



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“MODELACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES
UTILIZANDO SOFTWARE ATP”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: JOHN HENRY AVILA ROJAS
MARCO ALEJANDRO TIGRE DELEG

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

CUENCA - ECUADOR
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, John Henry Avila Rojas con documento de identificación N° 030267 0971 y Marco Alejandro Tigre Déleg con documento de identificación N° 0106401540; manifestamos que:

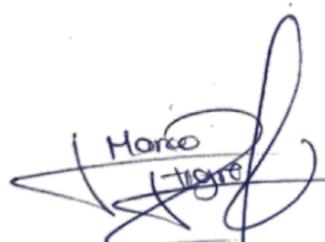
Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 14 de febrero del 2024

Atentamente,



John Henry Avila Rojas
0302670971



Marco Alejandro Tigre Déleg
0106401540

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, John Henry Avila Rojas con documento de identificación N° 030267 0971 y Marco Alejandro Tigre Déleg con documento de identificación N° 0106401540, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Modelación de descargas parciales utilizando software ATP”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 14 de febrero del 2024

Atentamente,



John Henry Avila Rojas
0302670971



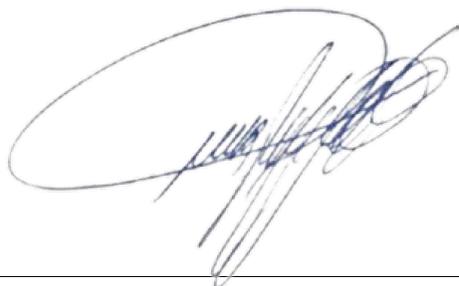
Marco Alejandro Tigre Déleg
0106401540

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “MODELACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES UTILIZANDO SOFTWARE ATP”, realizada por John Henry Avila Rojas con documento de identificación N° 030267 0971 y por Marco Alejandro Tigre Déleg con documento de identificación N° 0106401540, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 14 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque
0102257482

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por la enseñanza en nuestra formación profesional y por la ayuda otorgada que nos permitió realizar este proyecto investigativo dentro del establecimiento y de sus laboratorios.

Agradecemos al ingeniero Flavio Quizhpi por la confianza, motivación y el apoyo brindado para desarrollar el tema de titulación.

Agradecemos a todos nuestros familiares y amigos que siempre estuvieron en los momentos difíciles y que nos apoyaron a seguir adelante para culminar con nuestra tesis.

Cuenca, 14 de febrero del 2024

John Henry Avila Rojas

Marco Alejandro Tigre Deleg

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a Dios quien me dio fuerza y fue mi guía en momentos difíciles, a mis padres Humberto Avila y Nidia Rojas quienes con mucho esfuerzo, sacrificio y amor han sido sido mi pilar incondicional para cumplir mis metas y sueños, a mi tío Jorge Rojas quien siempre estuvo presente con su apoyo y motivación para terminar esta meta, a mis demás familiares y amigos que siempre me han brindado su ayuda, gracias a todos ustedes.

John Henry Avila Rojas

Este trabajo de titulación primeramente lo dedico a DIOS por darme la salud y sabiduría para llegar hasta aquí. También le dedico a mis padres: Ramón y Abelina por haberme apoyado y motivado día a día en los momentos mas duros de la carrera, A mis hermanos María, Francisco, Rocío y Pedro por su apoyo moral y estar a mi lado apoyandome para que no me rindiera.

Esta tesis le dedico de manera especial a mi hija **Sofía Alejandra** y a mi pareja Jessica ya que han sido un motivo fundamental para seguir adelante cumpliendo mis metas propuestas.

Marco Alejandro Tigre Deleg

RESUMEN

El estudio de las descargas parciales dentro de un sistema de potencia permite realizar una evaluación del aislamiento de sus componentes, en la actualidad existen varias maneras de medir, observar o percibir las DP, como también existen variedad de programas que permiten modelar y simular una descarga para analizar su comportamiento. Sin embargo, los programas en su gran mayoría presentan un costo alto para su licencia o en otros casos no permiten crear un análisis completo.

ATP - EMTP es un software que da la posibilidad de modelar elementos de un sistema eléctrico y medir descargas parciales, y siendo su ventaja más notoria que es una herramienta libre y gratuita, internamente el ATP dispone de una amplia gama de elementos dando la posibilidad de simular cualquier sistema propuesto.

En el presente trabajo se realiza los modelos en ATP de algunos aislantes que se disponen en los laboratorios de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca precisamente los aisladores de tipo porcelana, polimérico y aislamiento de un cable subterráneo XLPE. Estos modelos se desarrollarán con el propósito de evaluar las DP directamente en el software ATP.

Como evaluación final la investigación obtendrá una comparativa de las DP, tanto de los valores experimentales del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca como de los modelos obtenidos en la simulación en el software ATP. Para ambos casos se armará y modelará sucesivamente las DP con el circuito de medición de descargas parciales de la normativa IEC 60270.

Palabras clave: Descargas Parciales, Modelado Eléctrico , Corriente, Tipo de Descargas, Aislantes, Porcelana , Polimérico, Conductor XLPE.

ABSTRACT

The study of partial discharges within a power system allows for an evaluation of the insulation of its components. Currently, there are various ways to measure, observe, or detect partial discharges (PD). There is also a variety of software programs available for modeling and simulating a discharge to analyze its behavior. However, the majority of these programs often come with a high licensing cost or, in some cases, do not allow for a comprehensive analysis.

ATP - EMTP is software that provides the capability to model elements of an electrical system and measure partial discharges. Its most notable advantage is that it is a free and open-source tool. Internally, ATP offers a wide range of elements, providing the ability to simulate any proposed system.

In this study, models of some insulators available in the High Voltage laboratories of the Salesian Polytechnic University, Cuenca campus, specifically porcelain, polymeric insulators, and the insulation of an underground XLPE cable, will be created in ATP. These models are developed with the purpose of directly evaluating PD in the ATP software.

As a final evaluation, the research will yield a comparison of the PD values, both from the experimental values in the High Voltage laboratory of the Salesian Polytechnic University, Cuenca campus, and the models obtained through simulation in the ATP software. For both cases, the PD will be assembled and modeled using the partial discharge measurement circuit outlined in IEC 60270 standard.

Keywords: Partial Discharges, Electrical Modeling, Current, Type of Discharges, Insulators, Porcelain, Polymeric, Conductor XLPE.

Índice

AGRADECIMIENTOS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
CAPITULO I	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Problema	1
1.1.1. Antecedentes	2
1.1.2. Importancia y Alcances	2
1.1.2.1. Importancia	2
1.1.2.2. Alcance	3
1.1.3. Delimitación del problema	3
1.1.3.1. Espacial	3
1.1.3.2. Temporal	4
1.1.3.3. Académica	4
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos Generales y Específicos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	6
CAPITULO II	7
2. CONCEPTOS TEÓRICOS	7
2.1. AISLAMIENTOS ELÉCTRICOS	7
2.1.1. Definición	7
2.1.2. Clasificación de Aislamiento Eléctrico	7
2.1.2.1. Aisladores sólidos	7
2.1.2.2. Aisladores líquidos	8
2.1.2.3. Aisladores gaseosos	8
2.1.3. Rigidez Dieléctrica	8
2.1.4. Formas de onda normalizada	9
2.2. DESCARGAS PARCIALES	9

2.2.1.	Definición	9
2.2.2.	Origen del fenómeno de las descargas parciales (DP)	10
2.2.3.	Descargas parciales en sistemas eléctricos	12
2.2.4.	Tipos de descargas Parciales	13
2.2.4.1.	Descargas parciales internas:	13
2.2.4.2.	Descargas parciales externas:	13
2.2.4.3.	Descargas parciales tipo corona:	14
2.2.5.	Descargas parciales en sistemas eléctricos	15
2.2.6.	Efectos de las descargas Parciales	16
2.2.7.	Técnicas de detección y medición de descargas parciales	16
2.2.8.	Unidades de medida de descargas parciales	17
2.3.	MODELACION DE DESCARGAS PARCIALES	17
2.3.1.	Fundamentos de la modelación	17
2.3.2.	Modelos matemáticos para la simulación de descargas parciales	17
2.3.2.1.	Modelo de corriente de pulso:	18
2.3.2.2.	Modelo de elementos finitos:	18
2.3.2.3.	Modelo de circuito equivalente:	18
2.3.2.4.	Modelo de simulación Monte Carlo:	18
2.3.3.	Simulación de descargas parciales en sistemas eléctricos	19
2.3.3.1.	Validación de modelos	19
2.4.	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	19
2.4.1.	Osciloscopio Instek GDS 1102B	20
2.4.2.	Cámara Infrarroja Fluke Ti25	22
2.4.3.	Thermo Recoder TR-73U	23
2.5.	SOFTWARE ATP(ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM)	23
2.5.1.	Definición	23
2.5.2.	Características y componentes principales del software ATP	24
2.5.3.	Procesador gráfico del ATP Draw	25
2.6.	ELEMENTOS DE PRUEBA	25
2.6.1.	Aislante Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5	25
2.6.2.	Aislante de suspensión polimérico ASUS-27	26
2.6.3.	Conductor HTD-3149-15-(XLPE)	26
2.7.	Conceptos Fundamentales	26
2.7.1.	Descargas eléctricas:	26
2.7.2.	Frecuencia de resonancia:	26

2.7.3. Factor de disipación:	26
2.7.4. Impulso eléctrico:	27
2.7.5. Análisis de espectro:	27
2.8. Investigaciones desarrollados referente a Descargas Parciales y ATP	27

CAPITULO III 29

3. GUÍA TÉCNICA DE IMPLEMENTACIÓN PARA EL MODELADO DE DP EN EL SOFTWARE ATP. 29

3.1. Metodología utilizada	29
3.2. Implementación del estándar IEC 60270	30
3.2.1. Circuito para detección de Descargas Parciales	30
3.3. Circuito Equivalente para un Aislante Sólido	31
3.4. Circuito Equivalente para un conductor XLPE	32
3.5. Modelo e implementación de un aislante sólido de Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5	36
3.5.1. Descripción Gráfica	36
3.5.2. Características del aislante de Porcelana PIN ANSI 55-5	36
3.5.3. Modelado ATP del Aislante PIN 55-5 y circuito generador de DP	37
3.5.4. Implementación ATP del modelo del aislante PIN 55-5 en el circuito IEC 60270	38
3.5.5. Implementación experimental de la IEC 60270 con el Aislante de Porcelana tipo PIN ANSI 55-5 en el Laboratorio de Alta Tensión.	39
3.5.6. Validación de resultados experimentales y simulados	40
3.5.7. Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador de porcelana PIN 55-5.	41
3.6. Modelo e implementación para un aislante de suspensión polimérico ASUS-27	43
3.6.1. Descripción Gráfica	43
3.6.2. Características del aislante de suspensión polimérico ASUS-27	43
3.6.3. Modelado del Aislante de suspensión polimérico ASUS-27 y circuito generador de DP.	44
3.6.4. Implementación ATP del modelo del Aislador Polimérico ASUS-27 en el circuito IEC 60270.	45

3.6.5.	Implementación experimental de la IEC 60270 con el Aislador Polimérico ASUS-27 en el Laboratorio de Alta Tensión.	46
3.6.6.	Validación de resultados experimentales y simulados . . .	47
3.6.7.	Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador Polimérico ASUS-27.	48
3.7.	Modelo e implementación para un conductor XLPE Al 750kcmil	50
3.7.1.	Descripción Gráfica	50
3.7.2.	Características del conductor XLPE Al 750kcmil	50
3.7.3.	Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil con circuito generador de DP	51
3.7.4.	Implementación del conductor XLPE Al 750kcmil en el circuito IEC 60270	52
3.7.5.	Implementación experimental de la IEC 60270 con el conductor XLPE Al 750kcmil en el Laboratorio de Alta Tensión.	53
3.7.6.	Validación de resultados experimentales y simulados . . .	54
3.7.7.	Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el conductor XLPE Al 750kcmil.	55
CAPITULO IV		57
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		57
4.1.	CONCLUSIONES	57
4.2.	RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA		60

Glosario

ASUS Aislador de Suspensión Sintético.

ATP Alternative Transients Program.

DP Descargas Parciales.

IEC Comisión Electrotécnica Internacional.

XLPE Polietileno Reticulado.

Índice de figuras

1.	Campo eléctrico en un sistema de aislamiento. Fuente:[1].	12
2.	Descarga parcial interna [2].	13
3.	Descarga parcial externa [2].	14
4.	Patrón resuelto en fase de descarga parcial externa. Fuente: [3].	14
5.	Descarga parcial corona [2].	15
6.	MPD 800 [4].	16
7.	Osciloscopio Digital Instek [5].	21
8.	Cámara Infrarroja Fluke Ti25 [5].	22
9.	Thermo Recorder TR-73U [5].	23
10.	Diagrama de bloques de la implementación metodológica.	29
11.	Circuito Directo propuesto para el análisis de DP en el Laboratorio de Alta Tensión [6].	31
12.	Equivalente Eléctrico para un aislante sólido [7].	32
13.	Circuito de los 3 condensadores de Gemant and Philippoff's para modelar descargas parciales en conductores XLPE [8].	33
14.	Aislante de Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5.	36
15.	Modelado del Aislador PIN 55-5 y circuito generador de DP.	38
16.	Modelado del Aislador PIN 55-5 implementado en la IEC 60270	39
17.	Circuito experimental desarrollado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS para un aislante de porcelana ANSI 55-5.	40
18.	Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador de porcelana PIN 55-5.	42
19.	Aislante de suspensión polimérico ASUS-27	43
20.	Modelado del Aislador de suspensión polimérico ASUS-27 y circuito generador de DP.	45
21.	Modelado del Aislador Polimérico ASUS-27 implementado en la IEC 60270.	46
22.	Circuito experimental desarrollado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS para un aislante polímero ASUS-27.	47
23.	Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador Polimérico ASUS-27.	49
24.	Ilustración gráfica del conductor XLPE.	50
25.	Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil y circuito gene- rador de DP.	52

26.	Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil implementado en la IEC 60270.	53
27.	Circuito armado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS.	54
28.	Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el conductor XLPE Al 750 kcmil.	56

Índice de tablas

1.	Datos para el circuito IEC 60270.	31
2.	Datos generales del Aislante de Porcelana tipo PIN ANSI 55-5	37
3.	Resultados experimentales y simulados del aislante de Porcelana PIN ANSI 55-5.	41
4.	Datos generales del aislante de suspensión polimérico ASUS-27	43
5.	Resultados experimentales y simulados del Aislador Polimérico ASUS-27.	48
6.	Datos generales del Conductor XLPE.	51
7.	Valores Calculados para simular un conductor XLPE.	51
8.	Resultados experimentales y simulados del conductor XLPE. .	55

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

Durante décadas se ha estudiado y analizado las descargas parciales con el objetivo de detectar patrones y prevenir fallas en equipos y aisladores eléctricos. Para ello, se han desarrollado diversas herramientas y métodos que permiten visualizar el comportamiento de las descargas parciales en sistemas eléctricos. Entre estas herramientas, destaca el software ATP (Alternative Transients Program), un programa de simulación ampliamente utilizado en la industria eléctrica para evaluar los estados transitorios en sistemas de potencia y generar gráficas visuales a través de su procesador gráfico ATPDraw. En este estudio en particular, se enfoca en modelar aislantes tipo porcelana, polimérico y del conductor XLPE utilizando software ATP. Una vez obtenidos los modelos de estos elementos, se procede a evaluar el estado de las descargas parciales dentro de una simulación realizada en el mismo software. La señal de salida generada por las descargas parciales en la simulación es comparada con las señales obtenidas en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Con esta información, se desarrollará una guía práctica del uso del software ATP para análisis de descargas parciales [9].

