

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE GENERAL:

**“DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DIELECTRICAS 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”**

AUTORES:

MARIO RODRIGO FRÍAS LALBAY

JOHNNY DANILO SÁNCHEZ JARA

TUTOR:

ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

CUENCA – ECUADOR

2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Mario Rodrigo Frías Lalbay con documento de identificación N° 0704608306 y Johnny Danilo Sánchez Jara con documento de identificación N° 0104353537, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DIELECTRICAS 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”**, mismo que 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 la aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020



Mario Rodrigo Frías Lalbay
C.I.: 0704608306



Johnny Danilo Sánchez Jara
C.I.: 0104353537

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DIELECTRICAS 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”**, realizado por Mario Rodrigo Frías Lalbay y Johnny Danilo Sánchez Jara, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque General* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, enero del 2020

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and strokes, positioned above the typed name.

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque

C.I.: 0102257482

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Mario Rodrigo Frías Lalbay con documento de identificación N° 0704608306 y Johnny Danilo Sánchez Jara con documento de identificación N° 0104353537, autores del trabajo de titulación: **“DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DIELECTRICAS EN CRUCETAS DE POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO EN DIVERSAS CONDICIONES AMBIENTALES MEDIANTE ENSAYOS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSION DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, SEDE CUENCA”** certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque General* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, enero del 2020



Mario Rodrigo Frías Lalbay
C.I.: 0704608306



Johnny Danilo Sánchez Jara
C.I.: 0104353537

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por no dejarme caer frente a las adversidades y llevar con éxito la culminación de mi carrera universitaria, a mis abuelos que me criaron como su hijo y me brindaron siempre ese apoyo incondicional para que pueda lograr este objetivo; y sin duda, mi profundo agradecimiento a todos los profesores que forman parte de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes con todo el conocimiento impartido a lo largo de mis estudios permitieron mi formación profesional. Finalmente, agradezco a mi director de tesis Ing. Flavio Quizhpi por haberme guiado y ser el principal colaborador de este proyecto, brindándome sus conocimientos, enseñanzas y confianza para el desarrollo del mismo.

Johnny Danilo Sánchez Jara

Agradezco mis padres Galo y Celia por su apoyo durante toda mi carrera universitaria. Manifiesto agradecimiento al tutor de este trabajo, Ing. Flavio Quizhpi, por su gran apoyo, además expreso reconocimiento al director de carrera de Ingeniería Eléctrica, Ing. Marco Carpio, docentes y personal de laboratorio que colaboraron para la realización de mi proyecto de titulación.

Mario Rodrigo Frías Lalbay

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo de titulación a la persona más importante de mi vida, sin duda mi amada esposa, quien siempre me motivó, confió y nunca dudó en verme realizado profesionalmente, cada apoyo por parte de ella me impulsó aún más para alcanzar esta meta que me impuse algún momento; y hoy, con gran orgullo puedo decir gracias a ti mi compañera de vida hemos culminado con éxito este proyecto.

Johnny Danilo Sánchez Jara

A quienes, intencionalmente o sin saberlo, me motivaron en la realización de este trabajo. Tranquilidad sobre todo.

Mario Rodrigo Frías Lalbay

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
GLOSARIO.....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO.....	X
JUSTIFICACIÓN.....	XI
GRUPO OBJETIVO.....	XII
OBJETIVOS.....	XII
OBJETIVO GENERAL.....	XII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XII
CAPÍTULO 1. - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Procedimiento y ventajas de fabricación de las crucetas de PRFV.....	1
1.1.1 Tipos y soportes de crucetas de PRFV.....	2
1.2 Aspectos del Simulador de lluvia de la UPS.....	4
1.2.1 Esquema de circulación del agua en los ensayos.....	4
1.2.2 Condiciones y características de precipitación del agua tratada.....	5
1.2.3 Proceso de la norma IEEE std 4 para ensayos en condiciones de humedad.....	6
1.3 Descargas Parciales.....	6
1.3.1 Inicios de la detección de Descargas Parciales.....	6
1.3.2 Normativas de las descargas parciales.....	6
1.3.2.1 IEC 60270 (Método convencional).....	7
1.3.2.2 IEC 62478 (Método no convencional).....	8
1.3.3 Tipos de descargas parciales.....	9
1.3.3.1 Descarga parcial interna.....	9
1.3.3.2 Descarga parcial superficial.....	9
1.3.3.3 Descarga parcial de corona.....	10
1.4 Rigidez Dieléctrica.....	10
1.4.1 Normativa ASTM D-149.....	10
1.4.1.1 Método A (Prueba a corto plazo).....	11
1.4.1.2 Método B (Prueba paso a paso).....	11
1.4.1.3 Método C (Prueba de velocidad lenta en incrementos).....	12
1.5 Nivel básico de aislamiento.....	13
1.5.1 Impulso tipo rayo.....	13
1.5.2 BIL convencional.....	13
1.5.3 BIL estadístico.....	13
1.5.4 Tensión de flameo.....	14
1.5.5 Procedimiento para pruebas de impulso tipo rayo.....	14
1.6 Filtro FIR para el procesamiento de señales.....	14
1.6.1 FIR simétricos y asimétricos.....	15
1.6.2 Construcción de filtros FIR de fase lineal utilizando ventanas.....	16
1.6.3 Análisis de frecuencia mediante FFT.....	17
CAPÍTULO 2. - MARCO METODOLÓGICO.....	20
2.1 Condiciones del simulador de lluvia UPS.....	21
2.1.1 Preparación del simulador de lluvia.....	22
2.1.2 Medición y ajuste de precipitación en la cabina del simulador de lluvia.....	23
2.1.2.1 Velocidad de las gotas de lluvia.....	23
2.1.2.2 Ajuste de precipitación en la cabina del simulador.....	24
2.2 Detección de descargas parciales.....	24
2.2.1 Circuito de detección y adquisición de DP.....	26

2.2.2	Proceso para determinar las descargas parciales	27
2.2.3	Valor de tensión y duración de los ensayos	28
2.2.4	Análisis de la señal muestral y características de las DP	29
2.3	Determinación de la rigidez dieléctrica	31
2.3.1	Resistencia al deterioro eléctrico en aislantes.....	31
2.3.2	Empleo de la normativa ASTM D - 149.....	32
2.3.2.1	Método A prueba de corto plazo.....	32
2.3.3	Cantidad de muestras a ser analizadas	33
2.3.4	Degradación del aislamiento.....	33
2.4	Método del nivel básico de aislamiento (BIL)	35
2.4.1	Configuración de los electrodos.....	38
2.4.2	Método y tensiones de prueba mediante U50%.....	39
2.4.2.1	Método de ensayo de niveles múltiples (Sobretensión de flameo U50%).....	39
2.4.2.2	Procedimiento para ensayo de niveles múltiples.....	40
CAPÍTULO 3. - DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		41
3.1	Precipitación adecuada dentro del área donde se realizan los ensayos	41
3.1.1	Medición y ajuste de resistividad del agua	42
3.2	Resultados de las corrientes y niveles de tensión aplicados durante los ensayos de DP sobre las crucetas de PRFV	43
3.2.1	Gráficas de corriente y DP aplicando los diferentes niveles de tensión en ambiente seco.....	44
3.2.1.1	Muestra tomada para una tensión de 5 kV rms	44
3.2.1.2	Muestra tomada para una tensión de 10 kV rms	45
3.2.1.3	Muestra tomada para una tensión de 15 kV rms	46
3.2.1.4	Muestra tomada para una tensión de 20 kV rms	47
3.2.1.5	Muestra tomada para una tensión de 25 kV rms	48
3.2.2	Resultados de la medición y detección de DP en ambiente húmedo	49
3.2.2.1	Muestra tomada para una tensión de 5 kV rms	49
3.2.2.2	Muestra tomada para una tensión de 10 kV rms	50
3.2.3	Comparación de los resultados de DP en ambientes diversos	51
3.3	Resultados de la medición de rigidez dieléctrica y análisis estadístico dentro de los ensayos de crucetas de PRFV	52
3.3.1	Determinar los valores de la media aritmética y desviación estándar	54
3.3.2	Elaboración de la distribución gaussiana.....	54
3.4	Prueba de determinación del BIL	56
3.4.1	Resultados de los ensayos en ambiente húmedo.....	57
3.4.2	Resultados de los ensayos en ambiente seco	58
3.4.3	Curva de ajuste de datos del U50% en ambiente húmedo	59
3.4.4	Resultado en ambiente seco.....	60
3.4.5	Cálculo de la corrección atmosférica.....	60
3.4.6	Determinación del valor del BIL	61
3.4.7	Comparaciones de resultados de respuesta al impulso tipo rayo	61
CAPÍTULO 4. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		66
ANEXOS		68
ANEXO A: GRÁFICAS DE LAS DP PRODUCIDAS EN CADA NIVEL DE TENSIÓN DENTRO DE LOS ENSAYOS		68
ANEXO B: GRÁFICAS DEL IMPULSO TIPO RAYO DENTRO DE LOS ENSAYOS ..		75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Cruceta instalada en línea de alta tensión.	2
Figura 1.2 Soporte PRFV de cruceta en línea de alta tensión.	3
Figura 1.3 Datos técnicos de las crucetas y soportes de PRFV.....	3
Figura 1.4 Procedimiento de circulación de agua tratada.....	5
Figura 1.5 Circuito de medición indirecto para la detección de DP.....	7
Figura 1.6 Circuito de medición directo para la detección de DP.....	8
Figura 1.7 Circuito de calibración de escala.....	8
Figura 1.8 Descarga parcial interna sobre el material.	9
Figura 1.9 Descarga parcial superficial sobre el material.	9
Figura 1.10 Descarga parcial de corona sobre el material.....	10
Figura 1.11 Aumento del nivel de tensión, según el método A del ASTM D-149.	11
Figura 1.12 Aumento del nivel de tensión, según el método B del ASTM D-149.....	12
Figura 1.13 Aumento del nivel de tensión, según el método C del ASTM D-149.....	12
Figura 1.14 Parámetros característicos de las tensiones de impulso de prueba estándar	13
Figura 1.15 Distorsión sobre una señal con solapamiento.	18
Figura 2.1 Diagrama de bloques sobre el proceso general.	20
Figura 2.2 Filtro Zoosen de carbón activo.....	22
Figura 2.3 Circuito equivalente de las diferentes capacidades en el aislante.....	24
Figura 2.4 Descargas parciales sobre la vacuola del aislante.....	25
Figura 2.5 Esquema de métodos de detección de DP.....	26
Figura 2.6 Circuito de medición directa de descargas parciales.....	27
Figura 2.7 Medición directa de descargas parciales en ambiente seco.	28
Figura 2.8 Medición directa de descargas parciales en ambiente húmedo.....	28
Figura 2.9 Señal de tensión y corriente de adquisición de datos en los ensayos de DP.	29
Figura 2.10 Señal implementando el filtro digital sobre los datos adquiridos.	30
Figura 2.11 Análisis de espectro de frecuencia mediante Transformada Rápida de Fourier.	30
Figura 2.12 Señal de las descargas parciales sobre los ensayos.....	31
Figura 2.13 Configuración crítica de los electrodos.....	33
Figura 2.14 Modelo de equipo Fluke 1550C/1555.....	34
Figura 2.15 Valores de la resistencia de aislamiento, PI y DAR en base a las pruebas.	35
Figura 2.16 Circuitos de tensión de ensayo de impulso tipo rayo.....	36
Figura 2.17 Diagrama utilizado para recepción del BIL mediante ensayos tipo rayo - parte 1	37
Figura 2.18 Diagrama utilizado para recepción del BIL mediante ensayos tipo rayo - parte 2	37
Figura 2.19 Montaje del circuito con la cruceta de PRFV.	38
Figura 2.20 Esquema para ensayos de niveles múltiples.....	40
Figura 3.1 Recipiente de vidrio para estimación de la precipitación en pruebas de lluvia.	41
Figura 3.2 Equipo medidor de conductividad UPS-Cuenca.....	42
Figura 3.3 Valor de conductividad equivalente del equipo del laboratorio de química UPS-Cuenca.	43
Figura 3.4 Valores comparativos de corrientes en cada nivel de tensión aplicada.	43

Figura 3.5 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 5 kVrms.	44
Figura 3.6 Señal de DP (morada) a una tensión de 5 kV rms.....	45
Figura 3.7 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 10 kVrms.	45
Figura 3.8 Señal de DP (morada) a una tensión de 10 kV rms.....	46
Figura 3.9 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 15 kV rms.	46
Figura 3.10 Señal de DP (morada) a una tensión de 15 kV rms.	47
Figura 3.11 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 20 kV rms.	47
Figura 3.12 Señal de DP (morada) a una tensión de 20 kV rms.	48
Figura 3.13 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 25 kV rms.	48
Figura 3.14 Señal de DP (morada) a una tensión de 25 kV rms.	49
Figura 3.15 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 5 kVrms.	49
Figura 3.16 Señal de DP (morada) a una tensión de 5 kV rms.	50
Figura 3.17 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 10 kV rms.	50
Figura 3.18 Señal de DP (morada) a una tensión de 10 kV rms.	51
Figura 3.19 Distribución Gaussiana de los resultados obtenidos de las pruebas de rigidez dieléctrica.....	55
Figura 3.20 Distribución Gaussiana de los resultados obtenidos de las pruebas de rigidez dieléctrica.....	55
Figura 3.21 Circuito armado en el laboratorio de A.T. de la UPS para ensayos del BIL.	57
Figura 3.22 Curva polinómica de ajuste de datos recolectados (en color rojo).....	59
Figura 3.23 Cruceta de PRFV después de 15 impulsos tipo rayo de 64.22 kVp en ambiente seco.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características y condiciones principales del agua para pruebas en condiciones de humedad.....	5
Tabla 1.2 Funciones de ventana para el diseño de filtro FIR.	17
Tabla 1.3 Condiciones de la frecuencia de muestreo utilizadas en el análisis de FFT... ..	18
Tabla 2.1 Clasificación de la lluvia según su diámetro.	23
Tabla 2.2 Velocidad de las gotas de Lluvia.	23
Tabla 2.3 Características principales de los elementos del circuito detector de DP.	27
Tabla 2.4 Principales valores de tensión y tiempo de los ensayos de DP.	29
Tabla 2.5 Parámetros de prueba del índice de polarización dieléctrica.....	34
Tabla 2.6 Parámetros de prueba del índice de absorción dieléctrica.	35
Tabla 2.7 Parámetros de tolerancia de la forma estándar.	36
Tabla 2.8 Configuración de los electrodos y el valor del factor Kg.....	38
Tabla 3.1 Dimensionamiento de las muestras de cada compuesto.....	53
Tabla 3.2 Datos del voltaje de ruptura en las muestras.	53
Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de impulso tipo rayo en ambiente húmedo.	58
Tabla 3.4 Resultados de las pruebas de impulso tipo rayo en ambiente seco.	59
Tabla 3.5 Valores de corrección de altura.	61

GLOSARIO

PRFV: Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.

IEC: International Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional).

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica).

DP: Descargas Parciales.

ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).

DA: Descargas Atmosféricas.

UPS: Universidad Politécnica Salesiana.

UP: Unidades de Propiedad

UC: Unidades de Construcción

FIR: Finite Impulse Response (Respuesta Impulsional Finita).

FFT: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier).

PI: Polarization Index (Índice de Polarización Dieléctrica).

DAR: Dielectric Absorption Ratio (Relación de absorción dieléctrica).

RESUMEN

El presente trabajo estudia las características dieléctricas propias de las crucetas fabricadas en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), elaboradas por la empresa local *Equisplast*.

