>
21 ° C	Nuevos	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>
	Menos de 10 años	<u>NORMAL</u>	<u>ALERTA</u>	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>
	Más de 10 años	<u>FALLA</u>	<u>FALLA</u>	<u>ALERTA</u>	<u>ALERTA</u>
24 ° C	Nuevos	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>
	Menos de 10 años	<u>NORMAL</u>	<u>NORMAL</u>	<u>ALERTA</u>	<u>NORMAL</u>
	Más de 10 años	<u>FALLA</u>	<u>FALLA</u>	<u>ALERTA</u>	<u>FALLA</u>

Ahora, al analizar los descargadores nuevos a una temperatura de 24°C en las cuatro marcas se encuentran en el estado “Normal”, mientras que los menos de 10 años de uso se encuentran en estado “Normal” a excepción del descargador Celeco que presentan un aumento en el valor del tercer armónico, finalmente los descargadores con más de 10 años de uso están en el estado “Falla” como son el Mcklear, Ohio Brass y Celeco al superar el 2 % establecido, en cambio el Balastro se mantienen en el estado “Alerta”. Por lo que se deduce que el aumento de la temperatura afecta relativamente al envejecimiento de los descargadores de sobretensión.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado se puntualiza las principales conclusiones y recomendaciones referentes al presente proyecto de investigación.

### 6.1 CONCLUSIONES

En el estado del arte del presente proyecto de investigación se establece un amplio contenido bibliográfico acerca de los descargadores de sobretensión en los sistemas de distribución eléctrica 13.8 kV, tercer armónico de la corriente de fuga y sobretensiones atmosféricas, analizando varias fuentes de información como; artículos científicos, tesis, libros, papers, etc. Finalmente, se establecen normativas nacionales como internacionales para validar el proceso de investigación del proyecto.

La selección del lote de los descargadores de sobretensión va pegada a los lineamientos del MEER al cual se aplicó las normas IEC 60099-4, IEC 60099-5 para realizar los diagramas que se ingresan en ATP para la simulación cumpliendo con las normas NTE INEN 3098 e ISO 9001.

El modelamiento del descargador de sobretensión se realiza en el software ATPDraw 7.2 en base al modelo propuesto por la IEEE WORKING GROUP 3.4.11, donde se analiza los principales resultados de las formas de ondas características tipo rayo (10 kA) y maniobra (2 kA, 2.5 kA y 3 kA) de los cuatro descargadores analizados (Celeco, Mcklear, Balestro y Ohio Brass) tanto del comportamiento del voltaje, corriente, capacitor y la incorporación de una carga capacitiva.

Considerando los resultados del tercer armónico de corriente de fuga mediante la pinza ALCL 80x, se concluye que a una temperatura de 21° C y 24 °C en descargadores nuevos el Ohio Brass presenta el valor más bajo del tercer armónico (0.0042mA) lo cual indica que posee mejores características constructivas, mientras que en descargadores con menos de 10 años de uso el Ohio Brass presenta un mejor rendimiento con un valor del tercer armónico (0.019mA) en comparación a las otras marcas como Mcklear (0.031mA) que tiene el valor más alto, finalmente en descargadores con más de 10 años de uso el Ohio Brass sigue presentando mejor rendimiento (0.11mA) en comparación del Mcklear(0.38mA), Celeco(0.225mA) y Balestro(0.18mA).

El presente proyecto de investigación determina el envejecimiento de los descargadores de sobretensión en base al valor del tercer armónico de la corriente de fuga que no debe superar el 2 % tal como lo establece la IEEE-519-1992 por lo cual se precisa tres estados, donde; los

descargadores nuevos se encuentran en el estado “Normal”, los descargadores con menos de 10 años de uso siguen estando en el estado “Normal” a excepción del Celeco que se encuentra en estado “Alerta” y después de los 10 años de uso el descargador Mcklear y Celeco se encuentran en estado “Falla” mientras el Balestro y Ohio Brass en estado “Alerta”.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda utilizar fuentes de información relevantes sobre el estudio de las corrientes de fuga en los sistemas de distribución eléctrica, principalmente de artículos científicos y papers internacionales relacionados al tema, de la misma forma precisar normativas vigentes nacionales e internacionales con el fin de establecer los parámetros relevantes.