1.1. Problema

A pesar de detectar tempranamente las descargas parciales es crucial para prevenir fallas en los sistemas eléctricos, la detección de estas descargas sigue siendo un desafío en la industria eléctrica. A menudo, las descargas parciales se producen en lugares inaccesibles o en equipos que están en funcionamiento, lo que dificulta su detección temprana y su prevención [10].

Además, la detección de descargas parciales mediante técnicas convencionales, como la medición de corriente y voltaje, puede ser costosa y no siempre es efectiva. Por lo tanto, se requiere de nuevas herramientas y técnicas para detectar tempranamente las descargas parciales.

En este contexto, se plantea como problema la necesidad de desarrollar una herramienta eficiente y efectiva para detectar de forma temprana las des-

cargas parciales en los sistemas eléctricos. En particular, se busca desarrollar modelos de aisladores cerámicos, poliméricos y cables utilizando el software ATP para evaluar el estado de las DP en sistemas eléctricos. Con esta herramienta, se espera mejorar la detección temprana de las DP y prevenir fallas catastróficas en los equipos eléctricos.

1.1.1. Antecedentes

Las descargas parciales son un fenómeno eléctrico que puede ocurrir en sistemas aislados de Alta Tensión. Estas descargas son pequeñas descargas eléctricas que ocurren en la superficie de los aislantes eléctricos y pueden dañar el aislamiento y provocar fallas catastróficas en los equipos. Por lo tanto, la detección temprana de las descargas parciales es crucial para prevenir fallas y prolongar la vida útil de los equipos.

Para detectar las descargas parciales, se han desarrollado diversas técnicas y herramientas. Una de estas herramientas es la modelación de descargas parciales, que permite simular y analizar el comportamiento de los sistemas eléctricos en presencia de estas descargas. En este contexto, el software ATP (Alternative Transients Program) es una herramienta útil para la simulación de sistemas eléctricos y la detección de descargas parciales.

ATP fue desarrollado en los años 60 a partir del software Electromagnetic Transients Program EMTP para simular transitorios eléctricos en sistemas de potencia. En los años 80, se presentó el procesador gráfico ATPDraw, que permitía a los usuarios simular o crear circuitos eléctricos de manera gráfica. Desde entonces, el ATP se ha utilizado ampliamente en la industria eléctrica para simular sistemas eléctricos y detectar descargas parciales.

1.1.2. Importancia y Alcances

1.1.2.1. Importancia

La detección temprana de las DP radica en la prevención de fallas catastróficas en los equipos eléctricos. Las descargas parciales pueden dañar el aislamiento de los equipos y provocar fallas que pueden ser costosas en

términos de tiempo y dinero. Además, las fallas en los equipos eléctricos pueden tener consecuencias graves para la seguridad de las personas y el medio ambiente.

En este contexto, el desarrollo de herramientas eficientes y efectivas para la detección temprana de las descargas parciales es crucial para garantizar la seguridad y la eficiencia de los sistemas eléctricos. La modelación de descargas parciales utilizando el software ATP es una técnica prometedora para la detección temprana de las DP en sistemas eléctricos.

1.1.2.2. Alcance

El alcance de este estudio se centra en el desarrollo de modelos de aisladores cerámicos, poliméricos y cables utilizando el software ATP para evaluar el estado de las descargas parciales en sistemas eléctricos. Se busca validar la precisión de los modelos mediante la comparación de las señales generadas por las descargas parciales en la simulación con las señales obtenidas en el laboratorio de Alta Tensión de la UPS. Con esta herramienta, se espera mejorar la detección temprana de las DP y prevenir fallas en los equipos eléctricos.

1.1.3. Delimitación del problema

La delimitación del problema se centra en el desarrollo de modelos de aisladores cerámicos, poliméricos y cables utilizando el software ATP para la detección de descargas parciales en sistemas eléctricos. El estudio no aborda otros métodos o técnicas para la detección de descargas parciales, ni se enfoca en la detección de otros tipos de fallas en los equipos eléctricos. Además, el estudio se limita a la validación de los modelos mediante la comparación de las señales generadas por las descargas parciales en la simulación con las señales obtenidas en el laboratorio de Alta Tensión de la UPS.

1.1.3.1. Espacial

La delimitación espacial de este estudio se centra en la simulación y validación de modelos de descargas parciales en sistemas eléctricos utilizando el software ATP. La investigación se llevará a cabo en un entorno de laboratorio

de Alta Tensión en la UPS (Universidad Politécnica Salesiana) en Ecuador.

Por lo tanto, la delimitación espacial se limita al entorno de laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y no incluye la aplicación de los modelos desarrollados en otros entornos o sistemas eléctricos.

1.1.3.2. Temporal

La delimitación temporal de este estudio se centra en el uso de información y conocimiento del año 2023. Esto significa que el estudio se basa en la información disponible hasta esa fecha y no incluye desarrollos o avances posteriores en el campo de la detección de descargas parciales o en el software ATP.

Además, la delimitación temporal se limita al período de tiempo en que se lleva a cabo la investigación y la validación de los modelos de descargas parciales utilizando el software ATP en el entorno de laboratorio de Alta Tensión en la UPS.

1.1.3.3. Académica

La delimitación académica en el estudio del software ATP se centra en la modelación de descargas parciales utilizando esta herramienta. El estudio se enfoca en el uso de ATP para desarrollar modelos de aisladores cerámicos, poliméricos y cables para evaluar el estado de las descargas parciales en sistemas eléctricos.

La delimitación académica también se enfoca en la validación de los modelos mediante la comparación de las señales generadas por las descargas parciales en la simulación con las señales obtenidas en el laboratorio de Alta Tensión de la UPS. Este enfoque permite evaluar la precisión de los modelos y su capacidad para detectar descargas parciales en sistemas eléctricos.

Además, la delimitación académica se enfoca en el uso de información y conocimiento del año 2023 y se limita al período de tiempo en que se lleva a cabo la investigación y la validación de los modelos de descargas parciales

utilizando el software ATP en el entorno de laboratorio de Alta Tensión en la UPS.

1.2. Justificación

La detección temprana de las DP en sistemas eléctricos es un aspecto crítico para garantizar la seguridad y la confiabilidad del suministro eléctrico. Las descargas parciales son una señal temprana de fallas incipientes en los equipos eléctricos, lo que permite a los operadores de los sistemas eléctricos tomar medidas preventivas antes de que ocurran fallas mayores.

El software ATP es una herramienta ampliamente utilizada para la simulación de sistemas eléctricos y la evaluación del comportamiento de los equipos eléctricos. La modelación de descargas parciales utilizando el software ATP permite evaluar el estado de los equipos eléctricos y detectar fallas incipientes de manera temprana.

Por lo tanto, la justificación de este estudio radica en la necesidad de desarrollar un modelo eficiente y efectivo para la evaluación del estado de los equipos eléctricos mediante la modelación de descargas parciales utilizando el software ATP. Este modelo permitirá a los operadores de los sistemas eléctricos tomar medidas preventivas tempranas y mejorar la seguridad y la confiabilidad del suministro eléctrico. Además, el estudio contribuirá al conocimiento y la comprensión de la detección temprana de las descargas parciales en sistemas eléctricos y su relación con el software ATP.

1.3. Objetivos Generales y Específicos

1.3.1. Objetivo General

- Desarrollar un modelo en ATP que permita analizar el comportamiento de descargas parciales.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el software ATP y sus aplicaciones.

- Modelar diferentes condiciones de descargas parciales en el software ATP.

- Implementar una guía técnica que permita modelar descargas parciales en el software ATP.

CAPITULO II

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1. AISLAMIENTOS ELÉCTRICOS

2.1.1. Definición

El aislamiento eléctrico es un sistema que se utiliza para proteger a las personas y los equipos eléctricos de descargas eléctricas. Este sistema se compone de materiales y dispositivos aislantes que evitan la transferencia de corriente eléctrica entre conductores. Los materiales aislantes pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, y estos elementos son empleados en diversos tipos de programas y usos, desde equipos electrónicos hasta líneas de transmisión de energía eléctrica. Además, los dispositivos aislantes, como los transformadores y los interruptores, se utilizan para separar y aislar los conductores eléctricos. [11].

También consiste en el uso de materiales aislantes que impiden el flujo de corriente eléctrica a través de ellos, evitando así que se produzcan daños en los circuitos eléctricos y reduciendo el riesgo de accidentes eléctricos [12].

2.1.2. Clasificación de Aislamiento Eléctrico

2.1.2.1. Aisladores sólidos

Los aisladores sólidos son dispositivos utilizados en sistemas eléctricos para separar conductores eléctricos y evitar la transferencia de corriente eléctrica entre ellos. Estos aisladores están diseñados para soportar altas tensiones eléctricas sin permitir que la corriente fluya a través de ellos. Los aisladores sólidos se fabrican generalmente a partir de materiales dieléctricos, como la cerámica, el vidrio o el plástico, que tienen una alta resistencia eléctrica. Estos materiales también tienen propiedades aislantes que impiden la transferencia de calor y electricidad. Los aisladores sólidos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde líneas de transmisión de energía eléctrica hasta equipos electrónicos. Son esenciales para garantizar la seguridad de las personas y la integridad de los equipos eléctricos [13].

2.1.2.2. Aisladores líquidos

Los aisladores líquidos son sustancias dieléctricas que se utilizan en sistemas eléctricos para separar y aislar conductores eléctricos. Estos aisladores líquidos se utilizan en equipos eléctricos de alta tensión, como transformadores y capacitores. Los aisladores líquidos tienen una alta resistencia eléctrica y se utilizan para evitar la transferencia de corriente eléctrica entre los conductores. Estos líquidos también tienen propiedades aislantes que impiden la transferencia de calor y electricidad.

Los aisladores líquidos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde la refrigeración de equipos electrónicos hasta la protección de cables de alta tensión. Son esenciales para garantizar la seguridad de las personas y la integridad de los equipos eléctricos [13].

2.1.2.3. Aisladores gaseosos

Los aisladores gaseosos son sustancias dieléctricas que se utilizan en sistemas eléctricos para separar y aislar conductores eléctricos. Estos aisladores gaseosos se utilizan en equipos eléctricos de alta tensión, como interruptores y transformadores. Los aisladores gaseosos tienen una alta resistencia eléctrica y se utilizan para evitar la transferencia de corriente eléctrica entre los conductores. Estos gases también tienen propiedades aislantes que impiden la transferencia de calor y electricidad [13].

Los aisladores gaseosos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde la protección de equipos electrónicos hasta la protección de cables de alta tensión. Son esenciales para garantizar la seguridad de las personas y la integridad de los equipos eléctricos.

2.1.3. Rigidez Dieléctrica

La rigidez dieléctrica es la capacidad de un material aislante para soportar una diferencia de potencial eléctrico sin experimentar una ruptura eléctrica. Esta propiedad se mide en voltios por unidad de distancia y se utiliza para determinar la capacidad de un material aislante para soportar altas tensiones eléctricas. Las DP son pequeñas descargas eléctricas que se GENERAN en

el aislamiento eléctrico y que pueden debilitar su integridad con el tiempo. Estas descargas son causadas por la presencia de pequeñas burbujas de aire o impurezas en el aislamiento, y pueden ser detectadas mediante pruebas de descargas parciales.

Es importante realizar pruebas de rigidez dieléctrica en los materiales aislantes para garantizar que puedan soportar las tensiones eléctricas esperadas en su aplicación. Además, las pruebas de descargas parciales pueden ayudar a detectar cualquier problema en el aislamiento antes de que se produzcan fallas en el sistema [14].

2.1.4. Formas de onda normalizada

Las formas de onda normalizadas son representaciones estandarizadas de la forma en que varía la tensión o corriente eléctrica en un circuito eléctrico. Estas formas de onda normalizadas se utilizan para comparar y analizar señales eléctricas en diferentes aplicaciones, y se han establecido estándares internacionales para su uso. Las formas de onda normalizadas más comunes son la onda sinusoidal, la onda cuadrada y la onda triangular. La onda sinusoidal es una forma de onda suave y continua que se utiliza en sistemas de energía eléctrica de CA. La onda cuadrada es una forma de onda con una transición rápida entre dos niveles de voltaje y se utiliza en sistemas digitales. La onda triangular es una forma de onda con una transición lineal entre dos niveles de voltaje y se utiliza en aplicaciones como la generación de señales de audio. Las formas de onda normalizadas son importantes porque permiten a los ingenieros y técnicos eléctricos analizar y comparar señales eléctricas en diferentes aplicaciones. Además, el uso de formas de onda normalizada ayuda a asegurar la compatibilidad y la interoperabilidad de los sistemas eléctricos [15].

2.2. DESCARGAS PARCIALES

2.2.1. Definición

La norma IEC 60270 define a una descarga parcial como:

Es una descarga eléctrica localizada que actúa parcialmente como un puente entre el aislante y los conductores, por ende puede ser o no adyacente a un conductor y puede causar daños irreparable en los sistemas de aislamiento líquidos y sólidos [6].

Las descargas parciales son pequeñas descargas eléctricas que se producen en el aislamiento eléctrico y que pueden dañarlo con el tiempo. Estas descargas son causadas por la presencia de pequeñas burbujas de aire o impurezas en el aislamiento, y pueden debilitar la integridad del material aislante. Es importante realizar pruebas de descargas parciales en los sistemas de aislamiento eléctrico para detectar cualquier problema antes de que se produzcan fallas en el sistema. Las pruebas de descargas parciales se realizan utilizando equipos especializados y pueden ayudar a prevenir problemas costosos y peligrosos en los sistemas eléctricos [11].

2.2.2. Origen del fenómeno de las descargas parciales (DP)

Se encuentra en la presencia de campos eléctricos de alta intensidad en los dieléctricos. Cuando un dieléctrico se somete a un campo eléctrico de alta intensidad, se produce una ionización localizada en la región del campo eléctrico, lo que da lugar a una DP [16].

Esta ionización se produce debido a la ruptura de los enlaces moleculares del dieléctrico, lo que libera electrones e iones en la región del campo eléctrico. Estos electrones e iones pueden moverse a través del dieléctrico y generar un flujo de corriente, lo que produce una señal eléctrica que se puede medir [17].

Las DP pueden ser detectadas utilizando diferentes técnicas, como la medición de corriente y voltaje, la medición de ondas electromagnéticas y la medición de ultrasonidos. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, y su elección depende del tipo de equipo eléctrico y del entorno en el que se encuentra [18].

La detección temprana de las DP es importante para garantizar la seguridad y la confiabilidad del suministro eléctrico. Las DP son una señal temprana de fallas incipientes en los equipos eléctricos, lo que permite a los

operadores de los sistemas eléctricos tomar medidas preventivas antes de que ocurran fallas mayores [19].