Mediante ensayos acogidos bajo la norma IEC 60270 se determinan las descargas parciales, con señales muestrales que luego son procesadas mediante el software MATLAB. Otra prueba realizada es aquella en la que se aplican impulsos tipo rayo sobre las crucetas, en condiciones ambientales, secas y de humedad. Posteriormente, se comparan entre sí los efectos producidos sobre las crucetas. También se realizan pruebas para obtener los valores de rigidez dieléctricas de dos tipos de compuestos diferentes de PRFV.

Para los ensayos se utiliza el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el mismo que está dotado de un simulador de lluvia al que se puede realizar ajustes del nivel de precipitación. Asimismo, se accederá a su reservorio de agua para modificar las propiedades químicas de la misma, dichos ajustes están dictaminados en la normativa IEEE std 4.

ABSTRACT

This research studies the dielectric characteristics of the electrical cross arms made of fiberglass reinforced polyester (FGRP), which are prepared by the local company *Equisplast*.

Through tests under the IEC 60270 standard, partial discharges are determined, with sample signals that are then processed by MATLAB software. Another test is the one in which lightning impulses are applied to the electrical cross arms, in dry and humidity environmental conditions. Subsequently, the effects produced on the electrical cross arms are compared. Tests are also performed to obtain the dielectric strength values of two different types of FGRP compounds.

For the test, the high voltage laboratory of the Universidad Politécnica Salesiana in Cuenca is used, which is equipped with a rain simulator to which precipitation level adjustments can be made. Likewise, it will access to its water reservoir to modify its chemical properties, according to the adjustments that are established in IEEE std 4 regulations.

INTRODUCCIÓN

Las crucetas forman parte importante de los sistemas aéreos de distribución de energía eléctrica, son la pieza estructural que da soporte a los conductores de media y alta tensión. Como parte del aparellaje eléctrico es importante conocer las propiedades en cuanto a aislamiento y resistencia frente a descargas eléctricas en diversas condiciones ambientales.

El Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables a través Sistema Integrado para la Gestión de la Distribución Eléctrica (SIGDE) es el ente rector del sector eléctrico ecuatoriano, por lo que, es el encargado de las actualizaciones de la normativa para la construcción de los componentes utilizados en los sistemas de distribución eléctricos, entre ellos las crucetas. Es así como en la tercera revisión del documento de unidades de propiedad (UP) y unidades de construcción (UC), constan las características que deben poseer, sobre todo en lo que corresponde con las dimensiones y características mecánicas.

En el manual de UP y UC se contemplan las crucetas construidas en Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, perfil “L”, que pueden reemplazar en cualquier condición a las crucetas de acero. Los beneficios más notorios del PRFV son su peso reducido y su inherente capacidad aislante al no ser un componente metálico.

El interés de este estudio es poder determinar mediante los ensayos el resultado de las propiedades, empleando métodos de prueba, para poder conocer las DP y rigidez dieléctrica en base a voltajes normalizados, según las normas IEC 60270 y ASTM D-149, además de realizar ensayos de nivel básico de aislamiento sobre las crucetas. Todo esto bajo condiciones ambientales diversas.

La posibilidad de comprobar características dieléctricas de materiales en condiciones de humedad es posible gracias a que el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta con un simulador de lluvia desarrollado como proyecto de titulación en el año 2018.

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En un inicio la construcción de las redes áreas, para la distribución de los circuitos a lo largo de grandes tramos se vio en la necesidad de ocupar elementos elaborados de madera, como son postes, crucetas y pie de amigo angulares. Estos debían cumplir con las características mecánicas mínimas, libres de rajaduras y debían tener un secado en horno, además de presentar su contenido de humedad, longitudes e información relevante sobre su fabricación, especie forestal de la madera, designación del preservante, etc. Siendo su único propósito mantener los conductores y equipos separados entre ellos y la tierra.

Con el pasar del tiempo, los postes y crucetas de madera empiezan a producir fallos por estrés físico, vientos fuertes y fracasos de tensores. No obstante, se empezaron a elaborar postes de hormigón armado y crucetas de composición metálica; lo que significó una mejora en el proceso. Además, estos tienen una vida útil más prolongada debido a que se degradan menos [1].

En la actualidad, hay una industria creciente que busca introducir los postes y crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Todo esto se da debido a la alta demanda y como una alternativa de solución a la madera, hormigón y estructuras metálicas [1], [2].

Estas nuevas crucetas, presentan características dieléctricas de los materiales de PRFV que pueden ser muy relevantes en el diseño del aislamiento de la red y en el comportamiento ante sobretensiones originadas por descargas atmosféricas (DA). Todo esto en condiciones secas y húmedas con el fin de determinar sus características más predominantes a la hora de su construcción [3], [4].

Se da a entender que dichas características se ven enfocadas en determinar el nivel básico de aislamiento para impulso por rayo, conocido como BIL, además de una tabla de análisis de descargas parciales y rigidez dieléctrica, con el fin de comparar los ensayos propuestos dentro del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana con la empresa, en busca de un aporte de conocimiento para el mejoramiento en la elaboración de las crucetas de PRFV [3], [5].

JUSTIFICACIÓN

Al existir nuevos materiales para la fabricación de los elementos que componen las redes de distribución eléctricas, también se vuelve necesario conocer a detalle su comportamiento físico, para así poder determinar su durabilidad frente a los diferentes factores a los que se puede ver expuesto en su condición operativa.

Existe la necesidad de conocer lo que le ocurre a la cruceta de poliéster reforzado con fibra de vidrio cuando esta sufre descargas eléctricas, ya que esto influye en su proceso de degradación y afecta el tiempo de su vida útil, además de analizar si las descargas eléctricas afectan a la cruceta en diferente forma, ya sea que se presenten en un ambiente seco o de humedad.

Bajo estas necesidades se establece las condiciones que debe cumplir el laboratorio de la UPS para los ensayos de las crucetas en diversas circunstancias. Así como el método empleado para determinar las DP, también un estado del aislamiento para posibles fallas en los equipos. Otra propiedad importante es la rigidez dieléctrica en materiales aislantes sólidos, que permite determinar el valor de ruptura de acuerdo a la norma ASTM D-149, además de aspectos sobre la degradación del material [3], [5].

Para la verificación del Nivel Básico de Aislamiento (BIL) se aplican impulsos tipo rayo en el material aislante, con el fin de obtener la propiedad de la resistencia eléctrica de un aislamiento en función del valor de cresta resultante, frente a un impulso tipo rayo estándar en condiciones atmosféricas normalizadas [6].

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, cuenta con un laboratorio para realizar ensayos en alta tensión, este laboratorio está equipado con una estructura capaz de simular condiciones de lluvia, así, se muestra como viable la realización del proyecto propuesto en provecho de la investigación en al área eléctrica [5].

GRUPO OBJETIVO

La empresa beneficiaria de la investigación es la empresa Equisplast, la cual se dedica al desarrollo de soluciones en postes y estructuras de poliéster reforzado con fibra de vidrio, con lo que se espera encontrar recomendaciones adecuadas para la construcción e implementación de dichas crucetas en el desarrollo industrial del país.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar parámetros dieléctricos en muestras de crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en diversas condiciones ambientales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar ensayos en el simulador de lluvia del laboratorio de Alta Tensión de la UPS Cuenca de acuerdo con la norma IEEE std 4.
- Determinar las descargas parciales que se producen en las muestras de crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio en diversas condiciones ambientales.
- Establecer la curva de distribución normal (campana de Gauss) de la rigidez dieléctrica de las muestras de PRFV.
- Establecer el Nivel Básico de Aislamiento (BIL) del poliéster reforzado con fibra de vidrio en condiciones ambientales variadas.
- Comparar los resultados de características dieléctricas de las muestras de PRFV en diversas condiciones ambientales.

CAPÍTULO 1. - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Desde hace varios años la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, ha venido ejecutando ensayos de alta tensión con descargas eléctricas sobre materiales aislantes, con fines investigativos y de colaboración con la industria del sector eléctrico. Para esto dispone de un equipo para simulación de lluvia, acoplable a los sistemas de ensayo de alta tensión, que permite generar condiciones adecuadas de precipitación y control del agua sobre el objeto a ser analizado, con la finalidad de cumplir con la normalización establecida para este tipo de ensayos [3], [5].

Las normas especificadas con las que trabaja el laboratorio de Alta Tensión, son la IEC 60-2015 y para ambientes húmedos la IEEE std 4-2013, las cuales se adecuan a las condiciones presentes en el laboratorio y de acuerdo al procedimiento de los ensayos a realizar, buscando con el análisis de estas pruebas que, el material aislante, permita aplicar de manera progresiva diferentes niveles de tensión entre sus extremos [7].

Los ensayos dentro del laboratorio proporcionan una serie de resultados sobre los materiales aislantes analizados, como son descargas parciales, tensiones de descarga, BIL, condiciones de vida útil del material aislante, valores máximos de voltajes que soporta, condiciones críticas de operación, consecuencias en condiciones húmedas de los aisladores y diferentes tipos de materiales [5], [8].

1.1 Procedimiento y ventajas de fabricación de las crucetas de PRFV

Las crucetas desarrolladas por la empresa Equisplast, son una alternativa de solución en el área eléctrica, para el soporte de los equipos de alta tensión y facilidad de manipulación por su poco peso y aislamiento. Emplea el poliéster con materiales compuestos (fibra, resina, protección UV), para obtener características resistentes elevadas [3].

El método empleado es la pultrusión, que permite perfiles de secciones regulares, de diferente longitud y con agujeros en base al requerimiento específico del cliente. Con esto se permitió la sustitución directa de elementos instalados en las líneas, para el caso de la madera y el acero, como se muestra en la Figura 1.1 [9], [10].



Figura 1.1 Cruceta instalada en línea de alta tensión.
Fuente: Revista Equisplast Ecuador [9].

❖ **Ventajas de las crucetas de PRFV**

- Igual capacidad de carga con respecto a las convencionales.
- Reducción en tiempos de instalación.
- Al ser livianas, permite mayor seguridad en el trabajo.
- Diseño variado de acuerdo con los diferentes circuitos.

1.1.1 Tipos y soportes de crucetas de PRFV

Actualmente la empresa Equisplast cuenta con diferentes tipos de crucetas, dentro de las cuales se puede mencionar las rectangulares, cuadradas y con perfil angular, las medidas comerciales son 2.4 m, a no ser que el cliente especifique una longitud diferente, para el caso de las cuadradas y rectangulares, están provistas de tapas en sus extremos, acoples de nylon y tubos de PRFV pultruidos, que permiten el sellado al interior e incrementan la carga de compresión puntual ejercida en las paredes [9], [10].

Para el caso de los soportes, como los de la Figura 1.2, contienen una alta resistencia y al ser un material aislante, trabaja en conjunto con las crucetas, permitiendo que las estructuras eléctricas cuenten con un mayor aislamiento secundario, todos ellos apegados bajo las normas ASTM [9].



Figura 1.2 Soporte PRFV de cruceta en línea de alta tensión.
Fuente: Revista Equisplast Ecuador [9].

La empresa cuenta con algunos datos técnicos, para las especificaciones de las diferentes crucetas, como se muestra la Figura 1.3 [9].

 <p>CRUCETA RECTANGULAR 120 x 90</p>	<p>Largo total del perfil</p> <p>Alto de la pared</p> <p>Ancho de la pared</p> <p>Espesor</p> <p>Peso aproximado</p> <p>Carga de rotura (ASTM D790)</p>	<p>2.400 mm.</p> <p>120 mm.</p> <p>90 mm.</p> <p>5 mm.</p> <p>9 kg.</p> <p>>2.000 kgf.</p>
 <p>CRUCETA CUADRADA 76</p>	<p>Largo total del perfil</p> <p>Alto de la pared</p> <p>Ancho de la pared</p> <p>Espesor</p> <p>Peso aproximado</p> <p>Carga de rotura (ASTM D 790)</p>	<p>2.400 mm.</p> <p>76,2 mm.</p> <p>76,2 mm.</p> <p>6,4 mm.</p> <p>8 kg.</p> <p>>1.500 kgf.</p>
 <p>CRUCETA ANGULAR 100</p>	<p>Largo total del perfil</p> <p>Ancho del ala</p> <p>Espesor</p> <p>Peso aproximado</p> <p>Carga de rotura (ASTM D 790)</p>	<p>2.400 mm.</p> <p>100 mm.</p> <p>14 mm.</p> <p>11,60 kg.</p> <p>>1.000 kgf.</p>
 <p>SOPORTE DE CRUCETA ANGULAR 50</p>	<p>Largo total del perfil</p> <p>Ancho del ala</p> <p>Espesor</p> <p>Peso aproximado</p>	<p>1.800/700 mm.</p> <p>50 mm.</p> <p>6 mm.</p> <p>1,89/0,74 kg.</p>

Figura 1.3 Datos técnicos de las crucetas y soportes de PRFV.
Fuente: Revista Equisplast Ecuador [9].

1.2 Aspectos del Simulador de lluvia de la UPS

En el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, existe un equipo destinado a la simulación de lluvia para ensayos con materiales. Éste permite efectuar pruebas de descargas en aislamientos eléctricos, aisladores humedecidos, análisis de aceites dieléctricos en los transformadores, polímeros y sobre estructuras aislantes de PRFV [3] , [5].

Este simulador consta de un sistema de aspersion con boquillas pulverizadoras que suministran el agua a una cámara de vidrio templado. El diseño de la cámara de vidrio evita que las brisas al interior se produzcan en exceso, durante las pruebas, para permitir control de temperatura y humedad adecuados.

El espacio de la cámara de vidrio, donde se llevan a cabo las pruebas, es aproximadamente 1 m² y su precipitación es graduada mediante válvulas de regulación. Estas válvulas controlan la presión adecuada en los aspersores marca Coolnet de 7.5 l/h; es decir, la cantidad de agua que se puede acumular en una determinada unidad de tiempo, la cual viene dada en mm/min [5].

Para el caso de componentes que son utilizados en exteriores sin protección adicional la precipitación incidente debe ser de 1.0 a 2.0 mm/min, al tratarse de una investigación se busca replicar condiciones ambientales naturales y se debe controlar la duración de la precipitación. Esto se consigue midiendo en un recipiente de entre 100 cm² a 750 cm² según lo indica la norma IEEE para ensayos de estado húmedo [5],[7].