El presente trabajo de investigación es recomendado para evaluar los estados de envejecimiento de los descargadores de sobretensión, debido a que se proporciona valores acordes a normativas para el análisis del tercer armónico de la corriente de fuga que es el principal causante del deterioro del descargador en cuanto a su rendimiento.

El modelo del descargador de sobretensión propuesto por la IEEE Working Group 3.4.11 es el recomendable debido a que precisa una composición completa para el análisis de su funcionamiento en cuanto a la protección contra sobretensiones y descargas de corriente.

Es recomendable realizar las mediciones del tercer armónico de la corriente de fuga en los sistemas eléctricos de distribución mediante la pinza ALCL-80x, debido a que proporciona directamente los valores del tercer armónico a comparación de los demás instrumentos que miden corrientes capacitivas o inductivas.

En cuanto a los estados del envejecimiento, en descargadores que presenten el estado “Alerta” se recomienda realizar el mantenimiento correctivo y preventivo ante una posible falla, finalmente en descargadores de estado “Falla” se recomienda ser remplazados inmediatamente ya que no garantizan una adecuada protección contra los efectos de la corriente de descarga o sobretensiones.

En este estudio no se ha considerado el cambio de temperatura en el laboratorio esto se podría considerar para futuros estudios.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Campuez and M. Vega, “CARACTERIZACIÓN DEL AISLAMIENTO ELÉCTRICO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN: MODELOS Y APLICACIONES,” 2022.
- [2] H. Ibáñez, “Estudio de degradación de descargadores de óxido de zinc tipo distribución,” 2009.
- [3] D. Poveda, “Correlación experimental entre la corriente de fuga, la tensión residual, la energía acumulada debida a impulsos de corriente y la carga eléctrica en descargadores de sobretensión para distribución,” 2014.
- [4] J. Rodriguez, J. Ramírez, M. Martínez, and E. da Silva, “EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN A FRECUENCIA INDUSTRIAL (60 Hz) EN LA CAPACIDAD TÉRMICA DE LOS DESCARGADORES DESOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN,” 2009. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/257944735>
- [5] E. Cuenca, “ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MODELOS DE DESCARGADORES PARA ESTUDIOS DE SOBREVOLTAJES UTILIZANDO EL PROGRAMA ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM - ATP,” 2013.
- [6] J. Durán and N. Torres, “Diagnóstico del estado de descargadores de sobretensión en subestaciones de alta tensión, mediante la medición de corrientes de fuga y tangente delta,” 2002. [Online]. Available: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica)
- [7] O. Astudillo, “MODELO MATEMÁTICO DE UN DESCARGADOR ELÉCTRICO PARA MEJORAR LA PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CONSIDERANDO SOBRETENSIONES,” 2021.
- [8] E. Guerra and A. Andrade, “SELECCIÓN DE DESCARGADORES DE SOBRETENSION DE OXIDO METALICO,” 2004.
- [9] C. Segovia and C. Zambrano, “DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS DE LA RUPTURA DIELECTRICA EN AISLADORES DE PORCELANA, POLÍMERO Y VIDRIO A NIVEL DE 13,8 kV,” 2021.
- [10] F. Becerra, “MEJORA EN EL AISLAMIENTO Y SOBRETENSIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO DE ORCOPAMPA – COTAHUASI,” 2022.
- [11] A. Munir, Z. Abdul-Malek, and R. N. Arshad, “Resistive Leakage Current Based Condition Assessment of Zinc Oxide Surge Arrester: A Review,” Jul. 2021, vol. 2021-July, pp. 183–186. doi: 10.1109/ICPADM49635.2021.9493979.
- [12] S. Shirakawa *et al.*, “Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector,” vol. 3, no. 3, pp. 998–1003, 1988, doi: 10.1109/61.193879.
- [13] E. Manual, “Arrester (metal oxide surge arrester) Leakage Current Clamp Tester ALCL-80X,” 2020. [Online]. Available: [www.multimic.com/e](http://www.multimic.com/e)
- [14] UNE-EN, “IEC 60099-4,” 2005.
- [15] S. International, *IEC 60099-5*. 2013.
- [16] U. Pramuk, “IEEE WORKING GROUP 3.4.11,” 2014, vol. 56, no. C, pp. 92–101. doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.136.
- [17] IEEE, *IEEE Std C62.11*. IEEE, 2017.
- [18] ISO 9001, “NORMA INTERNACIONAL ISO 9001,” 2015. [Online]. Available: [www.iso.org](http://www.iso.org)