La modelación de las DP utilizando software ATP es una técnica que permite simular el comportamiento de los equipos eléctricos ante la presencia de DP. Esta técnica se basa en la utilización de modelos matemáticos que representan los diferentes componentes del sistema eléctrico. La validación de estos modelos es crítica para evaluar su precisión y capacidad para detectar DP en sistemas eléctricos [20].

El aislamiento es un componente crítico en los sistemas eléctricos, ya que su función principal es evitar el contacto directo entre los conductores y la tierra o entre conductores de diferentes niveles de voltaje. Sin embargo, el aislamiento puede fallar debido a diferentes factores, como la exposición a esfuerzos mecánicos, cambios térmicos o el envejecimiento natural del material aislante [20].

Por esta razón, es fundamental analizar las descargas parciales para poder determinar la condición actual y la vida útil restante del aislamiento. Las descargas parciales son una señal temprana de fallas incipientes en el aislamiento y pueden ser detectadas mediante diferentes técnicas. La detección temprana de las descargas parciales permite a los operadores de los sistemas eléctricos tomar medidas preventivas antes de que ocurran fallas mayores en el aislamiento [20].

El análisis de las descargas parciales permite evaluar la condición del aislamiento y determinar si es necesario realizar mantenimiento o reemplazarlo. Además, la información obtenida del análisis de las descargas parciales puede ser utilizada para mejorar el diseño y la selección del material aislante en futuros proyectos de sistemas eléctricos [20].

En la Figura 1 se observa el modelo básico de un sistema de aislamiento, el cual se puede comparar con un condensador. Al aplicar una tensión, se genera un campo eléctrico (E_a) que se distribuye de manera uniforme en todo el aislante. Sin embargo, también se produce otro campo eléctrico (E_c) debido a la presencia de dos dieléctricos con diferentes constantes de permeabilidad.

En otras palabras, cuando el campo eléctrico (E_c) aumenta, puede produ-

cirse la ruptura de la rigidez dieléctrica, lo que se conoce como el fenómeno de descargas parciales. Este fenómeno puede ser detectado y medido mediante diferentes técnicas y es una señal temprana de fallas incipientes en el aislamiento.

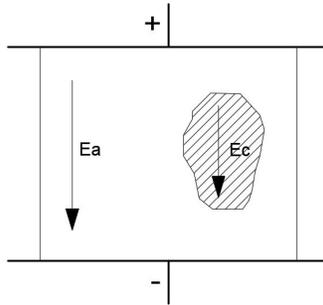


Figura 1: Campo eléctrico en un sistema de aislamiento. Fuente:[1].

2.2.3. Descargas parciales en sistemas eléctricos

La presencia de descargas parciales está influenciada por varios factores, como el voltaje presente en la cavidad donde se forman, la resistencia que debe superarse para que ocurra la descarga y la carga residual resultante de descargas previas. Además, el voltaje de la cavidad depende de su geometría [3].

En términos generales, existen tres tipos de descargas que pueden clasificarse de acuerdo a su ubicación, el medio que se encuentra entre los electrodos y su forma geométrica. Para distinguir cada tipo de descarga, se utilizan patrones resueltos en la fase de descarga parcial (PRPD), los cuales son diferentes para cada tipo y muestran la cantidad de descargas que se superponen a la tensión de red. [3].

La presencia de estas descargas puede indicar que el equipo eléctrico está presentando fallas en su funcionamiento y existen diversas técnicas para detectarlas.

2.2.4. Tipos de descargas Parciales

Existen diferentes tipos, a continuación se detallan los más comunes:

2.2.4.1. Descargas parciales internas:

Son un evento eléctrico que se presenta en un sistema de alta tensión, tales como transformadores y cables de alta tensión. Las descargas de este tipo surgen en las cavidades gaseosas que se encuentran en el interior del material aislante o entre el aislante y un electrodo. Estas cavidades pueden aparecer durante la producción debido a defectos que producen burbujas de gas. [3].

La descarga parcial libera una cantidad reducida de energía eléctrica que puede causar erosión en las cavidades ya existentes. Este efecto, junto con el aumento de temperatura en la zona donde se produce la descarga, puede fundir ciertos materiales o generar reacciones químicas. Todo esto conduce al deterioro del aislamiento y al agrandamiento del hueco, lo que disminuye la superficie activa del aislamiento y puede resultar en su ruptura. [3].

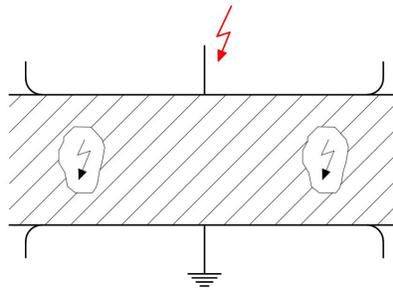


Figura 2: Descarga parcial interna [2].

2.2.4.2. Descargas parciales externas:

Se generan por la ionización del aire entre los electrodos, y se conocen como efecto corona cuando solo se presentan en el medio gaseoso, generalmente en el aire. Aunque las descargas parciales no son la causa directa del deterioro del sistema aislante, su presencia puede ocultar la existencia de

otro tipo de descargas. Las consecuencias de las descargas parciales externas pueden incluir la pérdida de potencia activa, interferencias radioeléctricas y la corrosión de los conductores. [21].

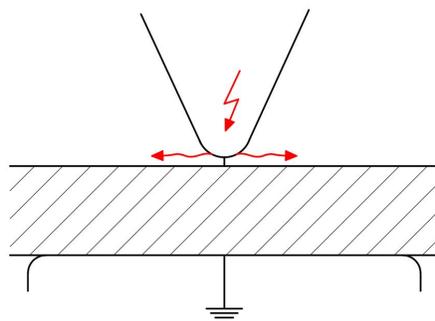


Figura 3: Descarga parcial externa [2].

La Figura 4 muestra el modelo resuelto en la fase de descarga parcial externa, que muestra cómo estas se agrupan en el semi-ciclo negativo de la frecuencia de la red.

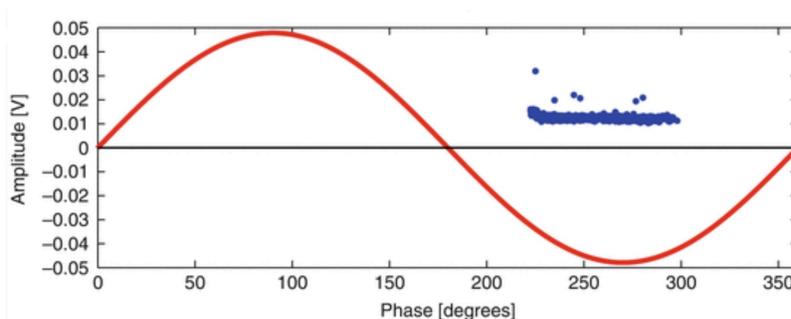


Figura 4: Patrón resuelto en fase de descarga parcial externa. Fuente: [3].

2.2.4.3. Descargas parciales tipo corona:

Son aquellas que se producen en los conductores eléctricos de alta tensión debido al efecto corona. Este fenómeno ocurre cuando la diferencia de potencial entre los conductores es lo bastante elevada como para ionizar el

aire que los rodea y generar descargas eléctricas. Ocurren en zonas metálicas aisladas sometidas a tensión, especialmente en los conductores de líneas de alta tensión. Estas descargas se manifiestan como halos luminosos alrededor del conductor, que toman la forma de una corona debido a la sección circular del conductor. También pueden ocurrir en equipos eléctricos en aire o dieléctricos líquidos bajo un fuerte campo eléctrico. A diferencia de otras descargas eléctricas, las descargas parciales corona no dependen de la distancia entre los electrodos, y pueden ocurrir tanto cerca del suelo como a varios metros de altura. [21].

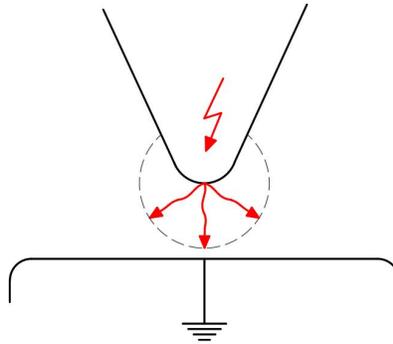


Figura 5: Descarga parcial corona [2].

Es importante identificar el tipo de descarga parcial que se está produciendo para poder aplicar las técnicas de detección y medición adecuadas y así poder evitar daños en los equipos eléctricos y garantizar su correcto funcionamiento [1].

Entre estos tipos de descargas parciales, las internas son las más problemáticas ya que se presentan en áreas vulnerables del material, mientras que en los otros tipos de DP se extienden por una superficie mayor del dieléctrico.

2.2.5. Descargas parciales en sistemas eléctricos

La presencia de descargas parciales está influenciada por varios factores, como el voltaje presente en la cavidad donde se forman, la resistencia que debe superarse para que ocurra la descarga y la carga residual resultante de descargas previas. Además, el voltaje de la cavidad depende de su geome-

tría [3].

En términos generales, existen tres tipos de descargas que pueden clasificarse de acuerdo a su ubicación, el medio que se encuentra entre los electrodos y su forma geométrica. Para distinguir cada tipo de descarga, se utilizan patrones resueltos en la fase de descarga parcial (PRPD), los cuales son diferentes para cada tipo y muestran la cantidad de descargas que se superponen a la tensión de red. [3].

2.2.6. Efectos de las descargas Parciales

Los efectos de las descargas parciales pueden incluir la degradación del aislamiento, la reducción de la vida útil de los componentes, la generación de interferencias electromagnéticas y otros problemas que comprometan la seguridad y el rendimiento del sistema [10].

2.2.7. Técnicas de detección y medición de descargas parciales

Existen diferentes técnicas para la detección de descargas parciales, como la medición de corriente y voltaje, la medición de ondas electromagnéticas y la medición de ultrasonidos. Cada técnica tiene sus ventajas y desventajas, y su elección depende del tipo de equipo eléctrico y del entorno en el que se encuentra [4].



Figura 6: MPD 800 [4].

2.2.8. Unidades de medida de descargas parciales

Se utilizan las siguientes unidades para la medición de la magnitud de las descargas parciales:

- MiliAmperios (mA): Se utiliza cuando se realizan las medidas mediante transformadores de corriente.
- Decibelios (dBm): Se utiliza en analizadores de espectros.
- MiliVoltios (mV): Se utiliza en la medición en componentes inductivos.
- PicoCulombios (pC): Utilizada en laboratorios se aplica en objetos capacitivos [22].

2.3. MODELACION DE DESCARGAS PARCIALES

La modelación de descargas parciales es una técnica que permite simular el comportamiento de los equipos eléctricos ante la presencia de descargas parciales. Esta técnica se basa en la utilización de modelos matemáticos que representan los diferentes componentes del sistema eléctrico [23].

2.3.1. Fundamentos de la modelación

La modelación de descargas parciales se basa en la comprensión de los procesos físicos y eléctricos que ocurren en el interior de los materiales aislantes cuando se producen descargas parciales. Los fundamentos de la modelación de descargas parciales incluyen la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas, la teoría de la ionización en gases, la teoría del campo eléctrico y la termodinámica. Estos fundamentos permiten desarrollar modelos matemáticos y simulaciones computacionales que permiten predecir y analizar el comportamiento de las descargas parciales en diferentes sistemas eléctricos y electrónicos [18].

2.3.2. Modelos matemáticos para la simulación de descargas parciales

Los modelos matemáticos para la simulación de descargas parciales se basan en la teoría de los campos electromagnéticos, la teoría de la ionización en

gases y la termodinámica. Estos modelos permiten simular el comportamiento de las descargas parciales en diferentes sistemas eléctricos y electrónicos, lo que puede ser útil para predecir posibles fallas y mejorar la seguridad y el rendimiento de los sistemas [24].

Existen varios modelos matemáticos que se pueden utilizar para simular las descargas parciales en componentes cerámicos. Algunos de los modelos más comunes son:

2.3.2.1. Modelo de corriente de pulso:

Este modelo se utiliza para simular la descarga parcial en un componente cerámico bajo un campo eléctrico. El modelo se basa en la teoría de la corriente de pulso y tiene en cuenta factores como la geometría del electrodo, la resistividad del material y la tasa de ionización y recombinación del gas [25].

2.3.2.2. Modelo de elementos finitos:

Este modelo se utiliza para simular la distribución del campo eléctrico y la densidad de carga en un componente cerámico. El modelo se basa en la discretización del material en pequeños elementos y tiene en cuenta factores como la geometría del componente, las propiedades eléctricas y mecánicas del material y las condiciones de borde [26].

2.3.2.3. Modelo de circuito equivalente:

Este modelo se utiliza para simular el comportamiento eléctrico de un componente cerámico bajo diferentes condiciones de operación. El modelo se basa en la representación del componente como un circuito eléctrico equivalente y tiene en cuenta factores como la capacitancia, la resistencia y la inductancia del componente [26].

2.3.2.4. Modelo de simulación Monte Carlo:

Este modelo se utiliza para simular la propagación de electrones a través de un material cerámico bajo un campo eléctrico. El modelo se basa en el

método de simulación Monte Carlo y tiene en cuenta factores como la energía de los electrones, las colisiones con los átomos del material y la tasa de ionización y recombinación del gas [26].

Estos son solo algunos ejemplos de modelos matemáticos que se pueden utilizar para simular las descargas parciales en componentes cerámicos. La elección del modelo dependerá de las propiedades específicas del material y del tipo de comportamiento que se desea analizar.

2.3.3. Simulación de descargas parciales en sistemas eléctricos

La simulación de descargas parciales en sistemas eléctricos es una técnica utilizada para estudiar el comportamiento de los sistemas eléctricos ante la presencia de DP. La simulación de descargas parciales permite identificar posibles puntos de falla en el sistema, lo que a su vez permite tomar medidas preventivas para evitar posibles interrupciones en el suministro eléctrico.

La simulación se realiza mediante el uso de modelos matemáticos y herramientas de simulación computacional, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios y condiciones operativas [23].

2.3.3.1. Validación de modelos

La validación de modelos es un proceso crítico en la modelación de descargas parciales utilizando software ATP. La validación se realiza mediante la comparación de las señales generadas por las descargas parciales en la simulación con las señales obtenidas en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, lo que permite evaluar la precisión del modelo y su capacidad para detectar descargas parciales en sistemas eléctricos.

2.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Los instrumentos de medición utilizados en las descargas parciales son herramientas específicas diseñadas para detectar y medir las descargas parciales en equipos eléctricos. Estos instrumentos son esenciales para la monitorización y el mantenimiento preventivo de los equipos eléctricos, ya que permiten

detectar problemas en el aislamiento antes de que se produzcan fallas en el equipo o riesgos de seguridad [27]. Los instrumentos de medición para descargas parciales pueden ser de diferentes tipos, como, por ejemplo:

- Detectores de descargas parciales: son dispositivos que se utilizan para detectar la presencia de descargas parciales en el aislamiento de los equipos eléctricos. Estos detectores pueden ser portátiles o fijos y se colocan cerca del equipo para realizar mediciones. [27]
- Analizadores de espectro: son instrumentos que se utilizan para analizar la señal generada por las descargas parciales. Estos instrumentos permiten identificar la frecuencia y la amplitud de las señales, lo que puede ayudar a determinar la ubicación y la magnitud de las descargas parciales. [27]
- Sistemas de monitoreo continuo: son sistemas que se utilizan para monitorear continuamente la presencia de descargas parciales en los equipos eléctricos. Estos sistemas pueden incluir detectores de descargas parciales y analizadores de espectro, así como sistemas de adquisición de datos y software de análisis. [27]

2.4.1. Osciloscopio Instek GDS 1102B

El osciloscopio Instek GDS 1102B es un equipo de medición electrónico utilizado para visualizar y analizar señales eléctricas. A continuación, se describen algunas de sus características principales:

- Cuenta con dos canales de entrada para medir señales de hasta 100 MHz de ancho de banda.
- La tasa de prueba en tiempo real es de 1 GSa/s, lo que permite captar señales de alta frecuencia con precisión.
- La profundidad de memoria es de 10 kpts por canal, lo que permite almacenar y analizar señales complejas con detalle.