1.2.1 Esquema de circulación del agua en los ensayos

Se trata de un sistema de recirculación de flujo donde el agua de aspersion es recolectada y drenada al abastecimiento, con una capacidad máxima de 220 litros, formando un ciclo cerrado como se muestra en el esquema de la Figura 1.4 [5]

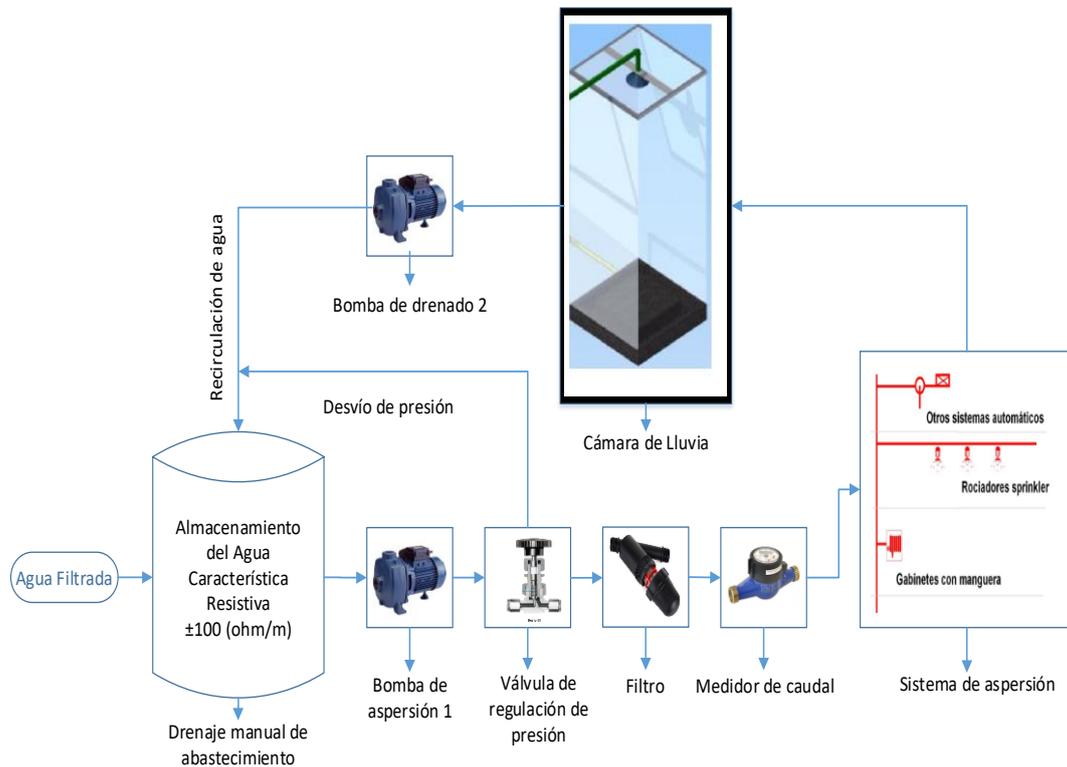


Figura 1.4 Procedimiento de circulación de agua tratada.

Fuente: Autores con información de diseño y construcción de un simulador de lluvia para el laboratorio de A.T. de la UPS – Cuenca [5].

1.2.2 Condiciones y características de precipitación del agua tratada

Para cumplir con la norma establecida en condiciones de humedad, se requiere utilizar agua debidamente purificada y libre de impurezas, que suele presentarse en el servicio de agua potable, pero de no ser el caso, se requiere del empleo de un filtro y el reposo del líquido durante 3 días. El estado del agua debe llegar a un valor de resistividad presente en la Tabla 1.1, la cual es inversa de la conductividad [5], [7].

Tabla 1.1 Características y condiciones principales del agua para pruebas en condiciones de humedad.

Fuente: IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques[7].

Procedimiento	Tasa de precipitación (mm/min)			Parámetros de agua recolectados		
	Componente Vertical	Componente Horizontal	Límites para cualquier medición individual	Temperatura (°C)	Resistividad Ohm-m [u.S/cm]	Duración de la prueba de resistencia (s)
Procedimiento de prueba estándar	1.0 a 2.0	1.0 a 2.0	± 0.5	Ambiente ± 15	100 ± 15	60
Práctica europea previa	3 ± 0.3	-	3 ± 0.75	Ambiente ± 15	100 ± 10	60
Práctica USA previa	5 ± 0.5	-	5 ± 1.25	Ambiente ± 15	178 ± 27	10

1.2.3 Proceso de la norma IEEE std 4 para ensayos en condiciones de humedad

El material aislante a ser utilizado para los ensayos, debe estar lavado y enjuagado, libre de impurezas, para luego ser sometido a un pre acondicionamiento de humedad durante aproximadamente 15 minutos con agua limpia [7].

Entonces se procede a rociar el material con el agua tratada, donde la resistividad indica el valor de resistencia, en ohmios, por unidad de longitud que tiene el agua con la cual se va a simular la lluvia. Mientras más alta sea la resistividad, menor será el número de sólidos disueltos en el líquido [11].

El estándar dispone que la medida de resistencia debe ser de $100 \pm 15 \Omega \cdot m$ del agua tratada, la cual puede ser tomada directamente del depósito de abastecimiento, para su respectivo análisis y que cumpla con el valor requerido para los ensayos, el rociado del agua desde los aspersores debe ser aproximadamente igual en intensidad, tanto en horizontal como en vertical [5], [7], [11].

1.3 Descargas Parciales

Se trata de un fenómeno de degeneración, debido a pequeños defectos existentes en el aislamiento, pudiendo ser este líquido o sólido. Se presenta cuando el exceso de campo eléctrico deteriora la resistencia dieléctrica y genera impulsos de corriente de magnitudes muy pequeñas en intervalos de microsegundos y nanosegundos, manifestándose en emisiones de sonido, luz, calor y reacciones químicas, disminuyendo la vida útil para todo el sistema de aislamiento [5], [12], [13].

1.3.1 Inicios de la detección de Descargas Parciales

Se remonta a inicios del siglo XX, donde para medir las DP se ocupaban señales eléctricas, las cuales valoraban los pulsos de descargas en base a patrones, dentro de una escala audible, ya para los años 40, con la invención de los equipos de medición se determinó los efectos y fenómenos perjudiciales sobre los materiales aislantes [3].

1.3.2 Normativas de las descargas parciales

Debe contemplar el uso de un circuito de baja impedancia para el pulso de corriente, donde se produce la descarga, de tal manera que sea eficiente y correcta la utilización de los sensores y transductores necesarios para la medición.

Es por esto que el empleo de la norma IEC 60270 permite detectar y medir las descargas parciales en los aislantes, de forma convencional, mientras que, para sistemas no convencionales, se ocupa la norma IEC 62478 [3], [13], [14].

1.3.2.1 IEC 60270 (Método convencional)

Esta norma emplea el análisis de dos circuitos de medición de forma directa e indirecta para la detección de descargas parciales, el primero se caracteriza porque la impedancia de medida está en serie con el aislante de prueba, no así en el segundo circuito donde el aislante de prueba se coloca en paralelo con el capacitor de acoplo y la impedancia de medida, como se observa en la Figura 1.5 y Figura 1.6 [5], [3], [14].

Fuente de Alta Tensión: sin interferencias (AC)

Impedancia de Filtro: no permite el paso de perturbaciones a la fuente (Z_n)

Objeto de Muestra: elemento al cual se realiza las pruebas (C_a)

Condensador de Acoplamiento: facilita el paso de corriente a altas frecuencias (C_k)

Impedancia de Medida: es por donde circulan los pulsos de corriente (Z_m)

Osciloscopio: permite adquirir los datos, mediante sondas.

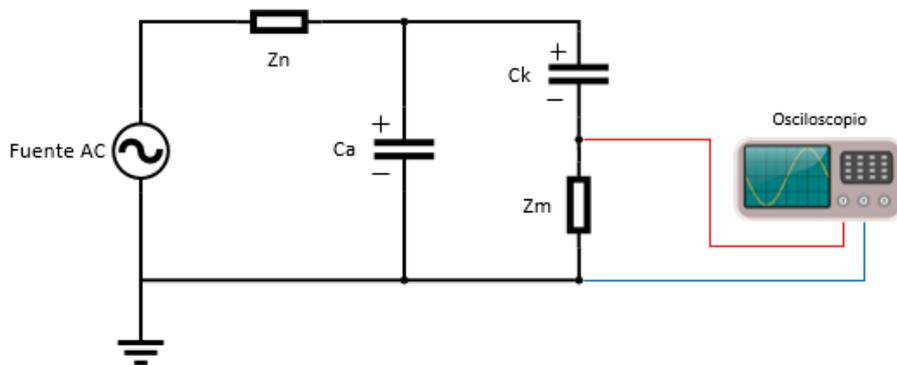


Figura 1.5 Circuito de medición indirecto para la detección de DP

Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de AT sobre postes de PRFV [3].

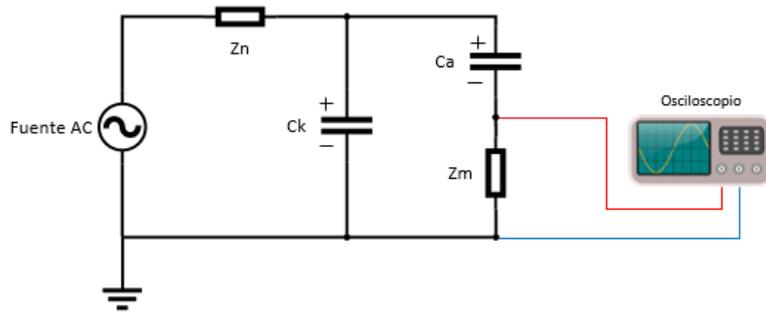


Figura 1.6 Circuito de medición directa para la detección de DP
 Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de AT sobre postes de PRFV [3].

1.3.2.2 IEC 62478 (Método no convencional)

No especifica un circuito normalizado para la medición, más bien se fundamenta en recopilación de técnicas no convencionales para la determinación de las DP, contienen tres rangos de medida: alta frecuencia (HF), muy alta frecuencia (VHF), ultra alta frecuencia (UHF), que se ocupan, según el objeto a prueba a ser analizado. Este método contempla el dominio del tiempo, presentando algunos tipos de mediciones no convencionales como:

- Detección Óptica
- Detección Acústica
- Técnicas de detección EMI

Antes de efectuar las pruebas se debe hacer un proceso de calibración de escala, inyectando un valor de carga eléctrica a la resistencia de medición R_m , como se observa en la Figura 1.7, cuyo valor es el resultado de $U_0 \cdot C_0$, proporcionando condiciones adecuadas para la detección de las descargas parciales dentro del objeto de prueba [15].

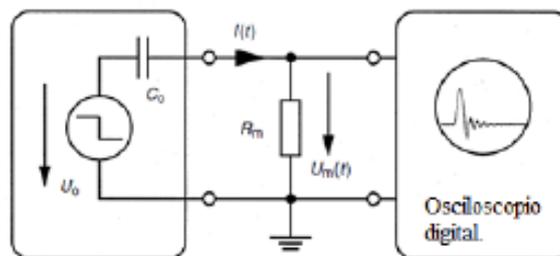


Figura 1.7 Circuito de calibración de escala
 Fuente: An Alternative Method for Partial Discharges Measurement Using Digital Filters [15].

1.3.3 Tipos de descargas parciales

Se pueden clasificar según el lugar donde se generan, en tres tipos: Descargas parciales internas, descargas parciales superficiales y descargas parciales de corona [13].

1.3.3.1 Descarga parcial interna

Se origina en la parte interna del material aislante sea este sólido o líquido, para el primer caso se presentan aberturas, agujeros internos debido a la poca uniformidad, mientras en el líquido la DP se dan cuando existen burbujas de aire, teniendo un valor de rigidez dieléctrica bajo, como se observa en la Figura 1.8.

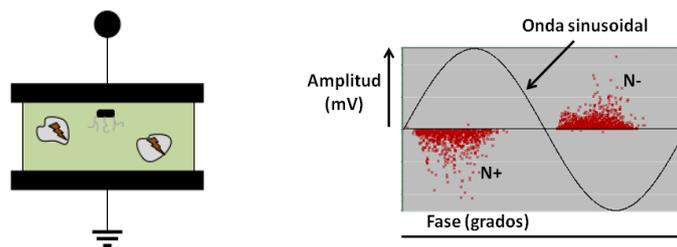


Figura 1.8 Descarga parcial interna sobre el material.

Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

Las imperfecciones dentro del material, pueden darse por errores en el proceso de construcción o producidos bajo condiciones normales de funcionamiento, debido a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales, entre otros [17].

1.3.3.2 Descarga parcial superficial

Tiene lugar entre dos medios dieléctricos, el material aislante y el aire, por la presencia de contaminación y factores ambientales de humedad que aceleran la presencia de estas descargas, al igual que las mostradas en la Figura 1.9.

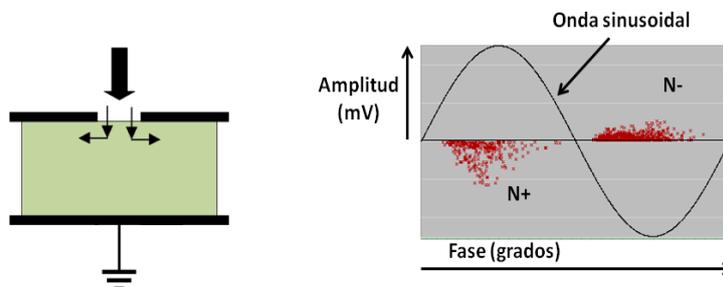


Figura 1.9 Descarga parcial superficial sobre el material.

Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

La continuidad de las descargas superficiales lleva a un patrón asimétrico, que exige una mayor concentración de descargas de amplitud en el semiciclo negativo. Además, presenta mayor dispersión y se encuentran más distanciadas del cruce por cero [17].

1.3.3.3 Descarga parcial de corona

Se origina entre dos puntos de dirección a un alto nivel de tensión, en zonas que contienen gases o dieléctricos sometidos a campo eléctrico, ionizándose el aire en el contorno del conductor, presentando una forma lumínica. Con el tiempo este efecto produce una degradación en el aislamiento, tal como se observa en la Figura 1.10 [17].

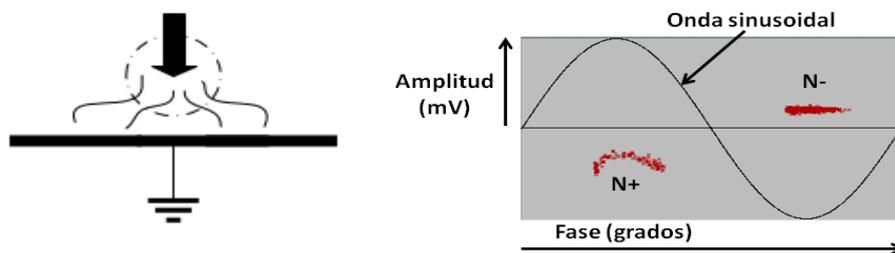


Figura 1.10 Descarga parcial de corona sobre el material.
Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

1.4 Rigidez Dieléctrica

La rigidez dieléctrica hace referencia a la máxima diferencia de potencial que se puede presentar en un material, antes de que se presente una sobretensión. Cuando se produce la disrupción en un material aislante sólido, éste se ve físicamente afectado, influyendo en su degradación y comprometiendo permanentemente su capacidad como material dieléctrico. Esta característica dieléctrica depende de varios factores como la forma de onda del voltaje, su duración, temperatura, humedad del aislamiento, contaminación y la característica natural de los electrodos, su unidad de medida es el kV/mm, que no es más que la razón del voltaje soportado y la longitud de la conexión [12].

1.4.1 Normativa ASTM D-149

Conocida, como el “Método de prueba para la tensión de ruptura dieléctrica y rigidez dieléctrica de los materiales de aislamiento sólido a frecuencias comerciales” cuyo valor de prueba se establece a 60 Hz, esta norma obtiene la tensión de ruptura del aislante, mediante tres métodos, los cuales son:

1.4.1.1 Método A (Prueba a corto plazo)

Este método permite establecer el voltaje a través de los dos electrodos y que se aumente desde cero hasta la descomposición dieléctrica a una velocidad uniforme, dando como resultado el V_{bd} (voltaje de ruptura) y t_{bd} (tiempo de ruptura), donde este último tiene generalmente una duración de entre 10 y 20 segundos, como se observa en la Figura 1.11 [1], [18].