- [19] E. Ministerio, “MEER,” 2011.
- [20] N. INEN, “NTE INEN 3098,” 2016.
- [21] Celeco, “APARTARRAYOS POLIMÉRICO CELECO,” 2021. [Online]. Available: [www.celeco.com.mx](http://www.celeco.com.mx)
- [22] Balestro, “Catalogo Balestro,” 2021.
- [23] Ohio Brass, “Descargadores de Sobretensiones Ohio Brass,” 2007.
- [24] Mcklear, “Arrester Mcklear,” 2022.
- [25] A. Hileman, “Insulation Coordination for Power Systems,” 1999.
- [26] X. ALCL, “PRESENTACIÓN EQUIPO ALCL-80X leaflet,” 2020.
- [27] M. Khodsuz and M. Mirzaie, “Harmonics ratios of resistive leakage current as metal oxide surge arresters diagnostic tools,” vol. 70, pp. 148–155, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.03.048.
- [28] R. IEEE, “IEEE-519-1992,” 1993.

## 8 ANEXOS

Anexo I. Valores característicos de la corriente nominal de descarga ( $I_n$ ) en función del voltaje máximo del sistema

<b>Voltaje máximo del sistema (kV r.m.s.)</b>	<b>Corriente nominal de descarga <math>I_n</math></b>
$U_s \leq 72.5 \text{ kV}$	5 kA
$72.5 \text{ kV} < U_s \leq 245 \text{ kV}$	10 kA
$245 \text{ kV} \leq U_s \leq 420 \text{ kV}$	10 kA
$U_s \geq 420 \text{ kV}$	20 kA

Anexo II. Valores habituales de corrientes nominales de descarga ( $I_n$ ) y clase de descarga de línea

<b>Voltaje nominal del sistema</b>	<b>Voltaje máximo del sistema</b>	<b>Corriente nominal de descarga</b>					
		<b>5 kA</b>	<b>10 kA</b>			<b>20 kA</b>	
			<b>Clase 1</b>	<b>Clase 2</b>	<b>Clase 3</b>	<b>Clase 4</b>	<b>Clase 5</b>
$U_r \leq 66 \text{ kV}$	$U_s \leq 72.5 \text{ kV}$						
$66 \text{ kV} < U_r \leq 220 \text{ kV}$	$72.5 \text{ kV} < U_s \leq 245 \text{ kV}$						
$220 \text{ kV} \leq U_r \leq 380 \text{ kV}$	$245 \text{ kV} \leq U_s \leq 420 \text{ kV}$						
$U_r > 380 \text{ kV}$	$U_s \geq 420 \text{ kV}$						

Anexo III. Valores normalizados del máximo voltaje de operación continua de los descargadores según ANSI C62.11-1999

<b>Voltaje nominal (kV rms)</b>	<b>Máximo voltaje de operación continua (kV rms)</b>	<b>Voltaje nominal (kV rms)</b>	<b>Máximo voltaje de operación continua (kV rms)</b>
3	2,55	144	115
6	5,1	168	131
9	7,65	172	140
10	8,4	180	144
12	10,2	192	152
15	12,7	228	180
18	15,3	240	190
21	17	258	209
24	19,5	264	212
27	22	276	220
30	24,4	288	230
36	29	294	235
39	31,5	312	245
45	36,5	396	318
48	39	420	335
54	42	444	353
60	48	468	372
72	57	492	392
90	70	540	428
96	76	564	448
108	84	576	462
120	98	588	470
132	106	612	485

Anexo IV. Valores normalizados del voltaje nominal de los descargadores

Rangos de voltaje nominal (kV r.m.s.)	Escalones de voltaje nominal (kV r.m.s.)
<3	Bajo consideraciones
3-30	1
30-54	3
54-96	6
96-288	12
288-396	18
396-756	24

Anexo V. Valores de corriente nominal de descarga normalizados en función del voltaje nominal del descargador

Rangos de voltaje nominal kV r.m.s.	Corriente nominal de descarga				
	1,5 kA	2,5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
$U_r < 3\text{kV}$					
$3\text{kV} \leq U_r \leq 29\text{kV}$					
$30\text{kV} \leq U_r \leq 132\text{kV}$					
$144\text{kV} \leq U_r \leq 756\text{kV}$					