- La pantalla LCD es de 5,7 pulgadas y cuenta con una resolución de 320x240 píxeles, lo que permite claramente visualizar la forma de onda y los detalles de la señal.
- Dispone de diversas funciones de medición y análisis, como la medición automática de parámetros, la función FFT y la posibilidad de realizar pruebas de máscara.
- Además, cuenta con puertos USB y LAN para conectividad y posibilidad de almacenamiento externo [28].



Figura 7: Osciloscopio Digital Instek [5].

2.4.2. Cámara Infrarroja Fluke Ti25

La cámara infrarroja Fluke Ti25 es un equipo que se utiliza para medir la radiación térmica que emiten los objetos, mediante la tecnología infrarroja. Es un dispositivo preciso y de alta calidad que se utiliza en diferentes áreas, como la inspección de edificios y la detección de problemas eléctricos y mecánicos [29].



Figura 8: Cámara Infrarroja Fluke Ti25 [5].

2.4.3. Thermo Recorder TR-73U

El Thermo Recorder TR-73U es un dispositivo que se utiliza para medir y registrar la temperatura en diferentes entornos. Es un equipo portátil y sencillo de utilizar, que se aplica en diferentes campos, como la monitorización de la temperatura en instalaciones de refrigeración y aire acondicionado, el control de calidad en la industria alimentaria y farmacéutica, y en la investigación y el desarrollo [30].

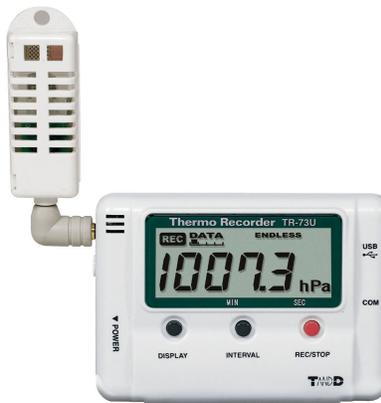


Figura 9: Thermo Recorder TR-73U [5].

2.5. SOFTWARE ATP (ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM)

2.5.1. Definición

El software ATP Draw es una herramienta de software que se utiliza para diseñar y simular sistemas eléctricos de alta tensión. Esta herramienta permite a los ingenieros eléctricos crear y analizar modelos de sistemas eléctricos complejos, y simular el comportamiento de estos sistemas en diferentes escenarios. El software ATP Draw utiliza una interfaz gráfica de usuario para permitir a los usuarios crear y editar modelos de sistemas eléctricos. Los usuarios pueden agregar componentes eléctricos, como transformadores, interruptores y líneas de transmisión, y conectarlos para formar un modelo completo del sistema [31].

2.5.2. Características y componentes principales del software ATP

El software ATP es una herramienta de simulación de sistemas eléctricos que posee varias características y componentes principales. Entre las características principales del software ATP se encuentran su capacidad para simular transitorios electromagnéticos, su capacidad para modelar sistemas eléctricos complejos, su capacidad para simular la propagación de ondas electromagnéticas y su capacidad para analizar la respuesta transitoria de los sistemas de energía eléctrica. Los componentes principales del software ATP incluyen el editor de modelos, el simulador y el postprocesador. El editor de modelos permite a los usuarios crear y editar modelos de sistemas eléctricos complejos. El simulador permite a los usuarios simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, como fallas eléctricas y fluctuaciones de voltaje. El postprocesador permite a los usuarios analizar los resultados de la simulación y visualizar los datos en diferentes formatos, como gráficos y tablas. El software ATP es una herramienta importante para los ingenieros eléctricos porque les permite diseñar y simular sistemas eléctricos complejos de manera precisa y eficiente. Además, el uso del software ATP puede mejorar la seguridad y la confiabilidad de los sistemas eléctricos al permitir a los ingenieros evaluar el comportamiento del sistema en diferentes escenarios [32].

El Software ATP es una herramienta de simulación de sistemas eléctricos que permite a los ingenieros eléctricos analizar y diseñar sistemas complejos.

Las funciones principales del software ATP son:

- Simulación de transitorios electromagnéticos:
permite a los ingenieros analizar el comportamiento de los sistemas eléctricos en diferentes situaciones, como fallas eléctricas y fluctuaciones de voltaje [33].

- Simulación de la respuesta transitoria de los sistemas de energía eléctrica:
permite a los ingenieros evaluar la estabilidad y la capacidad de los sistemas para manejar cargas eléctricas variables [33].

- Simulación de la propagación de ondas electromagnéticas:

permite a los ingenieros analizar el comportamiento de las señales eléctricas en diferentes entornos, como líneas de transmisión y antenas [33].

2.5.3. Procesador gráfico del ATP Draw

El procesador gráfico del ATP Draw es una parte importante de la herramienta de software que permite a los usuarios crear y editar modelos de sistemas eléctricos complejos. El procesador gráfico utiliza una interfaz gráfica de usuario (GUI) para permitir a los usuarios crear modelos de sistemas eléctricos de alta tensión de manera intuitiva y eficiente. El procesador gráfico del ATP Draw incluye una variedad de herramientas y funciones que permiten a los usuarios agregar componentes eléctricos, como transformadores, interruptores y líneas de transmisión, y conectarlos para formar un modelo completo del sistema. Los usuarios también pueden personalizar la apariencia y la configuración del modelo utilizando las herramientas de edición de la GUI [28].

Además, el procesador gráfico del ATP Draw permite a los usuarios simular el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, como fallas eléctricas y fluctuaciones de voltaje. Esto permite a los ingenieros eléctricos evaluar la capacidad del sistema para manejar estas situaciones y mejorar la seguridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos.

2.6. ELEMENTOS DE PRUEBA

2.6.1. Aislante Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5

El aislador cerámico Tipo PIN ANSI 55-5 es un componente que se emplea en sistemas eléctricos de alta tensión para separar y aislar conductores. Este tipo de consumo se caracteriza por su gran resistencia dieléctrica, lo que le permite soportar altos voltajes y corrientes. Asimismo, es resistente a las condiciones climáticas adversas ya la corrosión, lo que lo hace apropiado para su uso en diferentes entornos [34].

2.6.2. Aislante de suspensión polimérico ASUS-27

El aislante de suspensión tipo polimérico es un componente que se utiliza en sistemas de distribución de energía eléctrica para separar y aislar conductores eléctricos. Este tipo de consumo se destaca por su gran resistencia mecánica y eléctrica, lo que le permite soportar cargas de trabajo pesadas y altas tensiones. Además, es resistente a las condiciones climáticas adversas ya la corrosión, lo que lo hace adecuado para su uso en diferentes entornos [35].

2.6.3. Conductor HTD-3149-15-(XLPE)

El conductor HTD-3149-15-(XLPE) es un cable que se utiliza en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica de alta y media tensión. Este tipo de conductor tiene un aislamiento especial de polietileno reticulado (XLPE), lo que le permite soportar altas tensiones y temperaturas. Además, su diseño y construcción le permiten tener una mayor capacidad de transmisión de energía eléctrica [36].

2.7. Conceptos Fundamentales

2.7.1. Descargas eléctricas:

Las descargas eléctricas son fenómenos que ocurren cuando hay una acumulación de carga eléctrica en un material aislante y esta carga se libera repentinamente en forma de chispas o arcos eléctricos.

2.7.2. Frecuencia de resonancia:

Es la frecuencia a la cual un sistema vibra o resuena con mayor amplitud. En el caso de las descargas parciales, se refiere a la frecuencia a la cual se produce la mayor cantidad de descargas parciales.

2.7.3. Factor de disipación:

Es una medida de la eficiencia del aislamiento eléctrico. Indica la cantidad de energía que se pierde en forma de calor durante el proceso de carga y descarga del aislamiento.

2.7.4. Impulso eléctrico:

Un impulso eléctrico es una señal eléctrica de corta duración y alta energía que se utiliza para evaluar la resistencia del aislamiento eléctrico.

2.7.5. Análisis de espectro:

El análisis de espectro es una técnica que se utiliza para descomponer una señal eléctrica en sus componentes de frecuencia. En el caso de las descargas parciales, el análisis de espectro se utiliza para identificar las frecuencias a las cuales se producen las descargas parciales.

2.8. Investigaciones desarrollados referente a Descargas Parciales y ATP

Adrián Coronel, Joffre Chalco [37], realizan un trabajo de investigación en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, donde se evalúan el comportamiento de las DP utilizando sensores de emisión acústica en un dieléctrico de porcelana 55-5. Para visualizar las descargas en el elemento de prueba los autores inducen voltajes superiores al voltaje de tensión máxima soportada por el aislante obteniendo de esa manera la visualización de las DP, con varias pruebas realizadas obtienen una base de datos que serán tratados y moldeados en matlab a fin de ver los patrones de las descargas.

Luis Mizquero, Henry Arias [38] determinaron las características presentes en un aislamiento en un poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V) dicha investigación la realizan con ayuda del Laboratorio de Alta Tensión de Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, donde realizaron varias pruebas a este elemento aislante una de ellas un impulso tipo rayo a fin de evidenciar el voltaje de ruptura , las corrientes de fuga y BIL propias de las caracteritfas del material.

Zaida Cotto [39], analiza los sistemas aislantes utilizados en la red eléctrica de distribución con la finalidad de ver los comportamientos de estos elementos, para tener validación en su investigación la autora utiliza el software ATP donde modela eléctricamente varios aislantes, entre ellos, materiales de porcelana y poliméricos mismos que serán expuestos a simulaciones de im-

pulsos eléctricos como flameo o tipo rayo.

Mateo Quizphi, Xavier Gomez [40], plantean un método para la medición y clasificación de DP, mismo que se obtienen los datos de la señal de Carga eléctrica ocasionados por DP sobre elementos aislantes para este caso el dieléctrico tipo PIN, para llevar a cabo este análisis los autores hacen uso del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Cuenca donde llevan a cabo varios ensayos a fin de obtener una base de datos solida y a fin de lograr su objetivo los autores utilizan algoritmos basados en redes neuronales que les permite seleccionar y clasificar las DP.

Diego Gomez , Juan Gualpa [41], estudian el efecto corona generada por las líneas de distribución presentes en los sistemas eléctricos de potencia, por ello plantean un método de medición de temperatura y efecto térmico producido por el efecto corona en los aislantes para llevar a cabo el desarrollo de la investigación los autores realizan pruebas experimentales dentro de los laboratorios de alta tensión de la UPS sede Cuenca, donde comprometen un elemento de prueba y inducen voltajes muy superiores al voltaje nominal del material hasta observar su comportamiento térmico y con ello evidenciar la presencia de las DP.

Mario Frias, Johnny Sanchez [42], determinan las características dieléctricas en crucetas de poliéster reforzado en diferentes condiciones ambientales, bajo ensayos realizados en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca y bajo la normativa IEC 60270 los autores aplican impulsos tipo rayo a las crucetas en condiciones de seco y húmedo , una vez obtenidos la base de datos en estas condiciones se realiza una comparativa entre si para determinar sus resultados de ruptura dieléctrica.

CAPITULO III

3. GUÍA TÉCNICA DE IMPLEMENTACIÓN PARA EL MODELADO DE DP EN EL SOFTWARE ATP.

3.1. Metodología utilizada

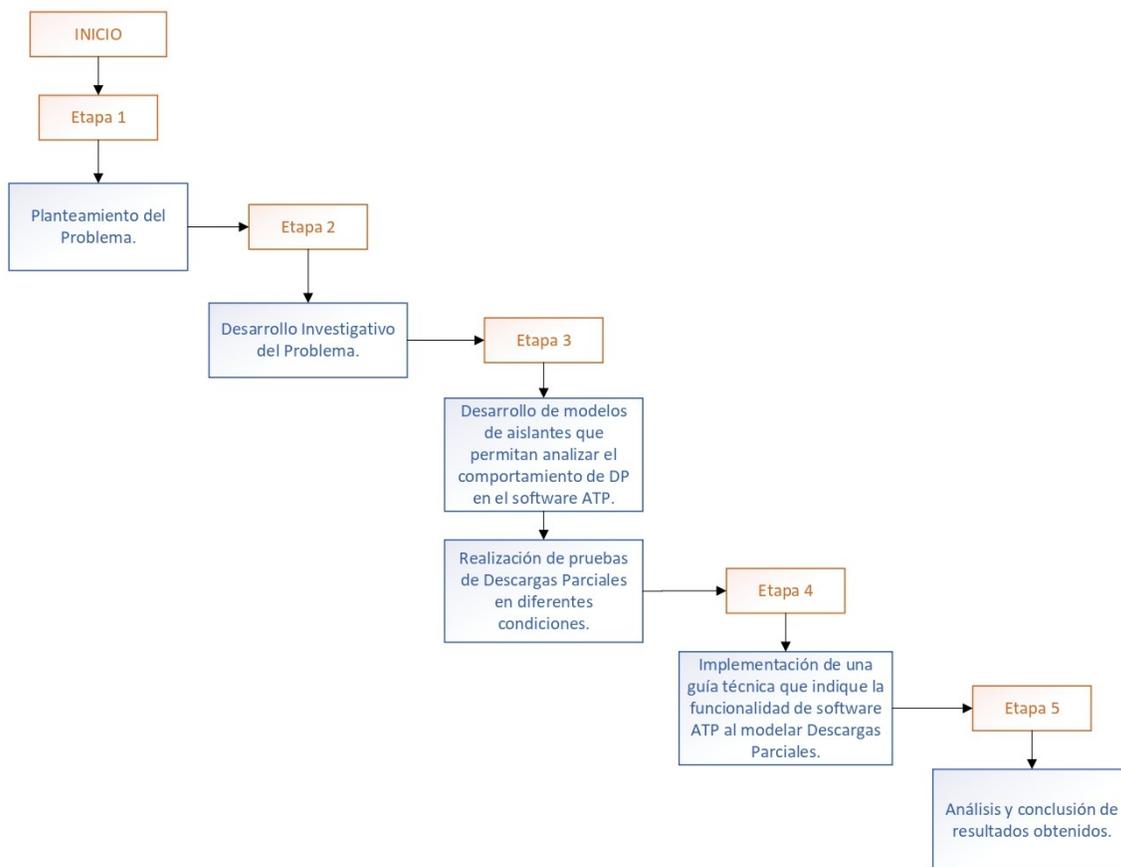


Figura 10: Diagrama de bloques de la implementación metodológica.