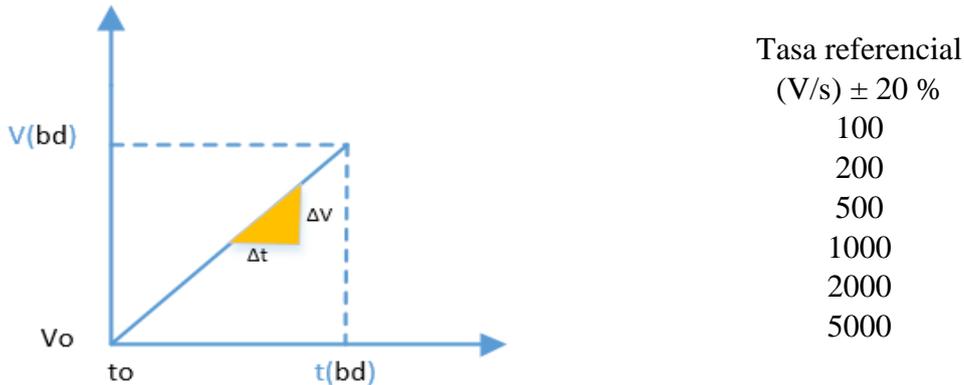
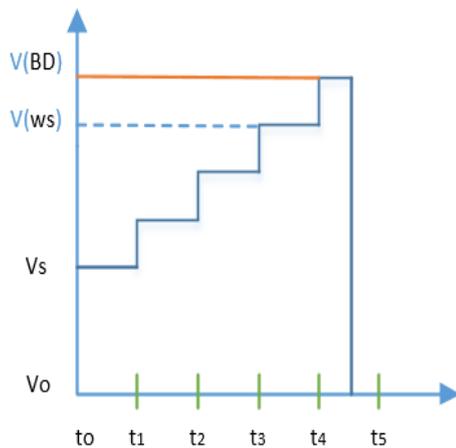


Figura 1.11 Aumento del nivel de tensión, según el método A del ASTM D-149.

Fuente: ASTM D 149 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies [18].

1.4.1.2 Método B (Prueba paso a paso)

Se considera el aplicar un voltaje de arranque inicial y conforme el material aislante resiste, se incrementa de forma escalonada hasta que se produzca la ruptura en un voltaje V_{BD} . El voltaje próximo a la ruptura se lo conoce como V_{WS} y con él se puede calcular la rigidez dieléctrica al dividirlo para el espesor del material dieléctrico, como la representación mostrada en la Figura 1.12.



Niveles (Vs) iniciales	Incremento (kV)
0.25 kV	10% del Vs
0.50 kV	0.50
1 kV	1
2 kV	2
5 kV	5
10 kV	10
20 kV	
50 kV	
100 kV	

Figura 1.12 Aumento del nivel de tensión, según el método B del ASTM D-149.

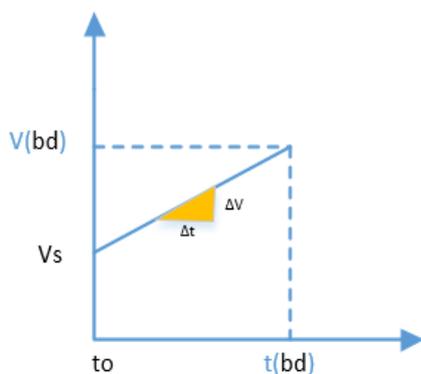
Fuente: ASTM D 149 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies [18].

Una vez que se produce la ruptura, se debe tomar las siguientes consideraciones:

- Si la destrucción del material se produce con el incremento del voltaje, el valor de la ruptura es igual al nivel de voltaje anterior.
- Si la destrucción se produce antes de terminar la prueba, el valor de voltaje de la destrucción será el último de la etapa completada con éxito [18].

1.4.1.3 Método C (Prueba de velocidad lenta en incrementos)

Este método permite establecer el voltaje a través de los dos electrodos, con una tensión de arranque inicial hasta el valor de ruptura V_{BD} , donde el tiempo t_{bd} debe ser mayor a 120 segundos, tal como se ve en la Figura 1.13 [19].



Tasa de (V/s) ± 20 %	Incremento (tiempo)
1 V/ seg	$t_{bd} > 120$ s
2 V/ seg	
5 V/ seg	
10 V/ seg	$V_{bd} = > 1,5 V_s$
12.5 V/seg	
20 V/seg	
25 V/seg	
50 V/seg	
100 V/seg	

Figura 1.13 Aumento del nivel de tensión, según el método C del ASTM D-149

Fuente:[18].

1.5 Nivel básico de aislamiento

Las siglas BIL son la representación en el idioma inglés de Basic Lightning Impulse Insulation Level, traducido como Nivel Básico de Aislamiento de Impulso Tipo Rayo. Se define como la resistencia eléctrica de un aislamiento en función del valor de cresta resultante frente a un impulso tipo rayo estándar en condiciones atmosféricas normalizadas [3], [8].

1.5.1 Impulso tipo rayo

Utiliza principalmente voltajes de impulso de rayo con un tiempo frontal $T_1 = 1.2 \mu s$ y un tiempo hasta la mitad del valor $T_2 = 50 \mu s$. La forma mostrada en la Figura 1.14, de $1.2/50 \mu s$ es la elegida comúnmente para propósitos de prueba de impulsos [7].

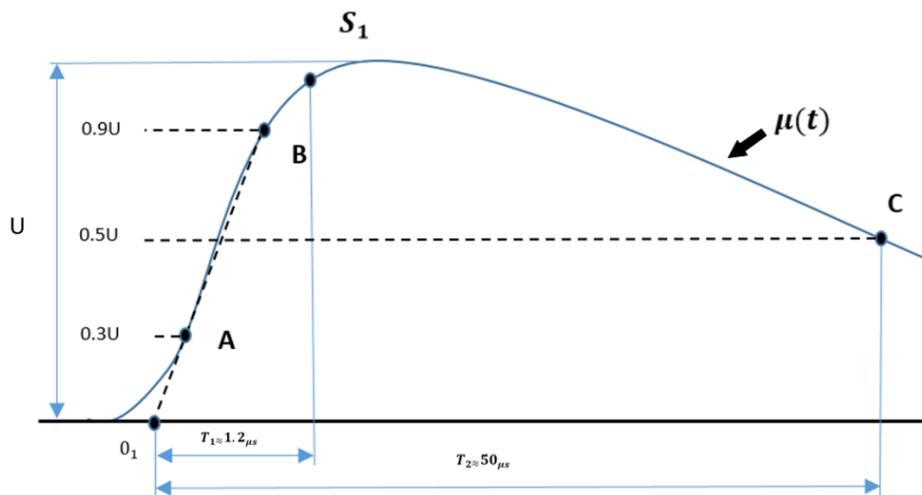


Figura 1.14 Parámetros característicos de las tensiones de impulso de prueba estándar
Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de A.T sobre postes de PRFV [3].

1.5.2 BIL convencional

El BIL convencional nos indica el valor de cresta de un impulso tipo rayo para el cual no se debe mostrar una descarga disruptiva cuando se somete un material a un número específico de pruebas de impulso, siendo este material uno que no posea auto restauración [3], [8], [20].

1.5.3 BIL estadístico

Son los valores de cresta para los cuales el aislamiento tiene un 10% de probabilidad de falla, frente a los impulsos de tipo rayo, esto es aplicable para materiales que no se regeneran automáticamente [3].

1.5.4 Tensión de flameo

También llamada tensión de chispa o tensión crítica de flameo. Es el nivel de voltaje al cual existe un 50% de probabilidad de que ocurra una descarga disruptiva en el aislamiento [3], [8].

1.5.5 Procedimiento para pruebas de impulso tipo rayo

La normativa IEEE std 4 redacta los diferentes tipos de pruebas que se pueden realizar sobre materiales, sometiéndolos a impulsos tipo rayo, para la determinación del voltaje de disrupción.

- **Prueba de voltaje de descarga disruptiva del 50%**

Para la determinación del nivel de voltaje en el cual se produzca la tensión del flameo, es decir, que exista 50% de probabilidad de falla, se puede aplicar dos procedimientos de prueba. El llamado método de niveles múltiples consiste en emplear 4 o más niveles de voltaje diferentes y sobre cada uno de estos aplicar como mínimo 10 impulsos tipo rayo; por otro lado, el método Up-and-Down requiere la aplicación de 1 impulso por cada nivel de voltaje, pero también se requiere que el impulso sea de aplicación útil (disruptivo) [3], [7], [8].

- **Prueba de tensión de resistencia nominal**

En esta prueba se presentan cuatro tipos de procedimientos, que difieren entre sí por el número de impulsos aplicados sobre el material y por el número de descargas disruptivas máximas permitidas. Esta metodología puede usarse para comprobar la resistencia del material de acuerdo con las especificaciones con las que fue construido, por lo que la polaridad y forma del impulso deberá ser específico para cada material.

- **Prueba de voltaje de descarga disruptiva asegurada**

Esta prueba es parecida a la de tensión de resistencia nominal, salvo que en lugar de resistencia debe presentar una descarga disruptiva sobre el material al que se aplica la prueba [3].

1.6 Filtro FIR para el procesamiento de señales

El filtrado de datos digitales como técnica de análisis, resulta ser muy fundamental en el área de procesamiento de señales. Lo que se busca es cambiar el contenido espectral original de la señal procesándolo en el dominio del tiempo, consiguiendo que

determinadas frecuencias presentes en la señal pasen, mientras que las atenuadas sean filtradas de forma selectiva. A los filtros se los puede clasificar como respuesta impulsional finita (FIR) y de respuesta de impulso infinita (IIR), aunque existen un sin número de filtros que se pueden ocupar dependiendo de las pruebas que se lleguen a realizar [21].

Para la presente investigación hay que concentrarse en los filtros FIR, cuyo impulso de entrada produce una respuesta que eventualmente se convertirá en ceros. Para poder determinar la salida, el filtro utiliza la multiplicación y la adición, además de la operación de promediado, con lo que se asegura estabilidad y una respuesta de fase lineal y con longitudes de palabras de datos más cortas [21], [22].

Uno de los problemas que presenta este filtro es que requiere de un orden superior para conseguir bandas de transición estrechas en comparación con otros, lo que involucra más operaciones aritméticas como multiplicadores y sumadores, aumentando el número de elementos de retardo. Dado que la posición de filtrado de un filtro FIR es inversamente proporcional al ancho de banda de transición, cualquier disminución en el ancho de banda aumenta la complejidad computacional de los filtros FIR significativamente [21].

1.6.1 FIR simétricos y asimétricos

En el caso de la simetría, permite elegir el factor M (número de coeficientes) a partir de una especificación de la respuesta en frecuencia deseada. Las raíces dentro de la función de transferencia del filtro de fase lineal, permite obtener los ceros que deben producirse en pares recíprocos, siendo estas de parte real y parte imaginaria que darán raíces complejas conjugadas simétricas [23].

Fórmula de la respuesta en frecuencia:

$$H(\omega) = H_r(\omega)e^{-j\omega(M-1)/2}$$

Donde $H_r(\omega)$ es la parte real:

$$H_r(\omega) = h\left(\frac{M-1}{2}\right) + 2 \sum_{n=0}^{(M-3)/2} h(n) \cos \omega \left(\frac{M-1}{2} - n\right) \quad M \text{ par}$$

$$H_r(\omega) = 2 \sum_{n=0}^{(M-2)/2} h(n) \cos \omega \left(\frac{M-1}{2} - n \right) \quad M \text{ impar}$$

Mostrando características de fase para M par o impar como:

$$\theta(\omega) = \begin{cases} -\omega \left(\frac{M-1}{2} \right) & \text{si } Hr(\omega) > 0 \\ -\omega \left(\frac{M-1}{2} \right) + \pi & \text{si } Hr(\omega) < 0 \end{cases}$$

1.6.2 Construcción de filtros FIR de fase lineal utilizando ventanas

Al poder utilizar las ventanas se permite suavizar las propiedades en frecuencia $H(\omega)$ del filtro, consiguiendo que los lóbulos laterales no sean grandes al estar en contacto con la banda de paso y la de rechazo, pudiendo llegar a producir incrementos en la frecuencia, mas no en amplitud conforme se incrementa M, produciéndose el fenómeno de Gibbs, que no es más que el incremento en el ancho de banda de transición [23].

Es importante definir la respuesta en frecuencia necesaria, para la correspondiente respuesta en impulso, con la utilización de la Transformada de Fourier [23].

$$H_d(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} h_d(n) e^{-j\omega n}$$

donde:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H_d(\omega) e^{j\omega n} d\omega$$

Con el uso de las ventanas se suaviza la respuesta en frecuencia, evitando discontinuidades abruptas en el tiempo, existen varias funciones de ventana con distintas características en el tiempo y que dan mayor o menor efecto de suavizado en frecuencia como se puede observar en la Tabla 1.2 [21], [23].

Tabla 1.2 Funciones de ventana para el diseño de filtro FIR.

Fuente: Modelación matemática y simulación de un filtro digital híbrido Fir adaptativo lineal óptimo [23].

Clases de ventanas	Rectangular	Bartlett (Triangular)	Hanning	Hamming	Blackman
Secuencia en el dominio del tiempo	$\frac{\text{sen} \omega_c \left(n - \frac{M-1}{2} \right)}{\pi \left(n - \frac{M-1}{2} \right)}$ $0 \leq n \leq M-1$ $n \neq \frac{M-1}{2}$	$1 - \frac{2 \left n - \frac{M-1}{2} \right }{M-1}$	$\frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{M-1} \right)$	$0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi n}{M-1}$	$0.42 - 0.5 \cos \frac{2\pi n}{M-1} + 0.08 \cos \frac{4\pi n}{M-1}$
Ancho de transición aproximada del lóbulo	$4\pi/M$	$8\pi/M$	$8\pi/M$	$8\pi/M$	$12\pi/M$
Pico de lóbulos laterales (dB)	-13	-27	-32	-43	-58
Clases de ventanas	Tukey	Kaiser		Lanczos	
Secuencia en el dominio del tiempo	$1, \left n - \frac{M-1}{2} \right \leq \alpha \frac{M-1}{2} \quad 0 < \alpha < 1$ $\frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{n - (1+\alpha)(M-1)/2}{(1-\alpha)(M-1)/2} \pi \right) \right]$ $\alpha (M-1)/2 \leq \left n - \frac{M-1}{2} \right \leq \frac{M-1}{2}$	$\frac{I_0 \left[\alpha \sqrt{\left(\frac{M-1}{2} \right)^2 - \left(n - \frac{M-1}{2} \right)^2} \right]}{I_0 \left[\alpha \left(\frac{M-1}{2} \right) \right]}$		$\left(\frac{\text{sen} \left[2\pi \frac{\left[n - \frac{M-1}{2} \right]}{(M-1)} \right]}{2\pi \frac{\left[n - \frac{M-1}{2} \right]}{(M-1)}} \right)^L$	

1.6.3 Análisis de frecuencia mediante FFT

El análisis de frecuencia se lo puede efectuar mediante filtrado digital o a través de FFT, donde el concepto se basa en que toda función periódica puede ser representada en serie de senos y cosenos.

Lo que busca la FFT, es transformar una señal en el dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y viceversa, utilizando un cálculo aproximado de $N \cdot \log_2(N)$ operaciones. Al agregar ceros al inicio o al final de la secuencia de dominio en el tiempo no se afecta el espectro de frecuencia de la señal [24].

Las funciones FFT son simétricas, su salida contiene frecuencias negativas, siendo esto una propiedad matemática de la transformada de Fourier. La primera mitad va con un valor de 0 Hz hasta la frecuencia de Nyquist, y la segunda mitad es una representación con frecuencias negativas. Por esto se considera importante el uso correcto del teorema de muestreo, sobre las señales, donde la frecuencia de muestreo debe cumplir $f_s > 2f_m$. Se muestra en la Tabla 1.3 las diferentes frecuencias con las que se trabaja[25].

Tabla 1.3 Condiciones de la frecuencia de muestreo utilizadas en el análisis de FFT.
 Fuente: Un complemento al teorema de Nyquist [24].