Anexo VI. Parámetros para el ensayo de descarga de línea en descargadores de 10 kA y 20 kA para determinar la clase de descarga de línea

Corriente de descarga $I_n$	Clase de descarga de línea	Impedancia de onda de la línea $Z(\Omega)$	Duración convenciona l de la cresta $T(\mu\text{s})$	Voltaje de carga $U_L$ (kV de voltaje continuo)
10 kA	1	$4,9 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
	2	$2,4 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
	3	$1,3 \cdot U_r$	2400	$2,8 \cdot U_r$
20 kA	4	$0,8 \cdot U_r$	2800	$2,8 \cdot U_r$
	5	$0,5 \cdot U_r$	3200	$2,4 \cdot U_r$

Anexo VII. Valores de formas de onda y magnitud de la corriente de descarga sobre los que los fabricantes deben realizar ensayos para obtener voltajes residuales

<b>Clasificación de descargadores</b>		<b>Impulso de maniobra</b>	<b>Impulso tipo rayo</b>
		<b>(30/60 <math>\mu</math>s)</b>	<b>(8/20 <math>\mu</math>s)</b>
<b>1,5 kA</b>		---	1,5 kA
<b>2,5 kA</b>		---	2,5 kA
<b>5 kA</b>		---	5 kA
<b>10 kA</b>	<b>1</b>	125 A y 500 A	10 kA
	<b>2</b>	125 A y 500 A	10 kA
	<b>3</b>	250 A y 1000 A	10 kA
<b>20 kA</b>	<b>4</b>	500 A y 2000 A	20 kA
	<b>5</b>	500 A y 2000 A	20 kA

Anexo VIII. Línea de fuga específica nominal en función del nivel de contaminación.

Nivel de contaminación	Descripción	Línea de fuga específica
		nominal mínima mm/kV
<b>I</b> Ligero (L)	Zonas sin industrias y baja densidad de viviendas con calefacción.	16 mm/kV
	Zonas de baja densidad de industrias o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.	
	Zonas agrícolas (sin quemado de residuos).	
	Zonas montañosas.	
<b>II</b> Medio (M)	Zonas con industrias que no producen humo especialmente contaminante, y/o con densidad media de viviendas con calefacción	20 mm/kV
	Zonas con elevada densidad de industrias y/o viviendas, sometidas a viento o lluvias frecuentes.	
	Zonas expuestas a vientos desde el mar, pero no muy próximas a la costa (nunca menos de 1 km).	
<b>III</b> Fuerte (H)	Zonas con elevada densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades, con elevada densidad de calefacción generando contaminación	25 mm/kV
	Zonas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar	
<b>IV</b> Muy Fuerte (V)	Zonas (extensión moderada) sometidas a polvos conductores y a humo industrial que produce depósitos conductores particularmente espesos.	31 mm/kV
	Zonas (extensión moderada) muy próximas a la costa y expuestas a pulverización salina o a vientos muy fuertes y contaminantes desde el mar.	
	Zonas desérticas caracterizadas por no tener lluvia durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos que transportan arena y sal, y sometidas a condensación regular.	

Anexo IX. Características eléctricas del descargador Balestro.

Características Eléctricas

Modelo	Tensão Nominal Ur (kV rms)	Tensão de Operação Continua Uc (kV rms)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente ingreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)					
					Para-raios 5kA			Para-raios 10kA		
					2,5kA	5,0kA	10,0kA	5,0kA	10,0kA	20,0kA
PBP 03/X	3,0	2,55	11,0	8,0	9,3	9,9	11,3	9,3	9,9	11,3
PBP 05/X	5,0	5,10	21,9	16,0	16,6	19,8	22,5	16,6	19,8	22,5
PBP 09/X	9,0	7,65	32,9	24,0	28,0	29,7	33,7	28,0	29,7	33,7
PBP 10/X	10,0	8,40	36,6	27,0	31,0	33,0	37,4	31,0	33,0	37,4
PBP 12/X	12,0	10,2	43,9	32,0	37,3	39,0	44,7	37,3	39,0	44,7
PBP 15/X	15,0	12,7	54,9	40,0	46,7	49,5	56,0	46,7	49,5	56,0
PBP 18/X	18,0	15,3	65,9	48,0	56,0	59,4	67,0	56,0	59,4	67,0
PBP 21/X	21,0	17,0	76,8	56,0	65,3	69,3	78,0	65,3	69,3	78,0
PBP 24/X	24,0	19,5	87,8	64,0	74,8	79,2	89,3	74,8	79,2	89,3
PBP 27/X	27,0	22,0	98,8	72,0	84,0	89,1	102,5	84,0	89,1	102,5
PBP 30/X	30,0	24,4	110,0	80,0	93,3	99,0	112,8	93,3	99,0	112,8
PBP 33/X	33,0	28,0	121,0	88,0	102,7	109,0	124,2	102,7	109,0	124,2
PBP 36/X	36,0	30,6	132,0	96,0	111,9	118,8	136,4	111,9	118,8	136,4