3.2. Implementación del estándar IEC 60270

La normativa IEC 60270 es un estándar internacional que establece los procedimientos y métodos para la medición de la respuesta dieléctrica de los materiales aislantes utilizados en los sistemas eléctricos de alta tensión. En otras palabras, la normativa IEC 60270 establece las pautas para medir la capacidad de los materiales aislantes para resistir la electricidad y prevenir fallas en los sistemas eléctricos de alta tensión. Este estándar se aplica a los materiales aislantes utilizados en equipos eléctricos, como transformadores, interruptores y cables de alta tensión. La normativa IEC 60270 establece los procedimientos para medir la respuesta dieléctrica de los materiales aislantes, lo que permite a los ingenieros eléctricos evaluar su calidad y capacidad para resistir la electricidad. La normativa IEC 60270 es importante para la seguridad y confiabilidad de los sistemas eléctricos de alta tensión. Al cumplir con la normativa IEC 60270, los fabricantes de equipos eléctricos pueden garantizar que sus productos sean seguros y confiables para su uso en sistemas eléctricos de alta tensión [43].

3.2.1. Circuito para detección de Descargas Parciales

Un circuito para detección de descargas parciales es un sistema eléctrico compuesto por varios componentes, diseñado para detectar y monitorear la presencia de descargas parciales en equipos eléctricos. Las descargas parciales son pequeñas descargas eléctricas que ocurren en el aislamiento de los equipos eléctricos y pueden ser indicativas de problemas en el aislamiento, lo que puede llevar a fallas en el equipo o incluso a riesgos de seguridad. El circuito de detección de descargas parciales se compone típicamente de sensores, amplificadores, filtros y un sistema de adquisición de datos. Los sensores se colocan cerca del equipo eléctrico que se está monitoreando y detectan las descargas parciales. Los amplificadores amplifican las señales detectadas por los sensores, mientras que los filtros eliminan el ruido de la señal. El sistema de adquisición de datos registra las señales amplificadas y filtradas para su posterior análisis. El circuito para detección de descargas parciales es una herramienta importante para la monitorización y mantenimiento preventivo de equipos eléctricos, ya que permite detectar problemas en el aislamiento antes de que se produzcan fallas en el equipo o riesgos de seguridad [44].

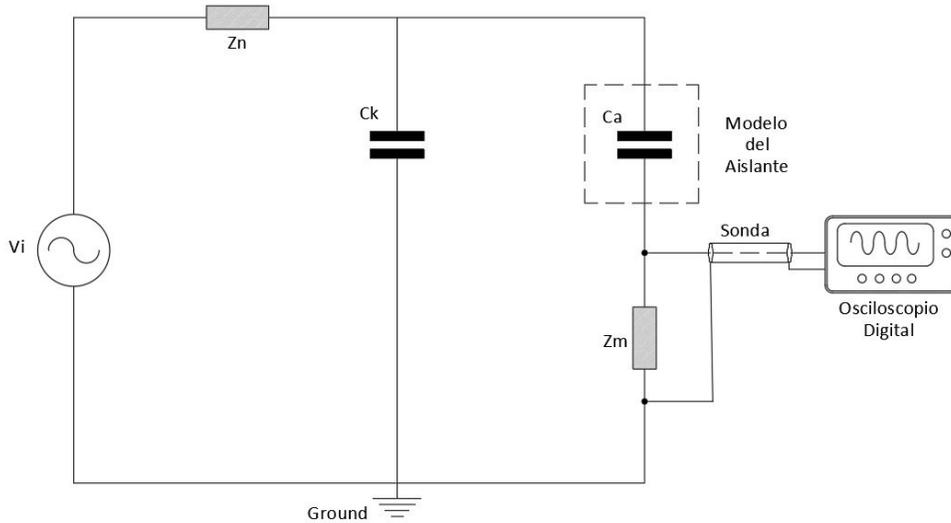


Figura 11: Circuito Directo propuesto para el análisis de DP en el Laboratorio de Alta Tensión [6].

Parámetro	Valor	Unidad
Fuente de alto voltaje (V_i)	100	kV
Impedancia de filtro (Z_n)	10	$M\Omega$
Capacitancia de acople (C_k)	100	pF
Aislante (C_a)	—	—
Impedancia de medida (Z_m)	1000	Ω

Tabla 1: Datos para el circuito IEC 60270.

3.3. Circuito Equivalente para un Aislante Sólido

Para modelar un aislante sólido se debe comprender su comportamiento eléctrico, debe tener la capacidad de resistividad al paso de la corriente por lo que, necesita una parte resistiva (R), debe tener la capacidad de polarización frente a un campo electromagnético necesitando de una parte capacitiva (C) dada por la permitividad del material, estos componentes (R, C) unidos de manera paralela modela un aislante sólido [39].

Para el cálculo de las componentes Resistiva y Capacitiva se utilizan las fórmulas 1 y 2 descritas a continuación [39].

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * D_f} * \ln \frac{2 * D_f}{r} \quad (1)$$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot D_f}{2 \cdot \ln(2 \cdot D_f/r)} * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) \quad (2)$$

La Figura 12 muestra los componentes (R,C) en paralelo que conforman un efecto aislante.

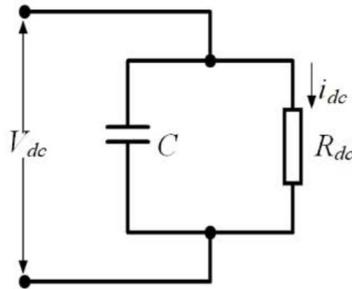


Figura 12: Equivalente Eléctrico para un aislante sólido [7].

3.4. Circuito Equivalente para un conductor XLPE

Para el desarrollo del modelo del conductor XLPE se pretende usar un circuito ya desarrollado por Gemant and Philippoff's conocido como el modelo capacitivo o también como el modelo ABC que se muestra en la figura 13 [8].

Donde:

- La capacitancia C_v representa al vacío.
- La capacitancia C_s representa el aislamiento del cable que se encuentra en serie con el vacío.
- La capacitancia C_p representa el aislamiento del cable restante del paralelo a C_v y C_s .

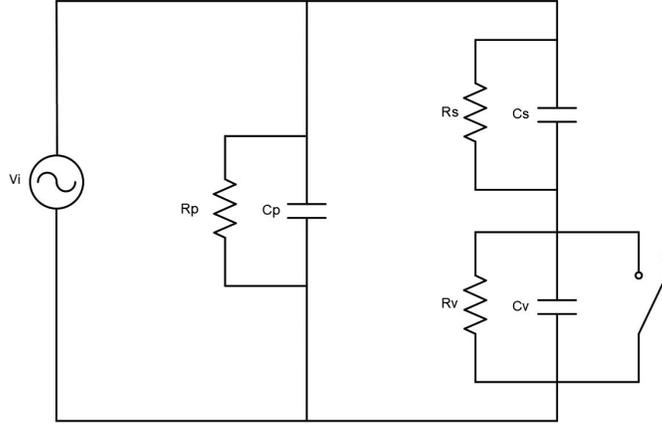


Figura 13: Circuito de los 3 condensadores de Gemant and Philippoff's para modelar descargas parciales en conductores XLPE [8].

- La resistencia R_v representa la resistencia del vacío.
- La resistencia R_s representa la resistencia en serie.
- La resistencia R_p representa la resistencia en paralelo.
- El interruptor S representa la simulación de los pulsos de DP[45].

Las siguientes ecuaciones 3, 6 y 7 calculan los valores del modelo ABC, permitiendo de esta forma simular el conductor XLPE[45].

La ecuación 3 es para calcular el condensador de vacío (C_v). Se debe también considerar que para este cálculo se toma la permitividad relativa con un valor de 1 esto debido a que el vacío se llena de aire [45][46].

$$C_v = \frac{\epsilon_0 * l_v * t_v}{\ln\left(\frac{r_c + d_c + (r_v/2)}{r_c + d_c - (r_v/2)}\right) * (r_c + d_c)} \quad (3)$$

La ecuacion 6 para calcular el condensador en serie (C_s).

$$C_{s1} = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * l_v * t_v}{\ln\left(\frac{rc + dc - (rv/2)}{rc}\right) * (rc + dc)} \quad (4)$$

$$C_{s2} = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * l_v * t_v}{\ln\left(\frac{r_c + d_{ins}}{r_c + d_c + (r_v/2)}\right) * (r_c + d_c)} \quad (5)$$

$$C_s = \frac{C_{s1} * C_{s2}}{C_{s1} + C_{s2}} \quad (6)$$

La ecuación 7 para calcular el condensador en paralelo (Cp).

$$C_p = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r * L}{\ln\left(\frac{r_c + d_{ins}}{r_c}\right)} \quad (7)$$

La ecuación 8 para calcular la resistencia de vacío (Rv).

$$R_v = \frac{1}{\rho_v} * \frac{r_c + d_c}{l_v * t_v} * \ln\left(\frac{r_c + d_c + (r_v/2)}{r_c + d_c - (r_v/2)}\right) \quad (8)$$

La ecuación 11 para calcular la resistencia en serie (Rs).

$$R_{s1} = \frac{1}{\rho_{ins}} * \frac{r_c + d_c}{l_v * t_v} * \ln\left(\frac{r_c + d_c - (r_v/2)}{r_c}\right) \quad (9)$$

$$R_{s2} = \frac{1}{\rho_{ins}} * \frac{r_c + d_c}{l_v * t_v} * \ln\left(\frac{r_c + d_{ins}}{r_c + d_c + (r_v/2)}\right) \quad (10)$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} \quad (11)$$

La ecuación 12 para calcular la resistencia en paralelo (Rp).

$$R_p = \frac{1}{2 * \pi * L * \rho_{ins}} * \ln\left(\frac{r_c + d_{ins}}{r_c}\right) \quad (12)$$

Segun S. Banumathi , el campo eléctrico creado dentro del vacío aumenta, por lo que es necesario introducir un factor de corrección (K_{ef})[45][46].

El factor de corrección para un vacío esférico se calcula con la ecuación 13:

$$K_{ef} = \frac{3 * \rho_{ins}}{1 + 2 * \rho_{ins}} \quad (13)$$

Dicho factor de corrección afectaría a algunos valores calculados que se muestran a continuación en las ecuaciones 14, 15, 16 [45][46]:

$$C_{scor} = K_{ef} * C_s \quad (14)$$

$$R_{scor} = K_{ef}^{-1} * R_s \quad (15)$$

$$C_{vcor} = K_{ef}^{-1} * \rho_{ins} * C_v \quad (16)$$

3.5. Modelo e implementación de un aislante sólido de Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5

3.5.1. Descripción Gráfica

En la Figura 14 se observa la ilustración gráfica de un aislante de porcelana y su estructura física.

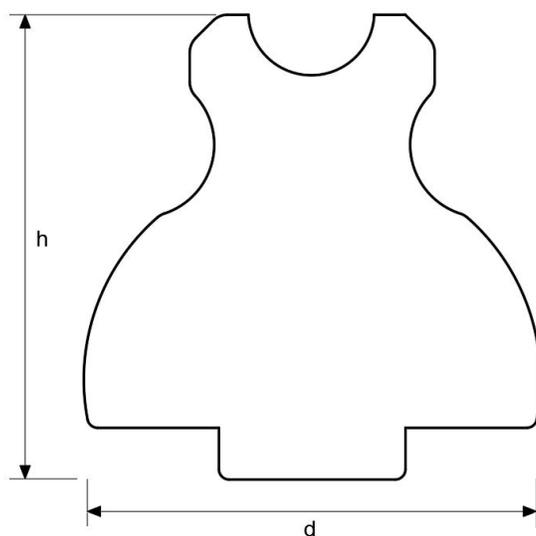


Figura 14: Aislante de Porcelana Tipo PIN ANSI 55-5.

3.5.2. Características del aislante de Porcelana PIN ANSI 55-5

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia de fuga (D_f)	305	mm
Diámetro (D)	178	mm
Radio(r)	89	mm
Altura(h)	124	mm
Resistividad(ρ)	$7 * 10^{12}$	$\Omega * m$
Permitividad Relativa	6	-

Tabla 2: Datos generales del Aislante de Porcelana tipo PIN ANSI 55-5

Mediante las características propias del aislante de porcelana 55-5 obtenidas de los datos de fabricación se calcula su equivalente eléctrico R y C.

Calculo para R:

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * D_f} * \ln \frac{2 * D_f}{r} \quad (17)$$

Calculo para C:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot D_f}{2 \cdot \ln(2 \cdot D_f/r)} * \left(\frac{1 * 10^{-9}}{9} \right) \quad (18)$$

Calculando la R y C se obtienen los siguientes valores:

$$R = 7,03087^{12} \Omega \quad (19)$$

$$C = 5,28187^{-11} F \quad (20)$$

3.5.3. Modelado ATP del Aislante PIN 55-5 y circuito generador de DP

En el circuito de la Figura 15 se expone el modelo del aislante solidó en conjunto con el circuito que genera los pulsos de descargas parciales, en donde: La implementación del interruptor representa el espacio de chispa (que representa el vacío), donde el voltaje de encendido genera DP, la capacitancia C1 representa la caída de tensión generada por un campo eléctrico inducido por cargas espaciales que modelaría un vacío o imperfecto en el aislante, las resistencias R1 y R2 limitan la corriente en el circuito, la capacitancia C_{acopt} tiene la finalidad de estabilizar la salida de la señal con DP [47][48].

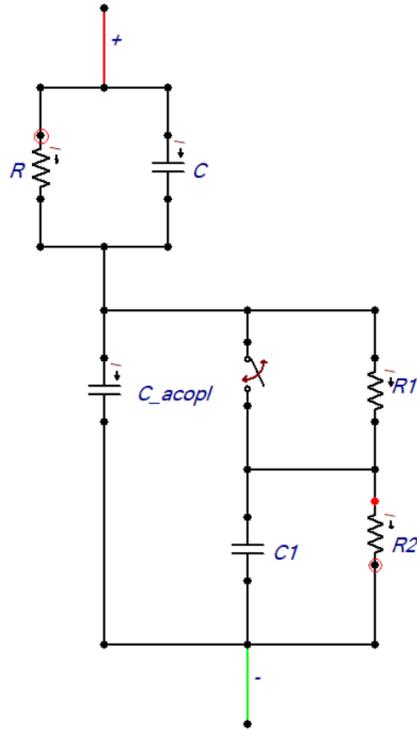


Figura 15: Modelado del Aislador PIN 55-5 y circuito generador de DP.

3.5.4. Implementación ATP del modelo del aislante PIN 55-5 en el circuito IEC 60270

Para observar y medir las descargas de un aislante de porcelana se implementará el estándar IEC 60270 en donde:

Se tiene una fuente de alta tensión variable, Z_n representa la impedancia que se encarga de ser una unidad de filtro, la capacitancia C_k indica una capacitancia de acoplamiento, Z_m indica una impedancia de medida, los valores de estos elementos fueron tomados del Laboratorio de Alta Tensión de la UPS sede Cuenca como se indica en la Figura 16.