Frecuencia de muestreo	$f_s = 1/\Delta t$
Frecuencia angular de muestreo	$\Omega_s = 2\pi/\Delta t$
Frecuencia angular digital de muestreo	$\omega_s = \Omega_s \Delta t \equiv 2\pi$
Frecuencia digital de muestreo	$f_s = f_s \Delta t \equiv 1$

El promediado de los datos temporales se los puede realizar, mediante forma lineal en que todos los instantes de tiempo tienen igual peso, una segunda forma es a través de un exponencial en ciertos momentos considerándolos como los más importantes [25].

- **Ruido**

Señal de alta frecuencia con ancho de banda amplio, que se sobrepone sobre la señal analizada, generando distorsiones y consiguiendo valores falsos de datos. El ruido puede generarse por la red eléctrica, mala conexión de los cables, interferencia electromagnética, por lo que el uso de filtros es indispensable [24].

- **Solapamiento**

Es un problema que afecta al muestreo de la señal, para poder definir una determinada frecuencia requiere que su muestreo sea en dos puntos por ciclo, como se explicó en el análisis de frecuencia por FFT, esto se da básicamente por la discretización de la señal, donde sus frecuencias muy altas pueden ser mal interpretadas si la velocidad de muestreo no es elevada. Por lo que se emplea filtro anti-solapamiento que elimina las componentes de alta frecuencia de las señales analógicas medidas. En la Figura 1.15 se muestra la distorsión que se puede dar en una señal con el fenómeno del solapamiento [24].

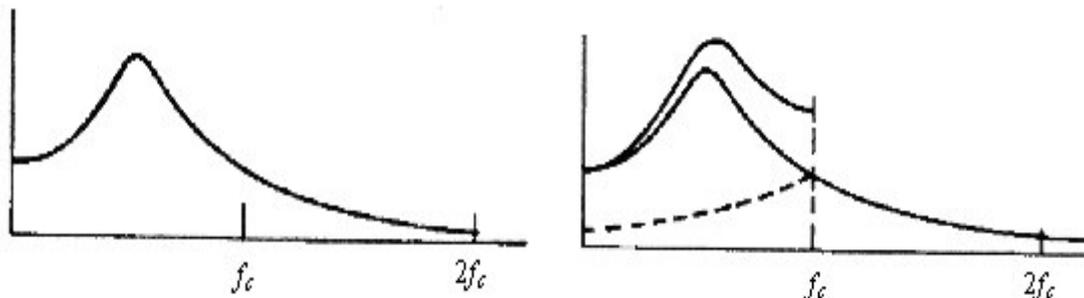


Figura 1.15 Distorsión sobre una señal con solapamiento.
 Fuente: Análisis en el dominio de la frecuencia [25].

- **Fugas**

Suele presentarse por un muestreo de números finitos de puntos N , donde la TFF asume que la señal es periódica en su longitud de muestreo. Esto se puede corregir mediante el empleo de ventanas, las que permiten multiplicar la señal original o bien aumentando la resolución en frecuencia [24].

CAPÍTULO 2. - MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo muestra la metodología empleada en la investigación de estudio. En lo que concierne a las crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en diversas condiciones ambientales, desarrolladas en diferentes etapas de prueba, con el material de muestra, para especificar el nivel de aislamiento, en forma general estas etapas son: preparación del simulador de lluvia para pruebas bajo la norma IEEE std 4, detección de descargas parciales en el material aislante, determinar la rigidez dieléctrica y nivel de degradación, nivel básico de aislamiento (BIL).

En la etapa 1 se establece información sobre las condiciones que debe cumplir el laboratorio de la UPS para los ensayos de las crucetas en diversas condiciones. La etapa 2 presenta la norma, el método empleado, proceso para determinar las DP, valor de tensión de los ensayos y el tiempo de prueba. En la etapa 3 describe la norma utilizada para determinar la rigidez dieléctrica, el método empleado, cálculo del número de muestras a ser analizadas, aspectos sobre la degradación del material. La etapa 4 habla sobre el nivel básico de aislamiento presente en un material aislante. Finalmente, se presenta una comparación de los resultados en cuanto a sus características dieléctricas del material analizado. Se presenta en la figura 2.1 un diagrama de bloques sobre el proceso a seguir dentro de la investigación.

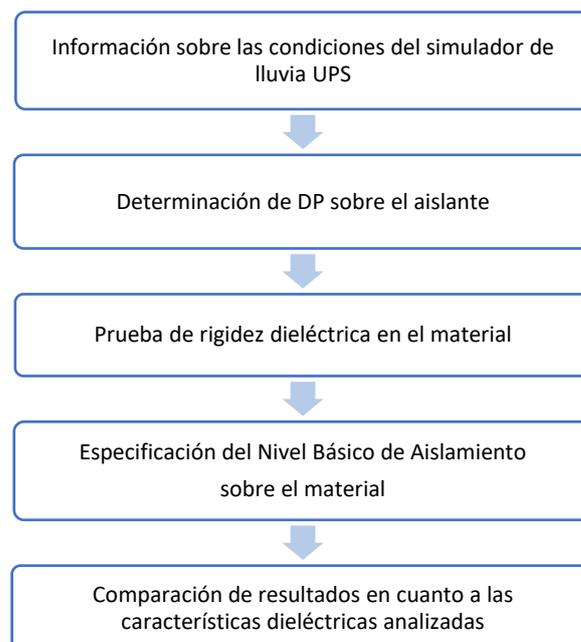


Figura 2.1 Diagrama de bloques sobre el proceso general.
Fuente: Autores.

2.1 Condiciones del simulador de lluvia UPS

En la actualidad se pueden realizar diferentes ensayos dentro del laboratorio de alta tensión, respetando las normalizaciones establecidas, el objeto a ser analizado es sometido a condiciones muy similares a las que se presentan en lluvia natural, dentro de las características principales con las que consta el laboratorio, se tiene la fuente de energía, movilidad de la cámara de prueba, recirculación de agua tratada, disponibilidad de una cantidad de precipitación cuando y donde se requiera, además de otros parámetros como son:

- Dimensionamiento del tamaño de la gota muy cercano al real, gracias al aspersor Coolneet Pro.
- El tamaño de la cámara es suficiente para la representación de las condiciones de lluvia en las pruebas realizadas.
- Las características de la gota y la intensidad de aplicación son lo suficientemente uniformes sobre el área de estudio.
- Las aplicaciones de las gotas son casi continuas sobre el área.
- Capacidad de reproducción de las precipitaciones con la intensidad deseada, es muy aceptable.
- Transportable

Las mejores técnicas para producir lluvia artificial, en las diferentes investigaciones pueden asociarse en dos grupos [26].

- Aquellas que emplean aspersores, donde se aplica el agua con cierta velocidad inducida a presión.
- Mediante la utilización de tubos pequeños, donde se forman las gotas, cuya velocidad inicial es cero.

Se ha considerado para el simulador de lluvia del laboratorio de alta tensión de la UPS, el primer grupo, siendo el más sencillo y usado en sistemas de riego a presión, el mismo cuenta con dos bombas, una para aspersión y otra para el drenado del líquido, ambas comandadas por un tablero de control, además de su fuente de abastecimiento de agua, sistema de bombeo, la red de distribución de agua necesaria para la regulación de la presión y obtener la precipitación adecuada, válvulas de regulación que permiten controlar el paso del agua desde el depósito hasta la cabina [5], [11].

Para los ensayos existen tres métodos diferentes para el análisis del objeto, como se estableció en la Tabla 1.1. Se consideró el método estándar, como el más recomendado, debido a que actúa sobre los diferentes tipos de tensiones de prueba. Además de que permite un tiempo previo de humedecimiento del objeto, para establecer el valor de resistividad adecuada del agua de prueba [7].

2.1.1 Preparación del simulador de lluvia

El propósito del simulador de lluvia es recrear las condiciones en las que se encuentra los materiales de prueba en su ambiente de trabajo, por lo que es necesario que el agua tenga una composición química similar a la lluvia natural; también, el nivel de precipitación que recibe la muestra debe ser adecuado a la norma [5].

La preparación del simulador comienza con la comprobación de las conexiones de las tuberías, además de la verificación del funcionamiento de las bombas de agua que son utilizadas para la aspersion y el drenaje del agua realizado desde y hacia la fuente de abastecimiento. Una vez comprobado el correcto desempeño de los equipos se procede a llenar el depósito de agua.

El llenado del tanque de almacenamiento se realiza almacenando 150 litros del suministro de agua potable, la totalidad del agua es sometida a un proceso de filtración, para lo cual se ocupa un dispositivo que utiliza principalmente carbón activo para eliminar impurezas y otros compuestos; de no ser filtrada el agua existe la posibilidad de que los sólidos e impurezas disueltos en el agua potable afecten la resistividad del agua. La Figura 2.2 muestra el filtro a utilizar para retirar impurezas del agua.



Figura 2.2 Filtro Zoosen de carbón activo.
Fuente: Autores.

2.1.2 Medición y ajuste de precipitación en la cabina del simulador de lluvia

La precipitación se considera como un fenómeno meteorológico, como parte del ciclo hidrológico y que permite el descenso de partículas de agua, sean estas en estado sólido o líquido a la superficie terrestre con una velocidad apreciable, su forma líquida como lluvia, llovizna y chubasco de agua y de forma sólida como nieve, granizo [27].

El diámetro de las gotas varía de acuerdo con la intensidad de la lluvia, desde gotas presentes en la niebla hasta de gran tamaño como las de un aguacero. Por lo general el diámetro en las gotas oscila 1 a 3 mm, en la Tabla 2.1 se puede apreciar una clasificación de la lluvia según sus diámetros.

Tabla 2.1 Clasificación de la lluvia según su diámetro.

Fuente: Diseño y construcción de un simulador de lluvia para estudios hidrológicos [11].

Tipo de lluvia	Diámetro (mm)
Llovizna	0.06 - 0.6
Lluvia	1.0 - 3.0
Aguacero	4.0 - 6.0

A la intensidad de la lluvia se le considera como la cantidad de agua que cae durante un tiempo determinado, su unidad de medida es en milímetros. El caudal de las precipitaciones es muy voluble y cambia rápidamente en condiciones naturales, por lo que en construcción de simuladores se considera un único valor de intensidad a replicar.

2.1.2.1 Velocidad de las gotas de lluvia

En las precipitaciones se puede visualizar velocidades límites o máximas, cuando la resistencia del aire se iguala a la fuerza gravitacional y luego continua en descenso con velocidad constante. En la Tabla 2.2 se puede apreciar las velocidades terminales de lluvia [11], [26].

Tabla 2.2 Velocidad de las gotas de Lluvia.

Fuente: Diseño y construcción de un simulador de lluvia para estudios hidrológicos [11].

Precipitación	Diámetro (mm)	Velocidad Terminal (cm/s)	Tiempo de caída en (m)
Llovizna	0.1	27	1 hora
	0.4	170	10 minutos
	1.00	390	4 minutos
Lluvia	2.00	690	2.3 minutos
	4.00	930	1.8 minutos

2.1.2.2 Ajuste de precipitación en la cabina del simulador

La medición de la precipitación se realiza dentro de la cabina de pruebas de laboratorio, esta cabina tiene una dimensión de 1 m^2 y la ubicación de los aspersores permite que la lluvia simulada caiga de manera uniforme sobre objetos de prueba.

Para la medición de la precipitación, se emplea un recipiente de entre 100 y 750 cm^2 , según lo indica la norma; expuesto a una precipitación durante un tiempo aproximado de 1 min , donde se recolecta la cantidad de agua precipitada y se mide en base al nivel de altura que esta alcanza. Según se modifique la regulación de las válvulas en el sistema, variará el abastecimiento hacia la cabina de prueba [5], [7], [26].

2.2 Detección de descargas parciales

En la actualidad el conocimiento adecuado de las DP en un aislante, permite determinar su vida útil, partiendo del uso de nuevas tecnologías para la detección de DP, con técnicas digitales como SVM, redes neuronales, datos de información, entre otras, capaces de interpretar grandes cantidades de datos y clasificarlos de acuerdo al tipo de DP [14], [16].

El volumen de la cavidad dieléctrica se ve representado por su circuito equivalente en alta tensión alterna, observable en la Figura 2.3, sin considerar las pérdidas, donde se muestra la cavidad, vacuola y capacidad del aislante.

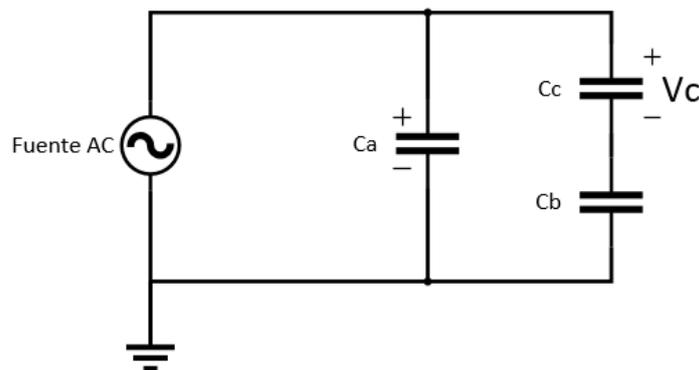


Figura 2.3 Circuito equivalente de las diferentes capacidades en el aislante.
Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

Donde

- **Cb** representa la capacidad por encima y debajo de la cavidad.
- **Cc** capacidad de la vacuola
- **Ca** es la capacidad del resto del aislante.

Este circuito permite la comprensión del proceso de DP de una forma fácil, donde la tensión de la vacuola V_c depende de la fuente AC y el reparto de capacidades se dan en los condensadores C_b y C_c .

Al producirse la descarga parcial en la vacuola, la tensión cae abruptamente, conociéndola como tensión de excitación de la descarga, al tiempo que se da la presencia de una corriente transitoria, lo que ocasiona un crecimiento de tensión progresivo en el aislante de la vacuola, generando más descargas conforme alcanza el nivel de tensión de ignición. Al repetirse muchas veces este proceso genera finalmente una corriente pulsante en el aislamiento lo que provoca la degradación del aislante y la aceleración de la ruptura final, como se puede observar en la Figura 2.4 [16].

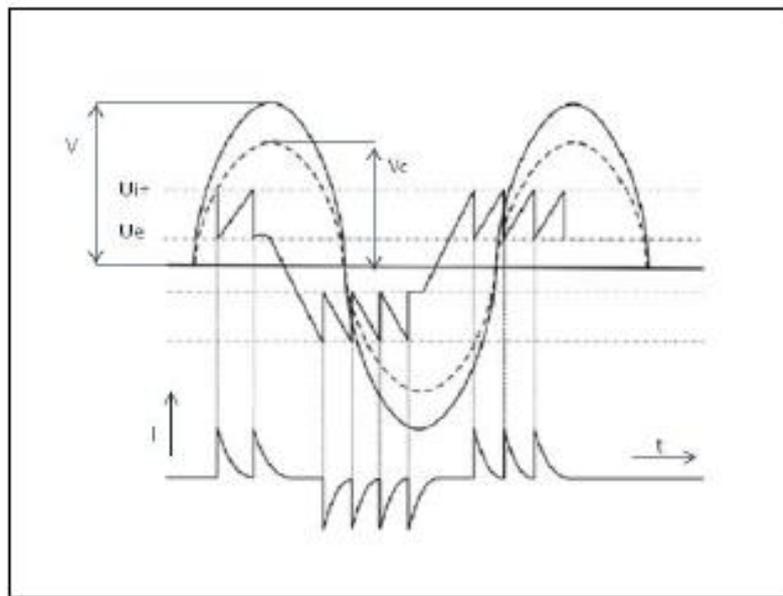


Figura 2.4 Descargas parciales sobre la vacuola del aislante.

Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

El efecto DP sobre el medio en el que actúa, produce una degradación lenta pero continua de los elementos que lo rodean, conduciendo finalmente a la ruptura eléctrica del aislante. El hecho de que un sistema llegue a la ruptura eléctrica dependerá de que las vacuolas experimenten descargas parciales bajo tensiones de operación del sistema, la intensidad de estas, su localización, la clase de DP y su degradación sobre el material aislante. Cuando se llegue hasta punto de perforación, se habrá logrado superar el valor crítico de la rigidez dieléctrica.

Para determinar las DP en un aislamiento se cuenta con los métodos eléctrico y no eléctrico, los cuales presentan diferentes efectos al momento de aplicarlos. Ambos se basan principalmente en el intercambio de energía originada durante la descarga (perdidas dieléctricas, pulsos de corriente, sonido, reacciones físicas y químicas), como se describe en el esquema de la Figura 2.5.

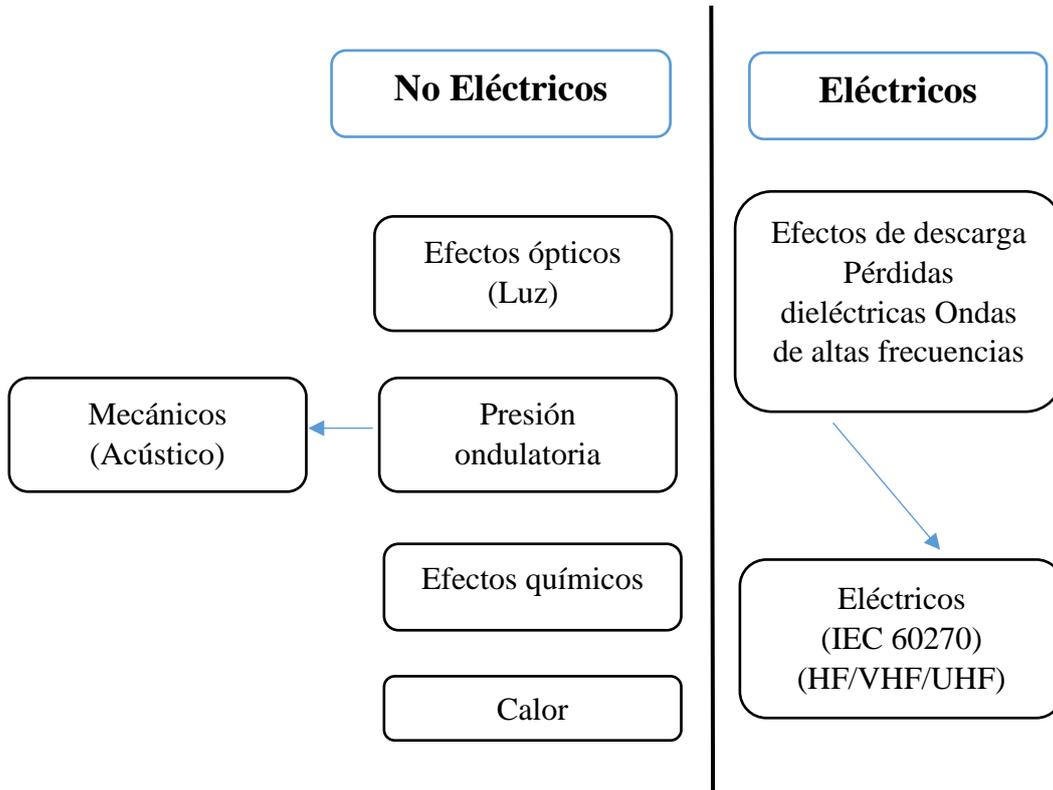


Figura 2.5 Esquema de métodos de detección de DP.
Fuente: Diseño de software off – line para análisis estadístico de descargas parciales [16].

2.2.1 Circuito de detección y adquisición de DP

Para la detección de descargas parciales sobre las muestras de crucetas de PRFV se considera la implementación de la normativa IEC 60270, la cual plantea un circuito detector de descargas parciales de forma convencional directa, como se indicó en el capítulo 1, y observable en la Figura 2. 6, el cual se configuró con los elementos presentes en Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana.

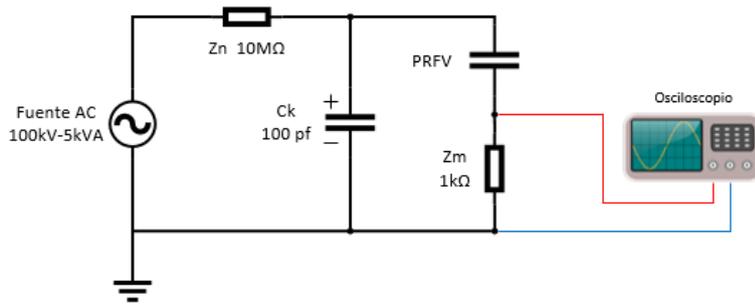


Figura 2.6 Circuito de medición directa de descargas parciales.
Fuente: Autores.

Donde la impedancia Z_m , permite obtener la medición directa de los datos, proporcional a la corriente de fuga y a la carga eléctrica de la muestra en análisis.

En la Tabla 2.3, se detalla las características principales de los elementos que conforman el circuito de medición directa para la detección de DP [3], [5], [14].

Tabla 2.3 Características principales de los elementos del circuito detector de DP.
Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de AT sobre postes de PRFV [3].

Elemento	Marca	Características
Fuente.AC: fuente de alta tensión	Terco	100kV, 5kVA
Zn: impedancia	Terco	10MΩ, 100kV
Ck: capacitor de acoplamiento	Terco	100pf, 100kV
Zm: impedancia de medida	Sec	1000Ω
PRFV: material aislante	Equisplast	7 cm x 7 cm x 0.9 cm
Osciloscopio	Tektronix	Bw de 350 Mhz - 5 gs/s
Laboratorio de alta tensión	Terco	100kV

2.2.2 Proceso para determinar las descargas parciales

Con el circuito detector de descargas parciales, mencionado en el punto 2.2.1, se logra adquirir una señal muestral de 4000 datos, los cuales fueron adquiridos con un osciloscopio configurado acorde a las características de voltaje y las corrientes de DP estimadas. Luego de cada ensayo se procesa la información mediante el software MATLAB. En la siguiente Figura 2.7, se puede observar el esquema de potencia construido en el laboratorio de alta tensión para las pruebas de las muestras.



Figura 2.7 Medición directa de descargas parciales en ambiente seco.
Fuente: Autores.

Con la utilización del mismo circuito detector de DP, se pone en funcionamiento el simulador de lluvia, presente en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana. Las muestras de crucetas de PRFV serán sometidas a condiciones de humedad, como se puede observar en la Figura 2.8, siguiendo la norma IEEE std 4, mencionada en el capítulo 1.



Figura 2.8 Medición directa de descargas parciales en ambiente húmedo.
Fuente: Autores.

2.2.3 Valor de tensión y duración de los ensayos

Los ensayos sobre las diferentes muestras de crucetas de PRVF, inician con un voltaje de 5 kV, y el incremento por niveles es de 5 kV hasta llegar a un valor cercano al cual se producen fallas por conducción de corriente a través del material, estos valores de tensión

son empleados tanto para ambientes secos como húmedos a lo largo de las pruebas. Los tiempos de duración de los ensayos están dados por la norma IEEE std 4, siendo esta última, la que indica un tiempo para la precipitación y resistividad adecuada, como se puede observar en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Principales valores de tensión y tiempo de los ensayos de DP.
Fuente: Autores.

Nivel de tensión (kV)	Ensayo en ambiente seco (min)	Humedecimiento previo ensayo (min)	Ensayo en ambiente húmedo (min)
5	30	15	30
10	30	15	30
15	30	15	-
20	30	-	-
25	30	-	-
30	30	-	-
35	30	-	-

2.2.4 Análisis de la señal muestral y características de las DP

Para el análisis de la señal muestral proveniente de los ensayos de DP sobre el material, se realizaron un total de 10 pruebas por cada nivel de voltaje aplicado entre los electrodos, formando así una base de datos con las características principales de tensión y corriente, llegándose a obtener un total de 70 señales muestrales, como la que se puede observar en la Figura 2.9, las cuales son almacenadas en el osciloscopio para su posterior procesamiento.

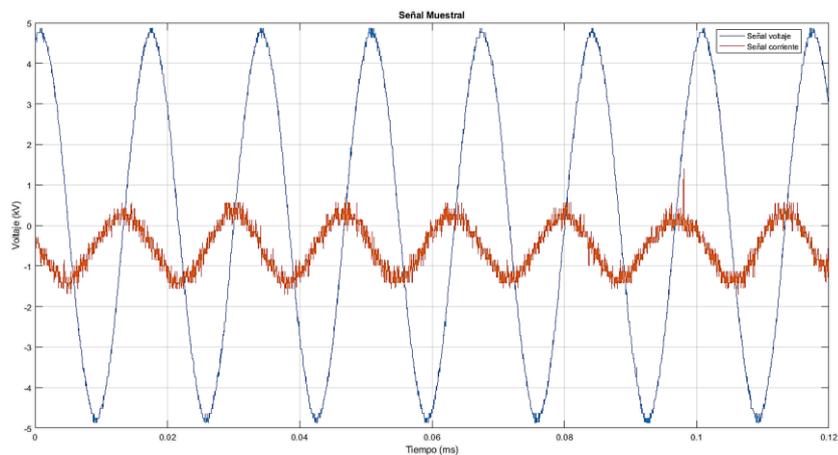


Figura 2.9 Señal de tensión y corriente de adquisición de datos en los ensayos de DP.
Fuente: Autores.

Los datos de corriente obtenidos se procesan mediante MATLAB, pero debido a que las señales adquiridas presentan ruido por la baja resolución del equipo, es necesario implementar un filtro digital FIR para separar las señales e identificar las componentes propias de las DP, como se puede observar en la Figura 2.10.

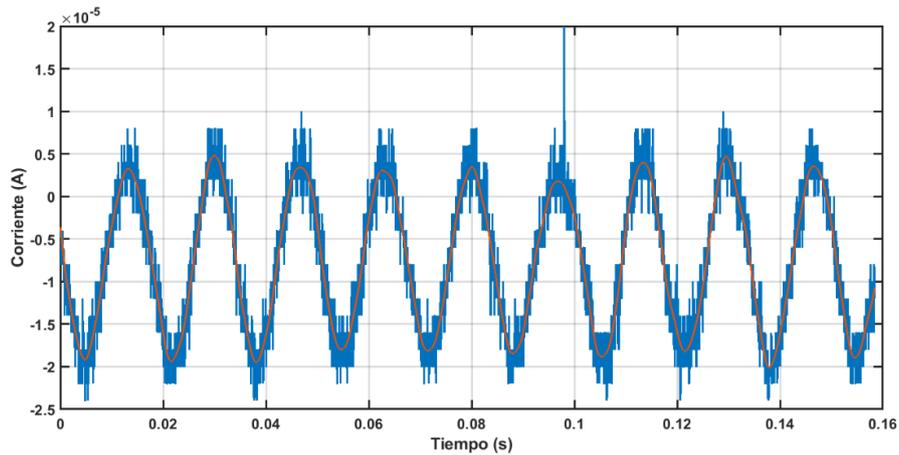


Figura 2.10 Señal implementando el filtro digital sobre los datos adquiridos.
Fuente: Autores.

A estas señales filtradas se les realiza un análisis de espectro de frecuencia, mediante la transformada rápida de Fourier, con este resultado se procede a identificar las frecuencias y perturbaciones no deseadas, con el fin de corregir el desfase y la atenuación que produce el filtro, como se muestra en la Figura 2.11 (Análisis de espectro de frecuencia mediante Transformada rápida de Fourier).

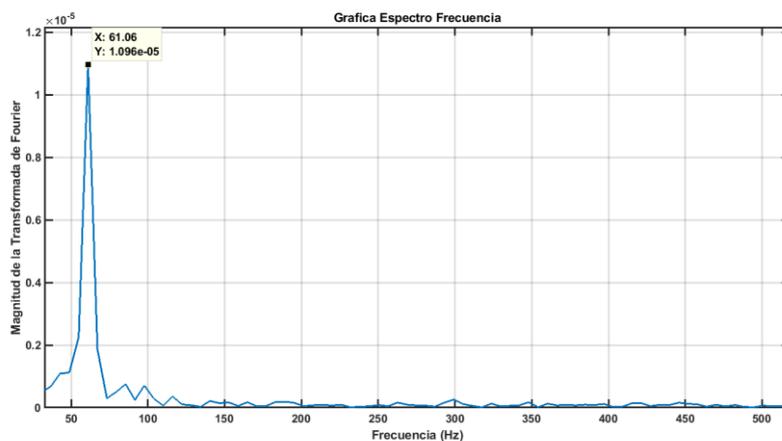


Figura 2.11 Análisis de espectro de frecuencia mediante Transformada Rápida de Fourier.
Fuente: Autores.

Finalmente se crea una señal con cierto grado de perturbaciones, utilizando técnicas de enventanado en MATLAB, con igual frecuencia y amplitud a la gráfica original, una vez obtenidas estas dos señales, una creada y la otra filtrada, se procede a determinar la señal de las descargas parciales, como se puede observar en la Figura 2.12.

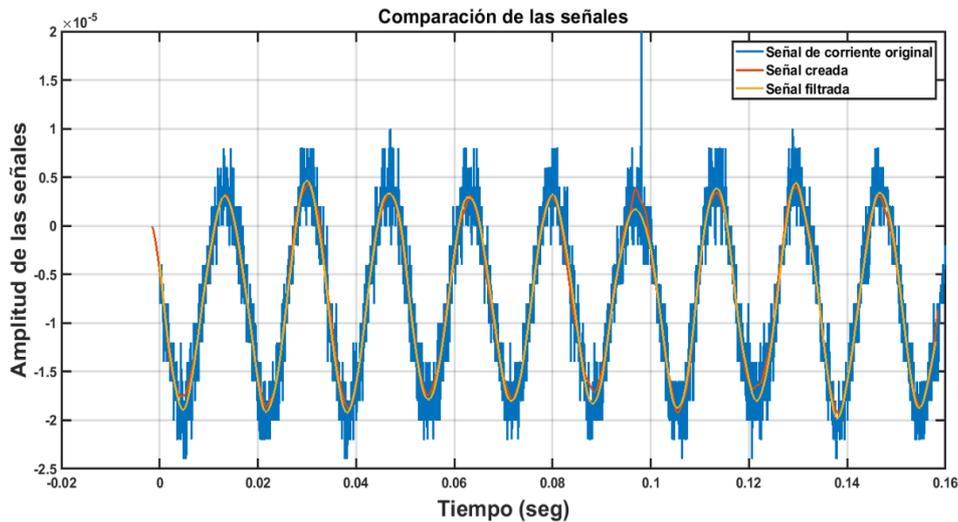


Figura 2.12 Señal de las descargas parciales sobre los ensayos.
Fuente: Autores.

2.3 Determinación de la rigidez dieléctrica

Este tipo de ensayos, permiten establecer el envejecimiento, sobre ciertas partes específicas de las máquinas con el fin de obtener la resistencia al deterioro de los equipos, mejorando así el comportamiento de los sistemas y su diseño. Los fabricantes de máquinas eléctricas y diseñadores de aislamiento someten los objetos aislantes a un funcionamiento superior a lo normal, buscando acelerar su deterioro a través de la tensión, la corriente, la temperatura y esfuerzos mecánicos, para luego ser analizados y con los resultados estimar la vida útil de los mismos.

2.3.1 Resistencia al deterioro eléctrico en aislantes

Cada aislante presenta una rigidez dieléctrica que se pierde con el tiempo, en muy corto plazo si es que se someten a tensiones elevadas de forma continua, llegando incluso a perforar el aislamiento. Es por lo que a la rigidez dieléctrica se la considera como la tensión de ruptura dividida por el espesor del aislamiento.