Anexo X. Características mecánicas del descargador Balestro.

Características Mecánicas

Modelo	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Distancia de arco (mm)	Distancia de escoamiento (mm)	Peso (kg)	
						para 5kA	para 10kA
PBP 03/X	135	98	115	110	200	2,20	2,30
PBP 05/X	135	98	115	110	200	2,40	2,50
PBP 09/X	208	98	115	180	335	2,60	2,70
PBP 10/X	208	98	115	180	335	2,80	3,10
PBP 12/X	208	98	115	180	335	2,80	3,10
PBP 15/X	208	98	115	180	335	2,90	3,20
PBP 18/X	270	98	160	240	495	3,40	4,00
PBP 21/X	270	98	160	240	495	3,60	4,20
PBP 24/X	270	98	160	240	495	3,80	4,40
PBP 27/X	327	98	160	300	660	4,00	4,70
PBP 30/X	327	98	160	300	660	4,10	4,80
PBP 33/X	327	98	160	300	660	4,30	5,00
PBP 36/X	400	98	160	370	850	4,80	5,50

Anexo XI. Características eléctricas del descargador Celeco.

No. DE ARTICULO	TENSIÓN NOMINAL DE APARTARRAYOS (kV eficaz)	TENSIONES MÁXIMAS RESIDUALES AL IMPULSO DE CORRIENTE DE RAYO 8/20µs (kV cresta) 10 kA	TENSIÓN DE AGUANTE AL AISLAMIENTO		
			AL IMPULSO DE RAYO 1,2/50 µs (kV cresta)	TENSIÓN DE CORRIENTE ALTERNA 60 Hz HÚMEDO 1 min (kV eficaz)	A LA TENSIÓN DE CORRIENTE ALTERNA 60 Hz SECO 1 min (kV eficaz)
B1856	10	30.7	75	24	27
B1857	12	39.7	85	27	31
B1858	18	53.4	125	36	42
B1859	21	62.3	125	36	42
B1860	27	80.1	150	60	70
B1861	30	89	150	60	70

Anexo XII. Características mecánicas del descargador Celeco.

No. DE ARTÍCULO	TENSIÓN NOMINAL DE APARTARRAYOS (kV)	TENSIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN CONTINUA (kV eficaz)	MASA NETA APROXIMADA (kg)	DISTANCIA DE FUGA MÍNIMA (mm)
B1856	10	8.4	1.60	350
B1857	12	10.2	1.80	420
B1858	18	15.3	2.40	650
B1859	21	17.0	2.50	650
B1860	27	22.0	3.00	830
B1861	30	24.4	3.10	830

Anexo XIII. Características eléctricas del descargador Ohio Brass.

Ur (kV)	Uc (kV)	Voltaje de Descarga Máximo ante Impulso de 0.5µs kV (1)	Máximo Nivel de Protección ante Sobretensiones de Maniobra kV (2)	Máximo Voltaje Residual usando una Onda de Impulso de Corriente de 8/20 micro-segundos					
				1.5kA	3kA	5kA	10kA	20kA	40kA
3	2.55	8.6	6.4	6.8	7.2	7.5	8.1	9.0	10.1
6	5.1	17.1	12.7	13.6	14.4	15.0	16.2	17.9	20.2
9	7.65	25.8	19.1	20.5	21.6	22.6	24.4	27	30.4
10	8.4	28.4	21.1	22.6	23.8	24.9	26.9	29.8	33.5
12	10.2	34.1	25.3	27.1	28.6	29.9	32.3	35.8	40.3
15	12.7	42.9	31.8	34.1	36	37.6	40.6	44.9	50.6
18	15.3	51.6	38.3	40.9	43.2	45.2	48.8	54	60.9
21	17	56.9	42.2	45.1	47.7	49.9	53.8	59.6	67.1
24	19.5	68.3	50.6	54.2	57.2	59.9	64.6	71.5	80.6
27	22	77.4	57.4	61.4	64.9	67.9	73.2	81	91.3
30	24.4	85.3	63.3	67.7	71.5	74.8	80.7	89.3	101
36	29	102	76	81.3	85.9	89.8	96.9	107	121
39	31.5	108.4	80.4	86.1	90.9	95.1	102.6	113.6	127.9
45	36.5	125.1	92.8	99.3	104.9	109.8	118.4	131.1	147.6
48	39	136.6	101.3	108.4	114.5	119.8	129.2	143	161.1
54	42	147.9	109.7	117.4	125	129.7	139.9	154.9	174.5
60	48	165	122.4	131	138.3	144.7	156.1	172.8	195
72	57	199	147.7	158.1	166.9	174.6	188.4	209	235