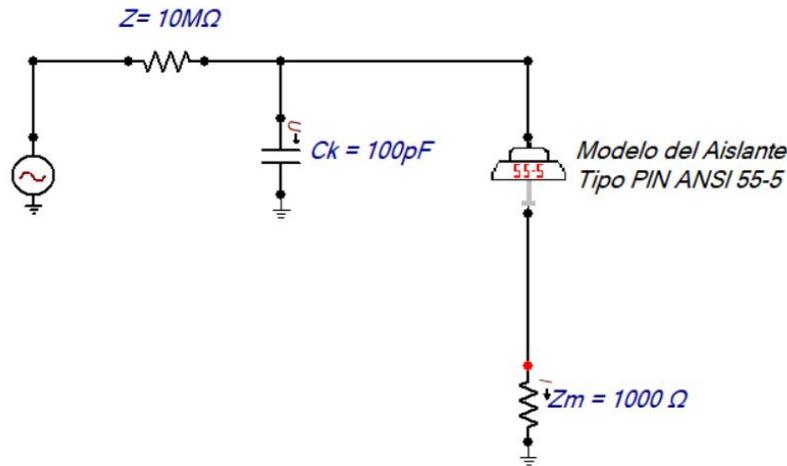


Figura 16: Modelado del Aislador PIN 55-5 implementado en la IEC 60270

3.5.5. Implementación experimental de la IEC 60270 con el Aislante de Porcelana tipo PIN ANSI 55-5 en el Laboratorio de Alta Tensión.

Con fin de validar los resultados obtenidos en el modelo desarrollado en ATP que simula un aislante de porcelana ANSI 55-5 se implementa la parte experimental en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS, como se indica en la Figura 17.

Los pasos para implementar el estándar IEC 60270 que permite medir las DP dentro del laboratorio son los siguientes:

1. Conectar la impedancia de filtro (Z) que tiene un valor de $10M\Omega$.
2. Conectar en paralelo a (Z) una capacitancia (C_k), con un valor de $100pF$.
3. Conectar en paralelo el elemento aislante (C_a), este dependerá del material y modelo que se desee analizar.
4. Colocar una impedancia de medida (Z_m) que permita observar la onda de salida con DP .

5. Observar la señal de corriente resultante con ayuda de sondas atenuadas en el osciloscopio



Figura 17: Circuito experimental desarrollado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS para un aislante de porcelana ANSI 55-5.

3.5.6. Validación de resultados experimentales y simulados

En la Tabla 3 se observa los resultados que se obtuvieron de un aislante de Porcelana ANSI 55-5 tanto de la parte experimental y simulada en software ATP. En ella se visualiza los niveles de voltaje al que se sometió el elemento aislante y las condiciones en las que se encuentra sin DP y con presencia de DP.

- Condición Normal: Muestra los valores obtenidos sin patrones de Descargas Parciales en el aislante es decir una senoidal pura.
- Condición Descarga: Muestra los valores obtenidos con patrones y frecuencias de Descargas Parciales en el aislante.

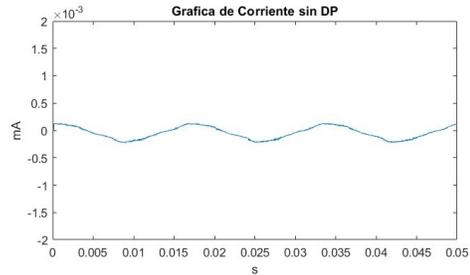
VALIDACIÓN DE RESULTADOS					
Valores Laboratorio					Error Relativo
Vprueba (kV)	Condición	Frecuencia (kHz)	Irms (mA)	Ip (mA)	Er Irms (%)
15 kV	Normal Ver Figura: 18a	-	0,118	0,166	0,0
30 kV	Normal Ver Figura: 18c	-	0,228	0,322	3,509
50 kV	Descarga Ver Figura: 18e	11.11	0,38	-1,16	2,632
		1.40		3,48	
		1.63		-2,12	
		1.55		1,6	
Valores Simulados en ATP					
Vprueba (kV)	Condición	Frecuencia (kHz)	Irms (mA)	Ip (mA)	
15 kV	Normal Ver Figura: 18b	-	0,118	0,167	
30 kV	Normal Ver Figura: 18d	-	0,236	0,334	
50 kV	Descarga Ver Figura: 18f	10	0,39	-1,426	
		1.32		3,677	
		1.53		-2,44	
		1.53		1.5	

Tabla 3: Resultados experimentales y simulados del aislante de Porcelana PIN ANSI 55-5.

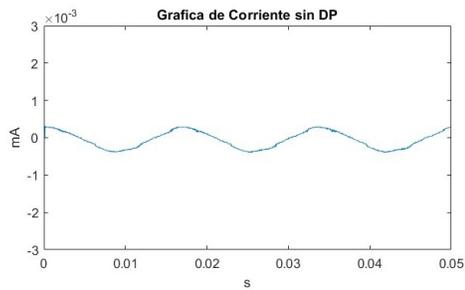
3.5.7. Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador de porcelana PIN 55-5.

En la Figura 18 se muestra las señales de corriente aplicando diferentes voltajes como 15 kV y 30 kV en condición normal y 50 kV en condición de DP tanto de la parte experimental y como de la simulada.

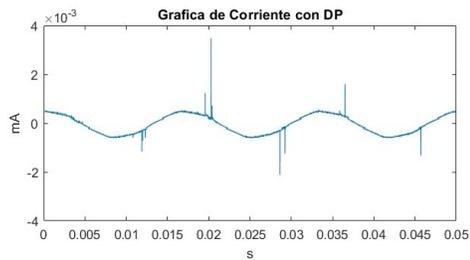
Laboratorio de la UPS



(a) Gráfica de corriente sin DP a 15 kV

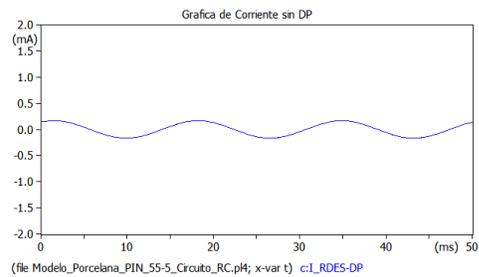


(c) Gráfica de corriente sin DP a 30 kV

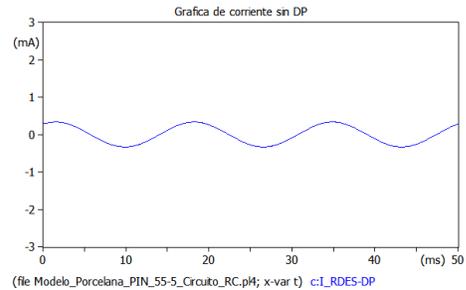


(e) Gráfica de corriente con DP a 50 kV

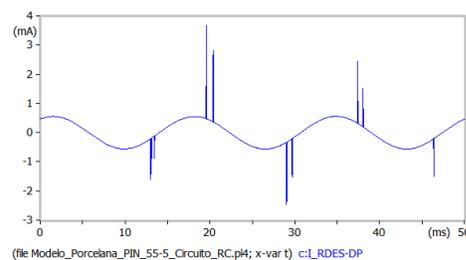
Software ATP



(b) Gráfica de corriente sin DP a 15 kV



(d) Gráfica de corriente sin DP a 30 kV



(f) Gráfica de corriente con DP a 50 kV

Figura 18: Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador de porcelana PIN 55-5.

3.6. Modelo e implementación para un aislante de suspensión polimérico ASUS-27

3.6.1. Descripción Gráfica

En la Figura 19 se ilustra de manera gráfica el aislante polimérico y sus componentes físicos.

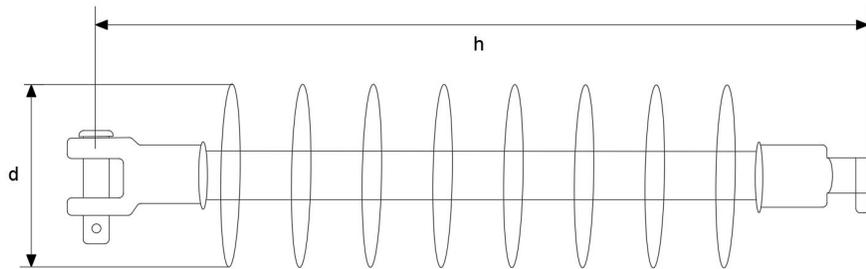


Figura 19: Aislante de suspensión polimérico ASUS-27

3.6.2. Características del aislante de suspensión polimérico ASUS-27

Parámetro	Valor	Unidad
Distancia de fuga (Df)	825	mm
Diámetro (D)	105	mm
Radio(r)	52.5	mm
Altura(h)	438	mm
Resistividad(ρ)	$1 * 10^{11}$	$\Omega * m$
Permitividad Relativa	3.6	-

Tabla 4: Datos generales del aislante de suspensión polimérico ASUS-27

Mediante las características propias del aislante de suspensión polimérico ASUS-27 obtenida de los datos de fabricación se puede calcular su equivalente eléctrico (R,C) que modela al aislante polímero como tal mediante la ecuación 21 y 22 respectivamente.

Calculo para R:

$$R = \frac{\rho}{2 * \pi * D_f} * \ln \frac{2 * D_f}{r} \quad (21)$$

Calculo para C:

$$C = \frac{\epsilon_r * D_f}{2 * \ln(2 * D_f)/(r)} * \frac{1 * 10^{-9}}{9} \quad (22)$$

Calculando la R y C se obtienen los siguientes valores:

$$R = 6,6512^{10} \Omega \quad (23)$$

$$C = 4,7858^{-11} F \quad (24)$$

3.6.3. Modelado del Aislante de suspensión polimérico ASUS-27 y circuito generador de DP.

Para modelar el aislante polimérico se toma en consideración el Modelo eléctrico RC ya descrito a comienzos de este capítulo y de similar manera el circuito encargado de generar los pulsos de descargas parciales, sin embargo los valores tanto para R1, R2, C1, y C_{acople} serán variables para cada circuito y modelo.

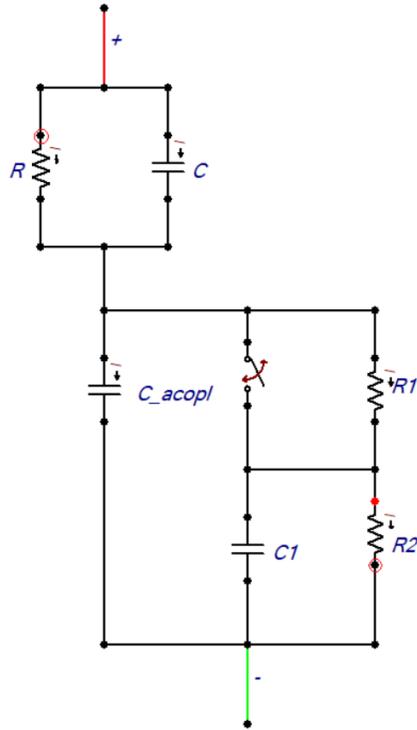


Figura 20: Modelado del Aislador de suspensión polimérico ASUS-27 y circuito generador de DP.

3.6.4. Implementación ATP del modelo del Aislador Polimérico ASUS-27 en el circuito IEC 60270.

Para observar y medir las descargas en un aislante polimérico se implementa el estándar IEC 60270 en donde:

Se tiene una fuente de alta tensión variable, Z_n representa la impedancia que se encarga de ser una unidad de filtro, la capacitancia C_k indica una capacitancia de acoplamiento, Z_m indica una impedancia de medida, los valores de estos elementos fueron tomados del Laboratorio de Alta Tensión de la UPS sede Cuenca como se observa en la Figura 21.

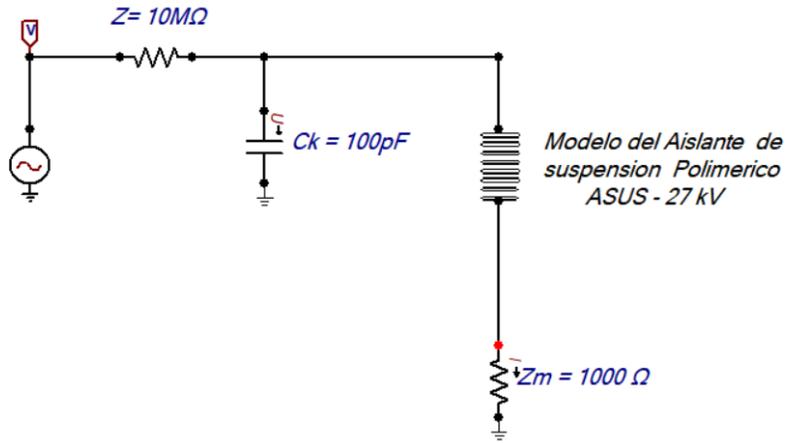


Figura 21: Modelado del Aislador Polimérico ASUS-27 implementado en la IEC 60270.

3.6.5. Implementación experimental de la IEC 60270 con el Aislador Polimérico ASUS-27 en el Laboratorio de Alta Tensión.

Con fin de validar los resultados obtenidos en el modelo desarrollado en ATP que simula un aislante polímero ASUS-27 se implementa la parte experimental emplazada en el laboratorio de Alta Tensión de la UPS, como se indica en la Figura 22 .

Los pasos para implementar el estándar IEC 60270 que permite medir las DP dentro del laboratorio son los siguientes:

1. Conectar la impedancia de filtro (Z) que tiene un valor de $10M\Omega$.
2. Conectar en paralelo a (Z) una capacitancia (C_k), con un valor de $100pF$.
3. Conectar en paralelo el elemento aislante (C_a), este dependerá del material y modelo que se desee analizar.
4. Colocar una impedancia de medida (Z_m) que permita observar la onda de salida con DP .

5. Observar la señal de corriente resultante con ayuda de sondas atenuadas en el osciloscopio



Figura 22: Circuito experimental desarrollado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS para un aislante polímero ASUS-27.

3.6.6. Validación de resultados experimentales y simulados

En la Tabla 5 se observa los resultados que se obtuvieron de un aislante de porcelana en la parte experimental y simulada, en ella se visualiza los niveles de voltaje al que se sometió el elemento aislante y las condiciones en las que se encuentra.

- Condición Normal: Muestra los valores obtenidos sin patrones de Descargas Parciales en el aislante es decir una senoidal pura.
- Condición Descarga: Muestra los valores obtenidos con patrones y frecuencias de Descargas Parciales.

VALIDACIÓN DE RESULTADOS					
Valores Laboratorio					Error Relativo
Vprueba (kV)	Condición	Frecuencia (kHz)	Irms (mA)	Ip (mA)	Er Irms (%)
15 kV	Normal	-	0,0118	0,0166	1,695
	Ver Figura: 23a				
27 kV	Normal	-	0,0174	0,0246	4,023
	Ver Figura: 23c				
90 kV	Descargar Ver Figura: 23e	3,922	0,0968	1,14	2,066
		0,87		-1,92	
		1,282		1,9	
		7,4		0,66	
Valores Simulados en ATP					
Vprueba (kV)	Condición	Frecuencia (kHz)	Irms (mA)	Ip (mA)	
15 kV	Normal	-	0,0116	0,0164	
	Ver Figura: 23b				
27 kV	Normal	-	0,0167	0,0234	
	Ver Figura: 23d				
90 kV	Descargar Ver Figura: 23f	3,33	0,0988	1,24	
		0,909		-1,889	
		1,333		1,872	
		6,67		0,684	

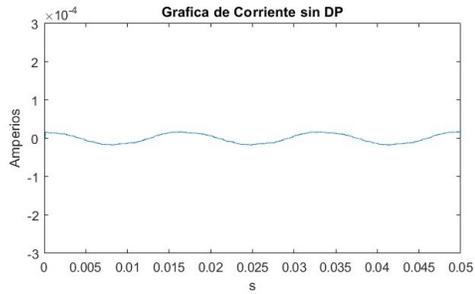
Tabla 5: Resultados experimentales y simulados del Aislador Polimérico ASUS-27.