Existen pruebas de resistencia eléctrica mediante DP, que aplican una tensión superior a las condiciones nominales sobre los sistemas de aislamiento y miden el tiempo hasta que

se produzca el fallo. Como se trata de ensayos destructivos, lo que buscan es adquirir continuamente datos de las DP que se produzcan en el objeto analizado, para una vez terminado, sacar conclusiones del comportamiento de la muestra [28].

Mediante esta prueba se obtiene la resistencia de envejecimiento por DP en hilos de cobre, aceite aislante, cables de alta tensión, láminas con aislamiento de ranura, postes reforzado de fibra de vidrio. Todo ajustado a la realidad mediante el uso de mecanismos de ruptura como:

- Contaminación
- Humedad
- Corrientes variables
- Vibraciones
- Variación de Temperatura

En esta investigación se buscó realizar ensayos hasta la vida útil de las muestras, tomar los datos correspondientes y posteriormente lograr compararlos entre cada muestra analizada, para establecer algunos parámetros de deterioro y el voltaje de ruptura máximo en cada ensayo de prueba.

2.3.2 Empleo de la normativa ASTM D - 149

La utilización de la norma ASTM D-149, permitirá estimar la rigidez dieléctrica en las muestras de aislante sólido, mediante la obtención de la tensión de ruptura y la distancia que se encontraron los electrodos, al momento de los ensayos, la cual podría ser determinada mediante la Ecuación 2.1 [3].

$$Rigidez\ dieléctrica\ \left[\frac{kV}{mm} \right] = \frac{Voltaje\ disruptivo\ [kV]}{Espesor\ [mm]} \quad (2.1)$$

2.3.2.1 Método A prueba de corto plazo

En cada prueba se aumentará el voltaje de forma ascendente desde cero hasta que se produzca la destrucción de la muestra, para esto se consideran dos tipos de crucetas, cada una con un compuesto diferente de fabricación, bajo la configuración de electrodos más crítica que es la punta – plano, como se muestra en la Figura 2.13 [3].



Figura 2.13 Configuración crítica de los electrodos.
Fuente: Autores.

2.3.3 Cantidad de muestras a ser analizadas

Para ejecutar las pruebas, se determina el número de muestras, en base a la cantidad de producción de crucetas al mes, dando una población total de 3600 unidades, que al ser ingresadas en la Ecuación 2.2, produce el resultado de la cantidad de muestras a ser analizadas.

$$n = \frac{z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{e^2(N - 1) + z^2 \cdot p \cdot q} \quad (2.2)$$

Donde:

- N → número de población
- n → cantidad de muestras
- p → probabilidad a favor
- q → probabilidad en contra
- z → nivel de confianza
- e → error de muestreo

2.3.4 Degradación del aislamiento

Una vez sometidas las muestras a las diferentes tensiones, especificadas en el apartado 2.2.3, durante las pruebas, se utilizó el equipo Fluke 1550C/1555, conocido como medidor de alto rango, Megóhmetro o Megger, que permite determinar de forma directa

la resistencia de aislamiento, índice de polarización dieléctrica y la relación de absorción dieléctrica. En la Figura 2.14 se presenta una descripción grafica del equipo [29].

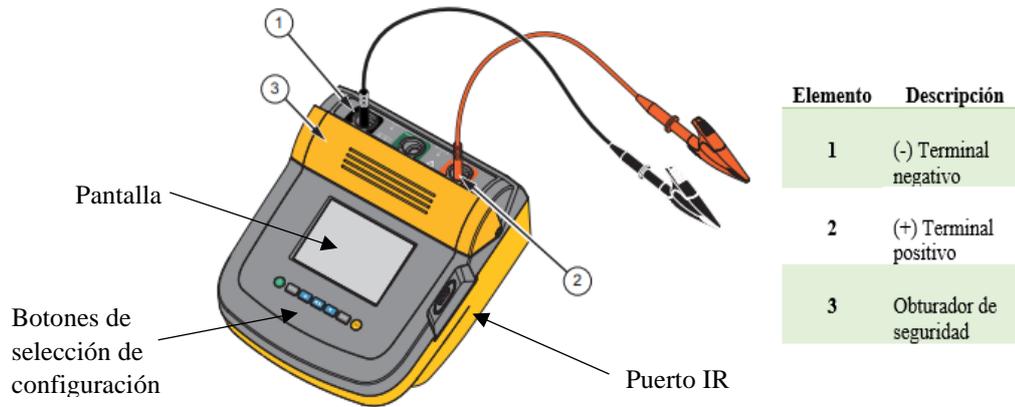


Figura 2.14 Modelo de equipo Fluke 1550C/1555.
Fuente: Autores.

Siendo el índice de polarización dieléctrica (IP), la división de dos valores de IR, en dos diferentes momentos, como se determina en la Ecuación 2.3, su valor resultante es adimensional [28], [30].

$$IP = \frac{IR_{10\ min}}{IR_{1\ min}} \quad (2.3)$$

Los valores recomendados para los ensayos se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Parámetros de prueba del índice de polarización dieléctrica.
Fuente: Determinación de los protocolos de prueba en alta tensión a ser aplicados en equipos y materiales utilizados en nivel de hasta 22kV [30]

Condición del aislamiento	Resultado de IP
Deficiente	< 1
Cuestionable	1 a 2
Aceptable	2 a 4
Excelente	> 4

En cambio, al índice de absorción dieléctrica, se le conoce como el cociente del valor de resistencia de aislamiento, tomada a los 60 segundos para el valor de la resistencia a los 30 segundos, como se expresa en la Ecuación 2.4.

$$DAR = \frac{R_{60\ seg}}{R_{30\ seg}} \quad (2.4)$$

Esta prueba permite medir la calidad del aislamiento, considerando que a medida que aumenta la resistencia se tiene mejor condición de aislante el tiempo transcurrido. Los valores recomendados para los ensayos se muestran en la Tabla 2.6 [30].

Tabla 2.6 Parámetros de prueba del índice de absorción dieléctrica.
Fuente: Guía de la medición de aislamiento [28].

Condición del aislamiento	Resultado de DAR
Deficiente	< 1
Aceptable	1 a 1.4
Excelente	1.4 a 1.6

La tensión de ensayo ocupada por el equipo fue de 10 kV DC, con una duración de prueba de 10 min por muestra, donde se pudo obtener valores promediados de la resistencia de aislamiento, así como los valores del índice de polarización (PI) y la relación de absorción dieléctrica (DAR), como se puede observar en la Figura 2.15 en forma de barras.

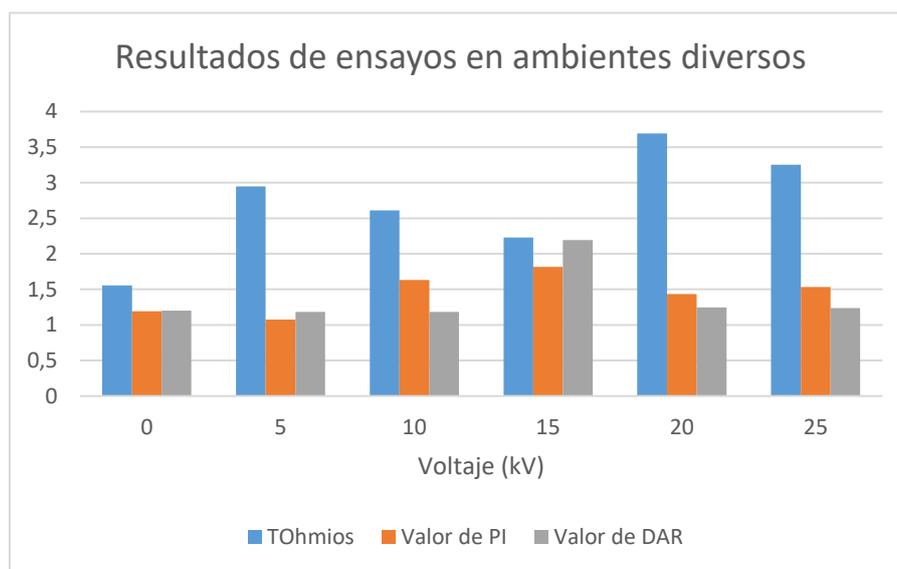


Figura 2.15 Valores de la resistencia de aislamiento, PI y DAR en base a las pruebas.
Fuente: Autores

2.4 Método del nivel básico de aislamiento (BIL)

Este método de ensayo se realiza bajo condiciones simuladas de impulso tipo rayo, usando electrodos simples o modelos funcionales. La estimación de las características de tensión versus el tiempo, no se obtiene mediante los cálculos o el conocimiento teórico del comportamiento de los distintos materiales analizados, sino que se basa en ensayos sistemáticos continuos en el laboratorio, donde se manejan niveles de aislación como:

- Nivel de aislación a frecuencia industrial de corta duración (50 Hz, 1 minuto)
- Nivel de aislación a impulsos atmosféricos ($1,2 \mu s / 50 \mu s$)
- Nivel de aislación a impulsos de maniobra ($250 \mu s / 2500 \mu s$)

El proceso consiste en impulsos de onda completa de forma estándar, según lo indica la norma de $1,2 \mu s$ por $50 \mu s$ sobre las muestras en diferente polaridad positiva o negativa. Con valores de tolerancia según lo especifica la Tabla 2.7 [12], [31].

Tabla 2.7 Parámetros de tolerancia de la forma estándar.

Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de AT sobre postes de PRFV [3]

Descripción	Tolerancia
Valores de cresta	$\pm 5 \%$
Tiempo de frente	$\pm 30 \%$
Tiempo de cola	$\pm 20 \%$

Los voltajes de impulso se producen sobre cualquiera de los dos circuitos que se muestran en la Figura 2.16 cuyos valores de los elementos y características que describen la curva, dependen del tiempo y las constantes a lo largo del mismo.

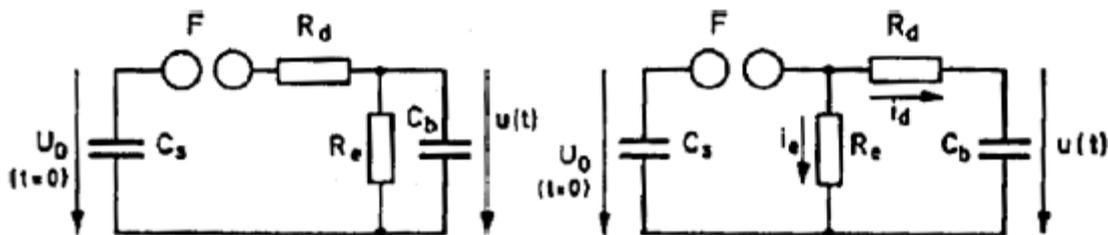


Figura 2.16 Circuitos de tensión de ensayo de impulso tipo rayo.

Fuente: Terco

Donde

- C_s : Capacitor de impulso.
- C_b : Capacitor de carga.
- R_d : Resistencia delantera y resistencia de cola.

Para las pruebas en el laboratorio se construyó el circuito especificado en la Figura 2.17 y la Figura 2.18, y se utilizó en conjunto con la cámara de lluvia para establecer el Nivel Básico de Aislamiento [8].

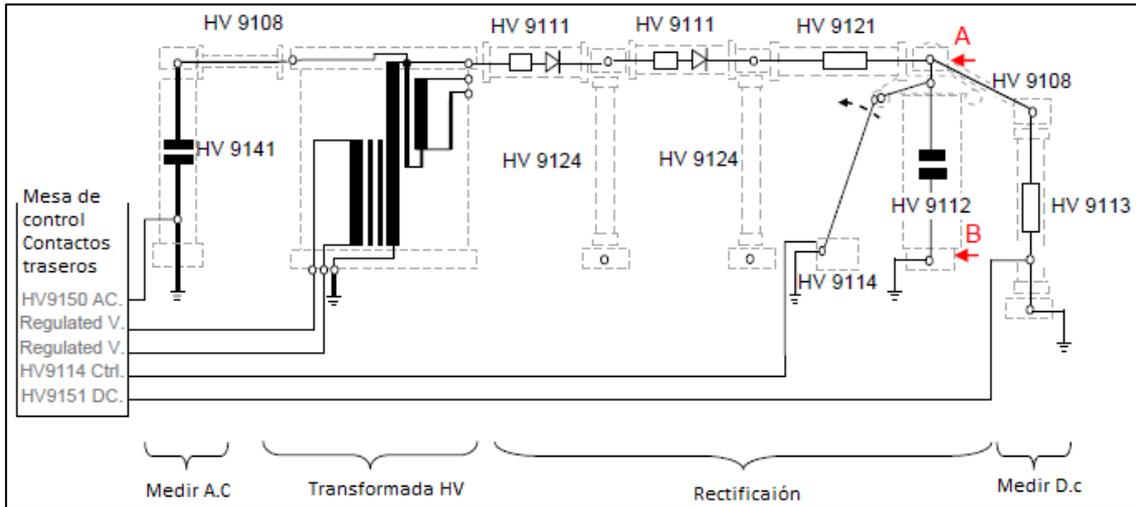


Figura 2.17 Diagrama utilizado para recepción del BIL mediante ensayos tipo rayo - parte 1
Fuente: Ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espirométricas en el laboratorio de A.T de la UPS [8].

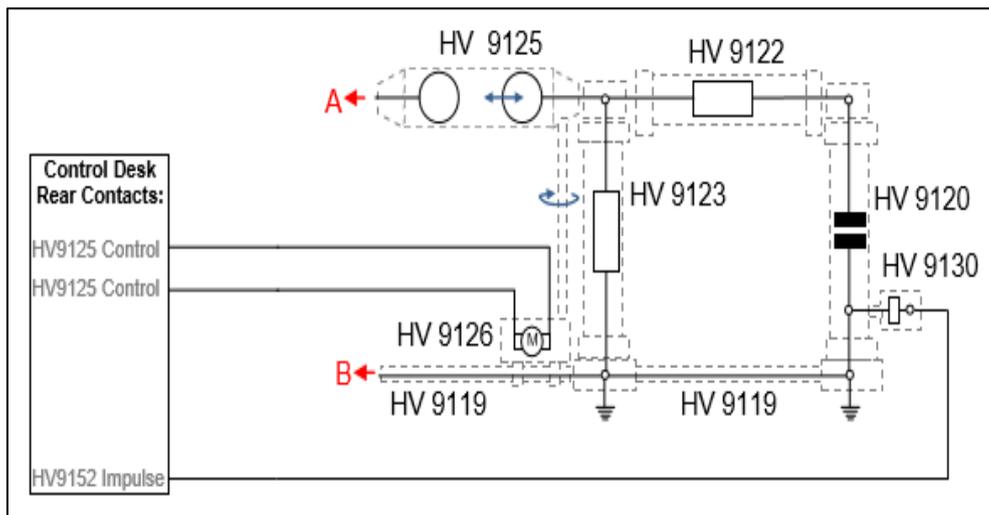


Figura 2.18 Diagrama utilizado para recepción del BIL mediante ensayos tipo rayo - parte 2
Fuente: Ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espirométricas en el laboratorio de A.T de la UPS [8].

Para entender mejor el funcionamiento del diagrama, en la Figura 2.19 se expresa de forma completa el montaje del circuito con la cruceta de PRFV.

SISTEMA QUE SIMULA DESCARGAS ATMOSFERICAS (RAYOS) SOBRE LAS L.T.