Anexo XIV. Características mecánicas del descargador Ohio Brass.

Números de Catálogo Estándar de los Descargadores	Ur (kV)	Uc (kV)	Dimensión X (mm)	Distancia de Fuga (mm)	Montaje Mínimo (1)		Peso Neto (kg)
					Distancia Fase-a-Fase (mm)	Distancia Fase-a-Tierra (mm)	
300803	3	2.55	173	391	112	84	2.8
300805	6	5.1	173	391	117	81	2.8
300808	9	7.65	173	391	119	84	2.8
300809	10	8.4	173	391	125	89	2.8
300610	12	10.2	173	391	125	89	2.8
300813	15	12.7	310	782	158	122	4.5
300815	18	15.3	310	782	168	132	4.5
300817	21	17	310	782	193	158	4.5
300620	24	19.5	310	782	193	158	4.5
300822	27	22	447	1,174	244	208	6.1
300824	30	24.4	447	1,174	249	213	6.1
300629	36	29	447	1,174	249	213	6.1
300831	39	31.5	584	1,565	325	290	7.7
300636	45	36.5	584	1,565	325	290	7.7
300639	48	39	584	1,565	325	290	7.7
300642	54	42	721	1,956	401	366	8.8
300648	60	48	721	1,956	401	366	8.8
300657	72	57	859	2,347	503	467	10.4

Anexo XV. Características eléctricas del descargador Mcklear.

Electrical Characteristics												
Base Imperial Catalog Number	MCOV (kV)	Duty Cycle Rating (kV)	Temporary overvoltage capability (kV) No prior duty		Max steep current impulse residual voltage (kV)	Max switching impulse residual voltage (kV)	Max lightning impulse residual voltage (kV)					
			1 s	10 s	10 kA	0.5 kA	1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
221603	2.55	3	3.7	3.5	10.5	6.7	7.8	8.1	8.4	9.1	10.1	11.6
221605	5.1	6	7.4	7.0	21.0	13.5	15.6	16.3	17.0	18.3	20.2	23.4
221608	7.65	9	11.1	10.5	27.6	18.0	20.9	21.8	22.7	24.5	27.1	31.4
221609	8.4	10	12.2	11.5	30.3	19.9	23.1	24.1	25.1	27.0	29.8	34.6
221610	10.2	12	14.8	14.0	36.2	23.9	27.8	29.0	30.2	32.5	35.9	41.6
221613	12.7	15	18.4	17.4	45.5	29.8	34.6	36.1	37.6	40.5	44.8	51.8
221615	15.3	18	22.2	21.0	54.5	36.0	41.8	43.6	45.4	48.9	54.0	62.6
221617	17	21	24.7	23.3	61.7	40.9	47.5	49.5	51.6	55.6	61.4	71.2
221620	19.5	24	28.3	26.8	72.2	47.8	55.5	57.8	60.2	64.9	71.7	83.1
221622	22	27	31.9	30.2	81.4	53.0	61.6	64.2	66.8	72.0	79.6	92.2
221624	24.4	30	35.4	33.5	91.0	59.6	69.3	72.2	75.2	81.0	89.5	103.7
221629	29	36	42.1	39.8	107.2	70.7	82.2	85.6	89.2	96.1	106.2	123.0

Anexo XVI. Características mecánicas del descargador Mcklear.