3.6.7. Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador Polimérico ASUS-27.

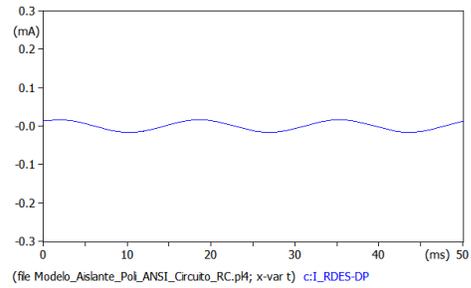
En la Figura 23 se muestra las señales de corriente aplicando diferentes voltajes como 15 kV y 27 kV en condición normal y 90 kV en condición de DP tanto de la parte experimental como de la simulada.

Laboratorio de la UPS

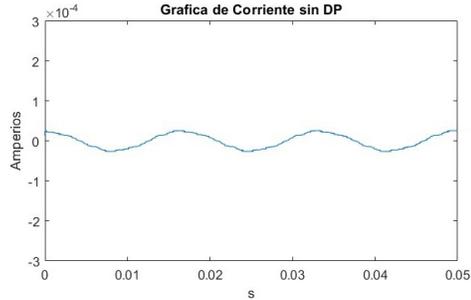
Software ATP



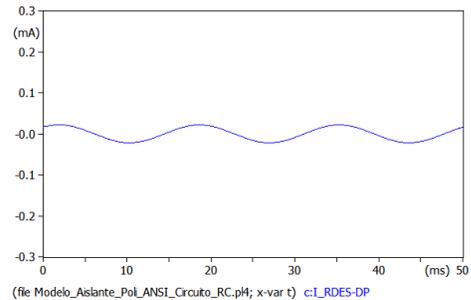
(a) Gráfica de corriente sin DP a 15 kV



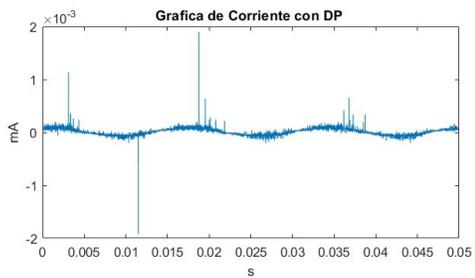
(b) Gráfica de corriente sin DP a 15 kV



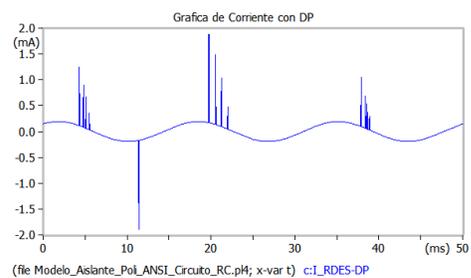
(c) Gráfica de corriente sin DP a 27 kV



(d) Gráfica de corriente sin DP a 27 kV



(e) Gráfica de corriente con DP a 90 kV



(f) Gráfica de corriente con DP a 90 kV

Figura 23: Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el Aislador Polimérico ASUS-27.

3.7. Modelo e implementación para un conductor XLPE Al 750kcmil

3.7.1. Descripción Gráfica

En la Figura 24 se ilustra de manera gráfica la superficie del cable XLPE y sus capas conductoras, aislantes y su imperfecto en este caso un vacío en la cubierta.

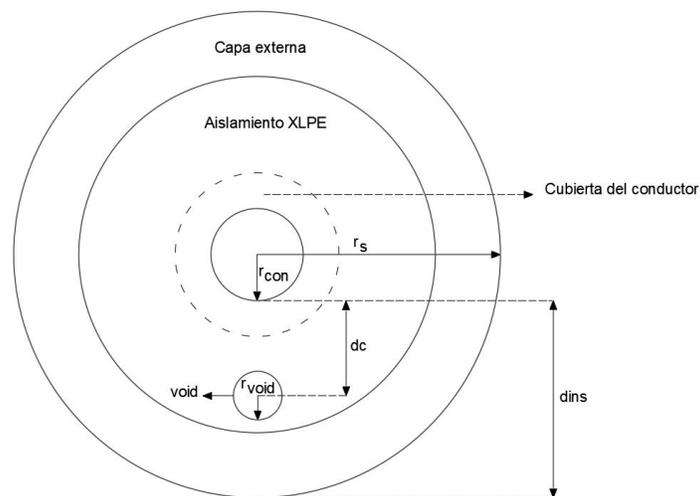


Figura 24: Ilustración gráfica del conductor XLPE.

3.7.2. Características del conductor XLPE Al 750kcmil

Basados en los datos de fabricación del conductor XLPE se toman de referencia para los cálculos pertinentes al desarrollo del modelo ABC y su simulación de un vacío en la cubierta aislante del cable. En la Tabla 6 se observa las características del conductor:

Parámetro	Valor	Unidad
Permitividad del vacío (ϵ_0)	$8,854 * 10^{-12}$	–
Permitividad relativa para XLPE (ϵ_r)	2.645	–
Radio del conductor (r_c)	11.55	mm
Radio del vacío (r_v)	0.5	um
Radio del cable (r_s)	39.76	mm
Distancia entre el conductor y la cubierta exterior (d_{ins})	25.03	mm
Distancia entre conductor y centro del vacío (d_c)	5	mm
Resistividad del conductor XLPE (ρ_{ins})	$7 * 10^{-17}$	–
Resistividad del vacío (ρ_v)	$5 * 10^{-8}$	–
Longitud del vacío (l_v)	1	um
Espesor del vacío (t_v)	1	um
Longitud del cable (L)	0.60	m

Tabla 6: Datos generales del Conductor XLPE.

Utilizando las ecuaciones ya descritas a inicios de este capítulo se obtiene los siguientes valores que se pueden visualizar en la Tabla 7 con los que se modela el sistema capacitivo ABC para un conductor XLPE.

Parámetro	Valor Calculado	Unidad
Capacitancia de vacío (Cv)	$1,77 * 10^{-14}$	F
Capacitancia paralelo (Cp)	$7,6584 * 10^{-11}$	F
Capacitancia serie (Cs)	$1,2605 * 10^{-10}$	F
Resistencia de vacío (Rv)	$1,00 * 10^{10}$	Ω
Resistencia paralelo (Rp)	$4,3684 * 10^{15}$	Ω
Resistencia serie (Rs)	$2,65 * 10^{20}$	Ω

Tabla 7: Valores Calculados para simular un conductor XLPE.

3.7.3. Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil con circuito generador de DP

Para dimensionar el conductor XLPE se utiliza el circuito de los 3 condensadores modificado, como se observa en la Figura 25. Este modelo permite simular de manera efectiva un conductor con un imperfecto en este caso un vacío en la cubierta protectora del conductor, para observar los pulsos de

las descargas se utiliza el circuito planteado en el estudio de los elementos aislantes anteriores a este, mismo circuito se encarga de modelar en conjunto con el interruptor las descargas que se dan en el defecto del cable. Los valores tanto para $R1$, $R2$, $C1$, y C_{acople} serán variables para cada circuito y modelo.

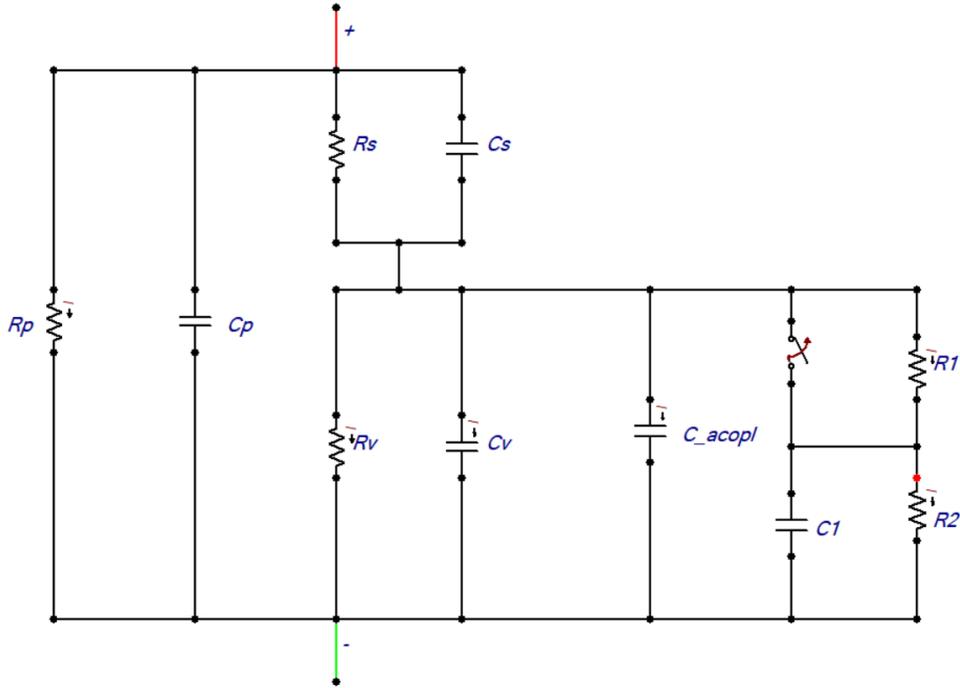


Figura 25: Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil y circuito generador de DP.

3.7.4. Implementación del conductor XLPE Al 750kcmil en el circuito IEC 60270

Para observar y medir las descargas en un conductor XLPE se implementa el estándar IEC 60270 en donde:

Se tiene una fuente de alta tensión variable, Z_n representa la impedancia que se encarga de ser una unidad de filtro, la capacitancia C_k indica una capacitancia de acoplamiento, Z_m indica una impedancia de medida, los valores de estos elementos fueron tomados del Laboratorio de Alta Tensión de

la UPS sede Cuenca como se observa en la Figura 26.

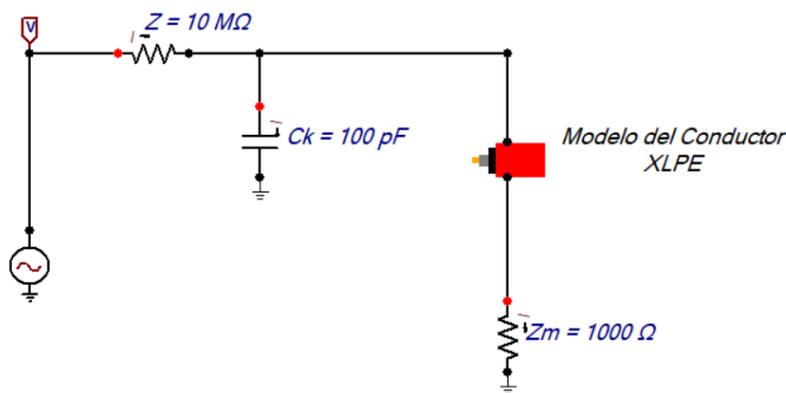


Figura 26: Modelado del conductor XLPE Al 750kcmil implementado en la IEC 60270.

3.7.5. Implementación experimental de la IEC 60270 con el conductor XLPE Al 750kcmil en el Laboratorio de Alta Tensión.

Con fin de validar los resultados obtenidos en el modelo desarrollado en ATP que simula un conductor XLPE se implementa la parte experimental emplazada en el laboratorio de Alta Tensión de la UPS, como se indica en la Figura 27.

Los pasos para implementar el estándar IEC 60270 que permite medir las DP dentro del laboratorio son los siguientes:

1. Conectar la impedancia de filtro (Z) que tiene un valor de $10\text{ M}\Omega$.
2. Conectar en paralelo a (Z) una capacitancia (C_k), con un valor de 100 pF .
3. Conectar en paralelo el elemento aislante (C_a), este dependerá del material y modelo que se desee analizar.

4. Colocar una impedancia de medida (Z_m) que permita observar la onda de salida con DP .
5. Observar la señal de corriente resultante con ayuda de sondas atenuadas en el osciloscopio



Figura 27: Circuito armado en el Laboratorio de Alta Tensión de la UPS.

3.7.6. Validación de resultados experimentales y simulados

En la Tabla 8 se observa los resultados que se obtuvieron de un aislante de porcelana en la parte experimental y simulada, en ella se visualiza los niveles de voltaje al que se sometió el elemento aislante y las condiciones en las que se encuentra.

- Condición Normal: Muestra los valores obtenidos sin patrones de Descargas Parciales.
- Condición Descarga: Muestra los valores obtenidos con patrones y frecuencias de Descargas Parciales.

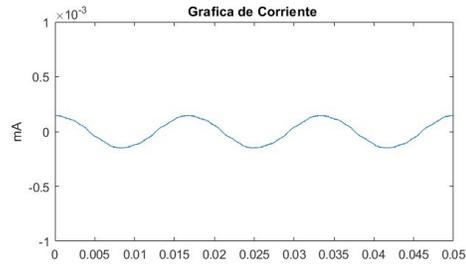
VALIDACIÓN DE RESULTADOS					
Valores Laboratorio					Error Relativo
Vprueba (kV)	Condición	Frecuencia (kHz)	Irms (mA)	Ip (mA)	Er Irms (%)
5 kV	Normal Ver Figura: 28a	-	0.104	0.147	5,769
30 kV	Descarga Ver Figura: 28c	11.11	1.087	- 5.68	3,036
		4.87		- 6.56	
		5.71		- 6.08	
Valores Simulado en ATP					
Vprueba	Condición	Frecuencia	Irms	Ip	
5 kV	Normal Ver Figura: 28b	-	0.11	0.16	
30 kV	Descarga Ver Figura: 28d	10	1.12	- 5.99	
		4		- 6.19	
		5.2		- 6.11	

Tabla 8: Resultados experimentales y simulados del conductor XLPE.

3.7.7. Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el conductor XLPE Al 750kcmil.

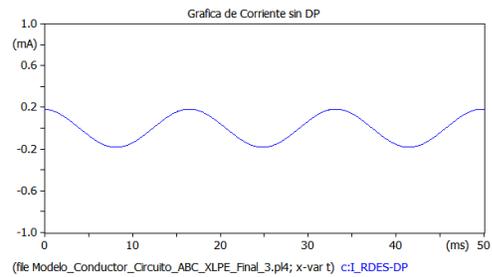
En la Figura 28 se muestra las señales de corriente aplicando diferentes voltajes como 5 kV en condición normal y 30 kV en condición de DP tanto de la parte experimental y como en la simulada.

Laboratorio de la UPS

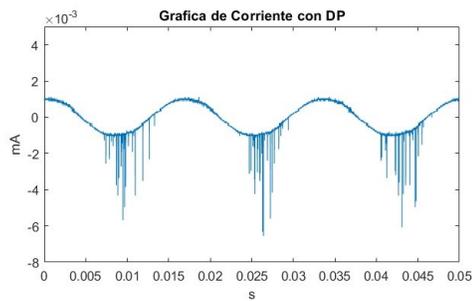


(a) Gráfica de corriente sin DP a 5 kV

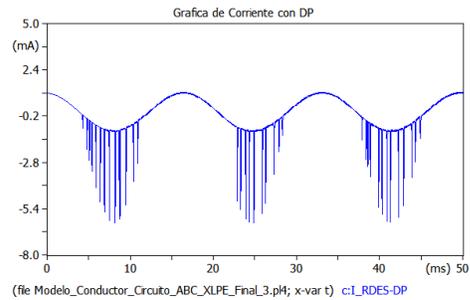
Software ATP



(b) Gráfica de corriente con DP a 5 kV



(c) Gráfica de corriente con DP a 30 kV



(d) Gráfica de corriente con DP a 30 kV

Figura 28: Gráficas de corriente en condición normal y de descarga en el conductor XLPE Al 750 kcmil.

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. CONCLUSIONES

El estudio de las DP tiene un impacto relevante en el campo eléctrico y sus aplicaciones, ya que el efecto de las mismas pueden producir deterioros o fallas en los elementos inmersos en los sistemas eléctricos de potencia, es por ello el interés del desarrollo de este tema de investigación donde se logró obtener tres modelos de análisis que se dan en aislamientos dieléctricos de alta y media tensión, como lo son de porcelana, poliméricos y en conductores XLPE, en ayuda del software ATP se logró diseñar los esquemas y modelos simuladores de estos elementos permitiendo observar el comportamiento de las DP.

La parte experimental realizada en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca permitió evaluar de manera física el comportamiento de los elementos de prueba y realizar una comparativa con la parte simulada para dar validación a los modelos, dado a los resultados que se obtuvieron tanto de la parte simulada y experimental se observa resultados semejantes en la señal de corriente y frecuencias de DP validando los modelos realizados en ATP.

En los elementos aislantes sólidos tanto en el polimérico como porcelana se observaron los comportamientos de las DP al inducir un voltaje superior al voltaje de ruptura evidenciando la presencia de descargas en los elementos de prueba tanto en la parte experimental como en la simulación, para llegar a obtener esta evidencia de DP nos basamos en la normativa IEC 60270.

Luego de observar los resultados de la parte experimental y simulada en ATP para un aislante de porcelana se valida el modelo eléctrico antes expuesto mismo que interpreta las condiciones reales de un aislante y las frecuencia de DP. En las pruebas realizadas se evidencia que el aislante de porcelana ANSI 55-5 a un voltaje aplicado de 15 kV y 30 kV no indica presencia de DP, sin embargo cuando se aplica una tensión de 50kV su comportamiento

muestra patrones de DP tipo superficiales en el elemento.

Luego de observar los resultados de la parte experimental y simulada en ATP para un aislante de suspensión polimérico ASUS-27 se valida el modelo eléctrico antes expuesto mismo que interpreta las condiciones reales de un aislante y las frecuencia de DP .En las pruebas realizadas se evidencia que el aislante polimérico ASUS-27 a un voltaje aplicado de 15 kV y 27 kV no indica presencia de DP, sin embargo cuando se aplica una tensión de 90 kV su comportamiento muestra patrones de DP en el elemento.

En las pruebas realizadas se evidencia que el cable XLPE a un voltaje aplicado de 5kV no indica presencia de DP, sin embargo cuando se aplica una tensión de 30kV su comportamiento muestra patrones de DP en el elemento.

El conductor XLPE tiene un voltaje nominal de 69 kV pero debido a la longitud de muestra del conductor que se tuvo en el laboratorio no se logró aislar a una distancia prudente la sección del cable de la parte de su fase con la parte neutra, lo que generó que se evidencien descargas a tensiones mas bajas de las nominales, es por ello que los valores realizados en la simulación se basan de forma empírica a los valores experimentales.

La comparación entre el error relativo calculado en la parte experimental y la parte simulada de este estudio indica que se han obtenido errores bajos en la medición y simulación de los datos. Esto sugiere que los resultados experimentales se acercan de manera coherente a los resultados simulados. Un error relativo bajo indica que el sistema o proceso en estudio se ha caracterizado con precisión y que los modelos utilizados para la simulación son apropiados para representar la realidad.

4.2. RECOMENDACIONES

La herramienta de simulación ATP tiene muchas aplicaciones en el área de investigación o desarrollo de modelos eléctricos, en el se pueden simular variedad de elementos y funciones, sin embargo antes de empezar a su uso se debe tener un conocimiento básico del software y el manejo de sus aplicaciones, como también el tener precaución en el uso de sus versiones ya que en algunas de sus versiones mas actuales no son compatibles con las mas

antiguas y viceversa.

Las muestras de datos recopilados en la parte experimental son señales muy sensibles de tratar se debe revisar los conectores hacia los elementos, como también las sondas usadas para visualizar las señales en el osciloscopio esto con la finalidad de evitar tener ruido en las señales y que puedan alterar valores en las muestras.

Los circuitos modelados en software ATP para los diferentes aislantes simulan de manera efectiva las condiciones reales de los mismos; sin embargo, son modelos muy básicos y no toman en cuenta algunos parámetros. Para mejorar los circuitos, sería recomendable la sustitución del interruptor, y se optaría por utilizar las herramientas TACS switch y MODEL's disponibles en el ATP, donde se puede programar un interruptor teniendo en cuenta muchos más parámetros y condiciones, para simular con certeza las DP en un aislante.

En la parte experimental se presento problemas con el conductor XLPE debido a su longitud, se recomienda que para un óptimo estudio de un cable se deba tener longitudes iguales o mayores a 1 metro.

En base a esta investigación se pueden desarrollar trabajos a futuro de gran impacto dentro del estudio de las DP:

- Se plantea desarrollar un modelo en ATP que simule aislantes líquidos uno de los mas usados es el aceite como medio aislante, esto con la finalidad de ver su comportamiento frente a tensiones superiores a su ruptura eléctrica seria interesante también modelar impurezas presentes en el aceite y como estas pueden afectar a las DP.
- Implementar un modelo ATP que simule los aislantes en diferentes condiciones de ambiente como en seco y húmedo con la finalidad de observar el comportamiento del modelo bajo el cambio de las variaciones climáticas, estas simulaciones pueden ser validadas en el laboratorio de alta tensión ya que cuenta con una maquina generadora de lluvia.
- Modelar Descargas Parciales en transformadores usando ATP, este elemento se encuentra presente en todos los sistemas eléctricos de potencia por lo que seria una investigación de alto impacto frente a su estudio y análisis frente a las descargas.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias

- [1] H. Estefania, *Metodología de detección de descargas parciales en generadores eléctricos, cables de potencia y transformadores de potencia usando el método electromagnético*. Institución universitaria pascual bravo/, 2020.
- [2] C. Wadhwa, *High voltage engineering*. New Age International, 2006.
- [3] F. Ana, *Detección de descargas parciales en el sistema aislante de los motores eléctricos como técnica de mantenimiento predictivo*. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia/, 2021.
- [4] Omicronenergy, *Generación de señales de fallas en líneas de transmisión de sistemas de potencia mediante simulación computacional considerando esquemas de control de excitación y velocidad*. <https://www.omicronenergy.com/es/solucion/medicion-y-analisis-de-descargas-parciales-en-transformadores-de-medida/>, 2023.
- [5] J. D. G. Delgado and J. C. G. Pérez, “Análisis térmico del efecto corona en líneas de distribución,” 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21485>
- [6] “IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV | IEC ,” 2015. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/23841>
- [7] K. Schon, *High impulse voltage and current measurement techniques*. Springer, 2013.
- [8] K. O. Ehineni, “Partial discharge modeling by simulink,” Ph.D. dissertation, Eastern Mediterranean University (EMU)-Doğu Akdeniz Üniversitesi (DAÜ), 2014.
- [9] Amperis, *Análisis de Descargas Parciales*. <https://amperis.com/recursos/articulos/analisis-descargas-parciales/>, 2023.

- [10] S. Edwin, *Detección de descargas parciales a través de radiación ultravioleta en redes de media y alta tensión en Colombia*. Tecnura, 2021.
- [11] F. Garnacho, *Procedimiento para caracterizar analizadores de descargas parciales de HF, VHF y UHF utilizados para el diagnóstico de las redes e instalaciones de alta tensión*. Congreso de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico, 2021.
- [12] A. Leon, *Desempeño eléctrico de aisladores cerámicos y poliméricos ante el crecimiento de microorganismos en su superficie: caso de estudio*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, 2015.
- [13] I. M. G. Varga, *Maquinas Electricas, Materiales Aisladores*. universidad Nacional de san antonio abad, 2021.
- [14] C. A. J. ANTONIO, *Análisis de pruebas eléctricas de una s.e. de distribución y determinación de mantenimiento*. Universidad Autonoma del estado de Morelos, 2020.
- [15] C. M. L. ENRIQUE, *Evaluación técnica-económica de alternativas para reducir las desconexiones por descargas atmosféricas en los primarios de la e.e.q.* Universidad Politécnica Salesiana de Quito, 2020.
- [16] Fluke, *Principales causas y tipos de descargas parciales*. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/deteccion-de-fugas/descarga-parcial>, 05 2023.
- [17] M. G. NIASAR, *Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper*. KTH Electrical Engineering, 2018.
- [18] G. A. Gómez, *Medición de Descargas Parciales en Transformadores de Potencia bajo los estándares internacionales IEC e IEEE*. Universidad de Costa Rica, 2017.
- [19] L. P. Verena Mercado Polo verena, José Bernardo Peña, *Calidad de la energía eléctrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra*. Universidad de los Andes, 2017.
- [20] J. Pulido, *Generación de señales de fallas en líneas de transmisión de sistemas de potencia mediante simulación computacional considerando*

- esquemas de control de excitacion y velocidad.* Universidad de Carabobo, 2017.
- [21] R. G. Albarracin Ricardo, *Medida de descargas parciales en radiofrecuencia.* Universidad Carlos III de Madrid, Madrid/, 2014.
- [22] Á. Perea Perelló, “Módulo de procesamiento de patrones resueltos en fase. sistema de identificación automática de fuentes de descargas parciales,” B.S. thesis, 2014.
- [23] J. Rodriguez, *Modelado y simulación de descargas parciales internas, arborescencias electricas y vida util de dielectricos polimericos solidos utilizados en activos electricos.* Universidad Politecnica de Madrid, 2020.
- [24] H. Fernando, *Diseño de Celdas de ensayo para generar patrones tipo descargas parciales representativas de defectos en cables aislados.* Universidad Politecnica de Madrid, 2016.
- [25] sciencedirect, *Nuclear Radiation Detection Devices.* <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/townsend-avalanche>, 2023.
- [26] D. C. Ferguso, *Flashover Current Pulse Formation and the Perimeter Theory.* IEEE Transactions on Plasma Science, 2023.
- [27] M. Omar, *Determinación y Analisis de descargas parciales mediante sensores de emisiones acustica en aisladores tipo PIN 55 5.* Instituto Politenico Nacional, Zacatenco, 2020.
- [28] P. C. J. A. Cárdenas Narváez Julio César, *Validación de programa ATP para Estudios de Flujo de carga en sistemas de potencia.* Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [29] S. Fluke Ibérica, *Cámaras termográficas Ti25 y Ti10 de Fluke.* Fluke Ibérica, S.L., 2023.
- [30] directindustry. (2023) Data logger de presión barométrica tr-73u. [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/t-d-corporation/product-209913-2137461.html>

- [31] K. C. Dávila, *Implementación de un localizador de fallas en ATPDraw para redes de distribución radiales con el uso de Models*. Universidad de la Salle, 2020.
- [32] N. A. Hernandez, *Análisis del fenómeno de escalación de tensión en fallas intermitentes en media tensión de sistemas eléctricos industriales*. Universidad Autonoma del Estado de Morelos, 2020.
- [33] C. B. J. Gonzalo, *Simulación de transitorios electromagnéticos de sistemas eléctricos de potencia empleando programación de unidades de procesamiento gráfico*. Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [34] M. Omar, *Especificación técnica aisladores eléctricos tipo pin porcelana, suspensión porcelana, line post, poliméricos de suspensión y pin, carrete y tensores*. Instituto Politenico Nacional, Zacatenco, 2020.
- [35] G. INSULATORS, *Catalogo Aisladores poliméricos para redes de distribución y herrajes para montaje*. Gamma-Corona, 2022.
- [36] Viakon. (2023) Cable de energia viacon para 69, 115 y 138 kv: Cu o al, xlpe. pantalla de alambres y cubierta pvc. [Online]. Available: <https://viakon.com/producto/cable-de-energia-viakon-para-69-115-y-138-kv-cu-o-al-xlpe-pantalla-de-alambres-y-cubierta-pvc/>
- [37] A. E. Coronel Muñoz and J. F. Chalco Montalván, “Determinación y análisis de descargas parciales mediante sensores de emisiones acústicas en aisladores tipo pin 55 5,” B.S. thesis, 2022.
- [38] H. Javier and A. Armijos, “Determinación de características predominantes de aislamiento a través de ensayos en el laboratorio de alta tensión de la universidad politécnica salesiana para postes de poliéster reforzado con fibra de vidrio (prfv) pertenecientes a la empresa equisp,” *UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA*, 2018.
- [39] Z. Y. Cotto Macul, “Análisis del nivel de aislamiento utilizados en sistemas de distribución y subtransmisión aéreas mediante el software atp-draw,” B.S. thesis, 2021.
- [40] F. Q. Cuesta, F. Mateo, G. Juca, and F. Xavier, “Determinación de las condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores

- mediante el análisis de corrientes,” *Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*, 2017.
- [41] J. D. Gómez Delgado and J. C. Gualpa Pérez, “Análisis térmico del efecto corona en líneas de distribución,” B.S. thesis, 2021.
- [42] M. R. Frías Lalbay and J. D. Sánchez Jara, “Determinación de características dieléctricas en crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en diversas condiciones ambientales mediante ensayos en el laboratorio de alta tensión de la universidad politécnica salesiana, sede cuenca,” B.S. thesis, 2020.
- [43] M. Omar, *Análisis de frecuencia de emisiones electromagnéticas por descargas parciales*. Instituto Politécnico Nacional, Zacatenco, 2020.
- [44] J. R. P. S. R. F. Fernando Garnacho, Abderrahim Khamlichi, *Procedimiento para caracterizar analizadores de descargas parciales de HF, VHF y UHF utilizados para el diagnóstico de las redes e instalaciones de alta tensión*. Tecnología en Marcha, 2021.
- [45] S. Banumathi and K. Sundararaju, “Partial discharge modelling of high voltage xlpe cable,” *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 118, no. 120, 2018.
- [46] F. Haghjoo, E. Khanahmadloo, and S. M. Shahrtash, “Comprehensive 3-capacitors model for partial discharge in power cables,” *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 346–368, 2012.
- [47] Y. Arief, W. Izzati, and Z. Adzis, “Modeling of partial discharge mechanisms in solid dielectric material,” *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 315–320, 2012.
- [48] A. Christina, M. Salam, Q. Rahman, M. S. Arifin, F. Wen, S. Ang, and S. Hasan, “Partial discharge modeling with increasing applied voltages across different void sizes,” in *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, 2017, pp. 22–25.