Physical Characteristics										
Base Imperial Catalog Number	MCOV	Duty Cycle Rating, Ur	Arrester Only Height	Creepage Distance	Strike Distance with Bracket	Recommended Clearances - Inches (mm)		Arrester Only Weight	Lightning Withstand Voltage	Power Frequency Withstand Voltage - Wet
	kV	kV	Inches (mm)	Inches (mm)	Inches (mm)	Phase-Phase	Phase-Ground	Pounds (kg)	kVpk	kVpk
221603	2.55	3	3.1 (79)	8.0 (203)	3.6 (92)	5.0 (127)	3.0 (76)	1.7 (0.8)	50	20
221605	5.1	6	5.5 (140)	15.4 (391)	6.8 (173)	5.3 (135)	3.3 (84)	4 (1.8)	105	40
221608	7.65	9	5.5 (140)	15.4 (391)	6.8 (173)	5.8 (147)	3.8 (97)	2 (0.9)	105	40
221609	8.4	10	5.5 (140)	15.4 (391)	6.8 (173)	6.0 (152)	4.0 (102)	2 (0.9)	105	40
221610	10.2	12	5.5 (140)	15.4 (391)	6.8 (173)	7.3 (185)	5.3 (135)	2 (0.9)	105	40
221613	12.7	15	8.5 (216)	26.0 (660)	10.4 (264)	8.3 (211)	6.3 (160)	2.8 (1.3)	150	60
221615	15.3	18	8.5 (216)	26.0 (660)	10.4 (264)	9.2 (234)	7.2 (183)	2.8 (1.3)	150	60
221617	17	21	8.5 (216)	26.0 (660)	10.4 (264)	9.7 (246)	7.7 (196)	2.8 (1.3)	150	60
221620	19.5	24	10.9 (277)	30.8 (782)	12.0 (305)	11.6 (295)	9.6 (244)	3.0 (1.4)	165	70
221622	22	27	17.2 (437)	52.0 (1321)	18.7 (475)	12.5 (318)	10.5 (267)	4.6 (2.1)	270	105
221624	24.4	30	17.2 (437)	52.0 (1321)	18.7 (475)	13.5 (343)	11.5 (292)	4.6 (2.1)	270	105
221629	29	36	17.2 (437)	52.0 (1321)	18.7 (475)	16.0 (406)	14.0 (356)	4.6 (2.1)	270	105

Anexo XVII. Sistemas trifásicos de a.c con un voltaje nominal superior a 35 Kv.

Voltaje máximo para equipos kV	Voltaje nominal del sistema kV
4,4 <sup>a</sup>	4,16 <sup>a</sup>
7,2 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>
13,97 <sup>b</sup>	13,2 <sup>b</sup>
14,52 <sup>a</sup>	13,8 <sup>a</sup>
24	22
24	22,8
36	33
36,5 <sup>b</sup>	34,5 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Estos valores no deberían ser utilizados para sistemas de distribución públicos nuevos.

<sup>b</sup> Estos valores son generalmente sistemas de cuatro hilos y los valores indicados son voltajes fase-fase. El voltaje fase-neutro es igual al valor indicado dividido por 1,73.

Anexo XVIII. Análisis comparativo de las técnicas de extracción de corrientes resistivas de fuga.

<b>Técnica</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>
Convencional Método	Midiendo y usando la relación en fase del voltaje aplicado y las formas de onda de la corriente de fuga resistiva
Corriente capacitiva	Compensación Método determinando y compensando la componente de corriente capacitiva fundamental derivada de la señal de corriente de fuga total
Tercer Orden Análisis	armónico midiendo y extrayendo el tercer armónico corriente de fuga
Método de sondeo de campo	Extrayendo y compensando el armónico componentes de corriente de fuga capacitiva
Modificado Cambiado Método actual	Inyectar una corriente capacitiva con cambio de fase de 180° a la corriente de fuga medida para extracto
Tiempo mejorado Adición de retraso Método	Midiendo y compensando el armónico componentes de corriente de fuga capacitiva
Mínimos cuadrados Método	Formulación de ecuaciones de fuga en el dominio del tiempo componentes actuales
Lineal Múltiple Método de regresión	Derivación de ecuaciones de fuga en el dominio del tiempo componentes actuales
Algoritmo genético	Midiendo y optimizando el error entre corriente de fuga medida y real
Basado en circuitos Método	Determinando y usando el circuito valores de los elementos del pararrayos ZnO