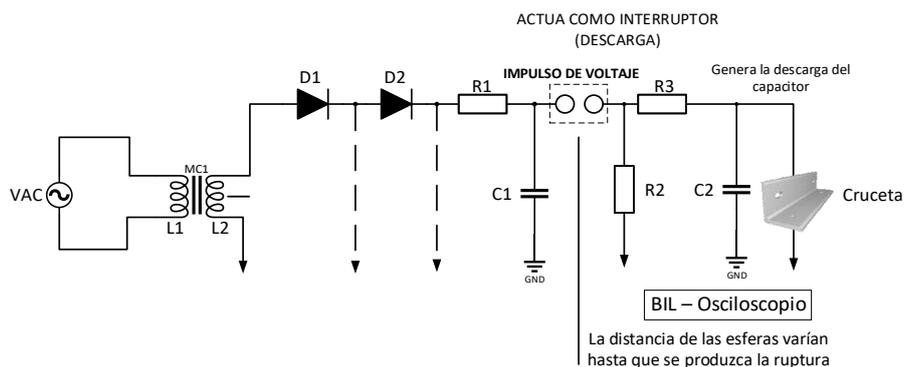


Figura 2.19 Montaje del circuito con la cruceta de PRFV.
Fuente: Autores

2.4.1 Configuración de los electrodos

La configuración U50% dentro de campos no uniformes, utiliza electrodos punta-punta y punta-placa. Este factor Kg para una configuración punta-placa es 1 y para los demás electrodos se estima con la Ecuación 2.5 [3].

$$Kg = e^{\frac{0.5h}{h+d}} \begin{matrix} \rightarrow h: \text{altura del electrodo a tierra.} \\ \rightarrow d: \text{distancia de separación interelectródica.} \end{matrix} \quad (2.5)$$

En cuanto a la determinación de la tensión de flameo en esta configuración se ocupa la Ecuación 2.6.

$$U_{50\%} (\text{punta-punta}) = kg \cdot U_{50\%} (\text{punta-placa}) \quad (2.6)$$

En la Tabla 2.8 se muestran las distintas configuraciones de electrodos con su valor respectivo.

Tabla 2.8 Configuración de los electrodos y el valor del factor Kg.

Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de AT sobre postes de PRFV [3].

Configuración de electrodos	Factor electrogeométrico (kg)
Punta - Punta	1
Conductor - Placa	1.15
Conductor - Ventana	1.2
Conductor estructura	$1.1 + \frac{0.3}{1 + \frac{w}{d}}$

2.4.2 Método y tensiones de prueba mediante U50%

2.4.2.1 Método de ensayo de niveles múltiples (Sobretensión de flameo U50%)

Se lo realiza con ondas de impulso tipo rayo, con un total de 15 impulsos de tensión a diferentes niveles, para esto se necesita definir con anterioridad el valor de tensión inicial (V_0) y un incremento (ΔV) que no exceda el 3% de la tensión de chispa U50%. Considerando a la tensión de flameo como el voltaje de descarga disruptivo sobre un aislante, se puede determinar el BIL y BSL, de una forma probabilística según la Ecuación 2.7.

$$V = (1 + z\sigma_{p.u}) \cdot U_{50\%} \quad (2.7)$$

Siendo:

- V : La tensión en kV para cualquier probabilidad de DP
- $U_{50\%}$: La tensión de flameo con una probabilidad de DP del 50%
- z : Parámetro estadístico variable dependiente de la probabilidad de descarga
- $\sigma_{p.u}$: Desviación estándar en pu

Se considera una desviación estándar según la norma IEEE, con un valor de 3% para impulso tipo rayo (BIL) y del 5% para impulsos de tipo maniobra BSL, tal como se indica en la Ecuación 2.8[3].

$$\sigma_{p.u} = \frac{\sigma}{U_{50\%}} \quad (2.8)$$

Finalmente, el nivel de aislamiento BIL y BSL de acuerdo con la tensión de flameo U50% se determina por las Ecuaciones 2.9 y 2.10.

$$BIL = 0.9616 \cdot U_{50\%} \quad (2.9)$$

$$BSL = 0.936 \cdot U_{50\%} \quad (2.10)$$

2.4.2.2 Procedimiento para ensayo de niveles múltiples

Se inicia con un impulso de tensión inicial, donde se verifica que no se produzca flameo en el nivel dado, para luego incrementar el ΔV hasta terminal los 15 impulsos. Según se especifica en la Figura 2.20 que contiene el esquema de proceso.

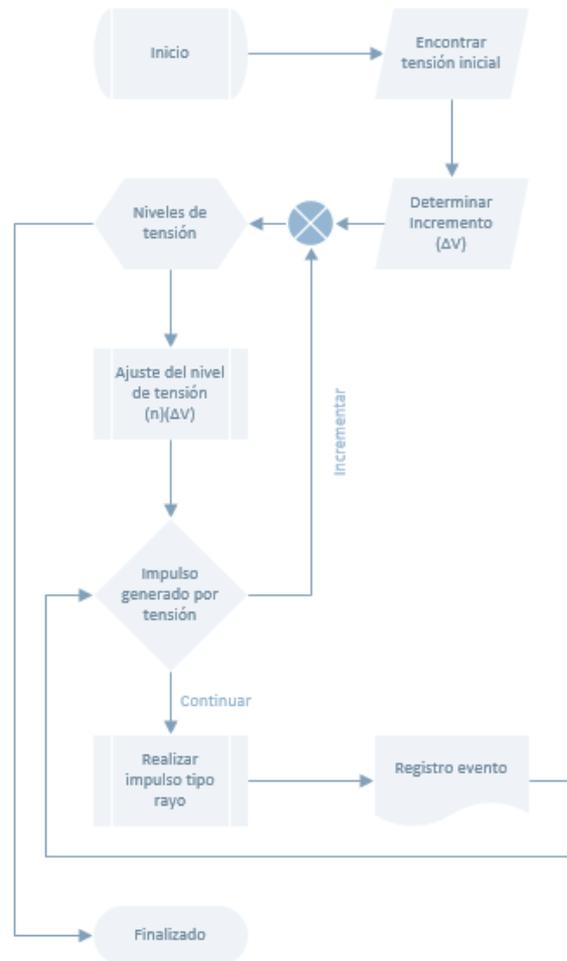


Figura 2.20 Esquema para ensayos de niveles múltiples.

Fuente: Determinación de características de aislamiento en laboratorio de A.T sobre postes de PRFV [3].

CAPÍTULO 3. - DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La finalidad de este capítulo es presentar los resultados obtenidos al realizar los diferentes ensayos en ambientes diversos, a fin de poder determinar las condiciones adecuadas de precipitación y resistividad del agua, la corriente de fuga presente en las descargas parciales, que ocasionan la ruptura del material aislante y una representación gráfica de la misma. Además, se busca determinar la resistencia del material y su rigidez dieléctrica. Para finalizar, se determina el nivel básico de aislamiento, conocido como BIL, a partir de los ensayos realizados.

3.1 Precipitación adecuada dentro del área donde se realizan los ensayos

Para ambientes con humedad, todos los ensayos están basados en la norma IEEE std 4, para medir el nivel de precipitación se recomienda el uso de un recipiente uniforme que facilite la medición de la altura del nivel de agua, como el mostrado en la Figura 3.1, que fue utilizado para estimar los niveles de precipitaciones presentes dentro de la cámara de pruebas, este recipiente de 15 cm x 15 cm de medida, estuvo bajo la lluvia simulada durante 1 min. Tras esta prueba se pudo determinar que, si la presión del equipo simulador de lluvia se mantenía a 15 PSI, sobre la pieza de ensayo caían continuamente 1,82 mm/min de agua.



Figura 3.1 Recipiente de vidrio para estimación de la precipitación en pruebas de lluvia.

Fuente: Autores

Se comprobó también que, para presiones mayores de 30 PSI, el valor de precipitación es siempre el mismo, debido a la pulverización comprimida dentro de la cámara, dado el llamado efecto de neblina.

3.1.1 Medición y ajuste de resistividad del agua

Como punto de partida se empleó un medidor de conductividad como se muestra en la Figura 3.2, de los laboratorios de química de la UPS-Cuenca. El valor inicial del agua filtrada fue 63.2 uS/cm. Al ser las propiedades de conductividad y resistividad, inversas entre sí, resulta necesario transformar y ajustar las unidades para poder cotejar el valor medido con el valor que dictamina la normativa IEEE std 4; entonces, resulta que 63.2 uS/cm equivale a 158.2 $\Omega \cdot m$.



Figura 3.2 Equipo medidor de conductividad UPS-Cuenca.
Fuente: Autores

Sabiendo que el requerimiento para el agua es tener resistividad de $100 \pm 15 \Omega \cdot m$, se establece que para nuestra instrumentación que mide conductividad, es necesario ajustar la composición del agua hasta obtener $100 \pm 15 \text{ uS/cm}$ [7].

Para el caso considerado fue necesario realizar un ajuste para reducir la resistividad, es decir, se necesita que el agua sea mejor elemento conductor, para que se asemeje al agua de lluvia, esto se logrará agregando sólidos disueltos, es decir cloruro de sodio, en el agua.

Para tener control sobre la cantidad de cloruro de sodio que se necesita adicionar por unidad de agua filtrada, se preparó una solución salina al 5% con 95 ml de agua destilada y 5 gramos de sal común.

Un valor próximo al requerido se obtuvo cuando a una cantidad de 400 ml de agua filtrada se le agregó 0.1 ml de solución salina al 5%. Como se muestra en la Figura 3.3, esto produjo una medición de 97.7 uS/cm, lo que equivale a $102.35 \Omega \cdot m$. Así se determinó que, al recipiente de 150 litros, es necesario agregar 37.5 ml de solución salina al 5%.

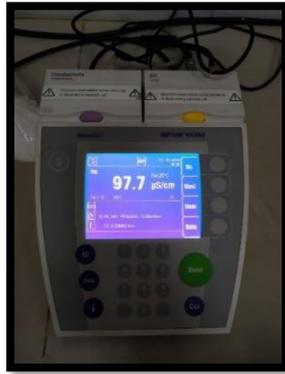


Figura 3.3 Valor de conductividad equivalente del equipo del laboratorio de química UPS-Cuenca.
Fuente: Autores

3.2 Resultados de las corrientes y niveles de tensión aplicados durante los ensayos de DP sobre las crucetas de PRFV

En la Figura 3.4 se muestra el valor de los resultados en forma de barras, con el promedio de las corrientes de fuga por cada nivel de tensión de prueba, cada nivel contiene un total de 10 ensayos, tanto para el ambiente húmedo como el seco.

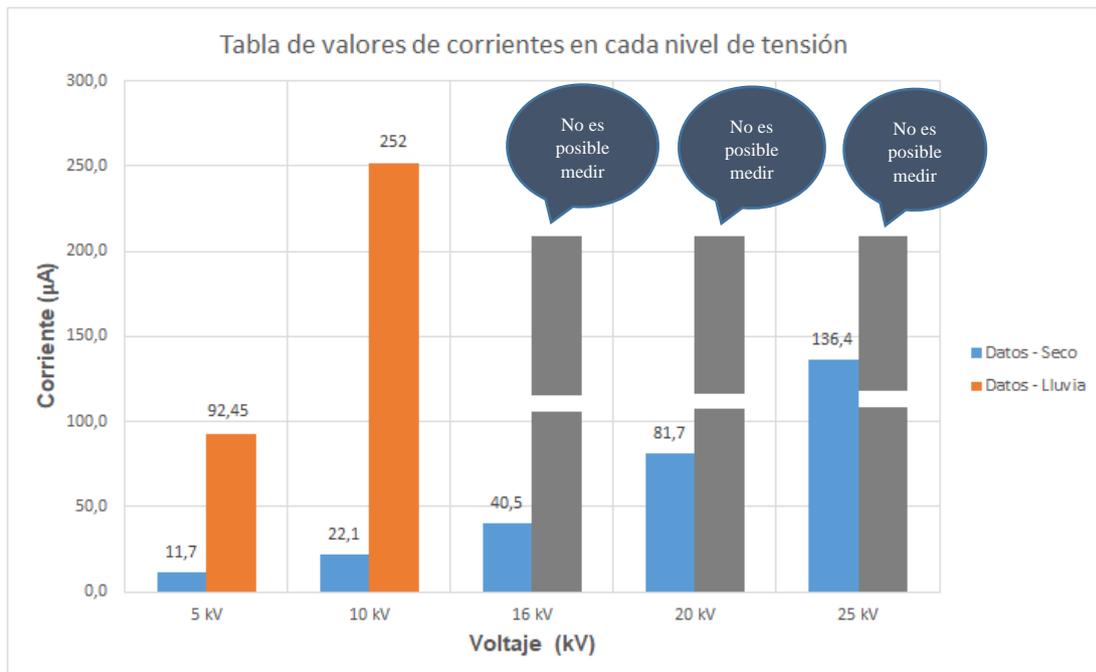


Figura 3.4 Valores comparativos de corrientes en cada nivel de tensión aplicada.
Fuente: Autores

Se puede observar que, para las pruebas en lluvia, si se sobrepasa los 10 kV se presentan deformaciones en la señal de voltaje de entrada, y su medida no sufre ninguna variación al incrementar su valor, por lo que en ese momento había gran cantidad de corriente de

fuga en la cruceta, provocando conducción en el material de prueba, sin poder ser registrada. Este estado previo a la ruptura de la cruceta ocasiona que no se pueda seguir midiendo para los demás niveles de tensión, debido a la posibilidad de que se presenten picos de corriente que podrían dañar los equipos de medición del laboratorio de alta tensión.

3.2.1 Gráficas de corriente y DP aplicando los diferentes niveles de tensión en ambiente seco

Por cada nivel de tensión, se pudo determinar las diferentes gráficas de corriente de fuga, las DP presentes por cada prueba, para finalmente visualizar los resultados utilizando el programa MATLAB.

3.2.1.1 Muestra tomada para una tensión de 5 kV rms

La Figura 3.5 presenta una señal de color azul, que corresponde a la corriente de fuga en la cruceta, con una magnitud notable de ruido, para diferenciar las DP se emplea el filtro digital FIR, lo que genera una onda muy distinta con la señal obtenida de los ensayos, permitiendo apreciar una señal de corriente de fuga filtrada. La amplitud es de $11,7 \mu A$ como se puede observar también en la Figura 3.4.

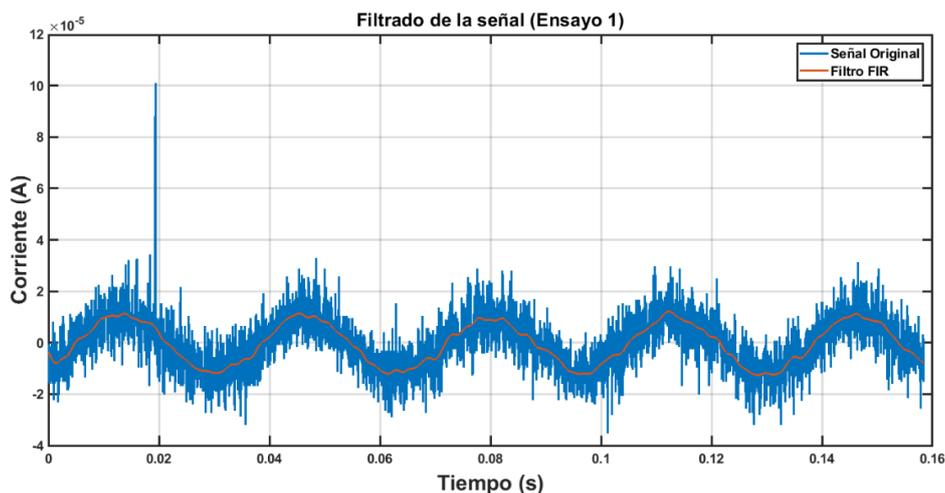


Figura 3.5 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 5 kVrms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.6 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde se puede deducir que las corrientes de fugas son mínimas, con la presencia de este nivel de tensión y el ruido presente en los ensayos no produce descargas parciales.

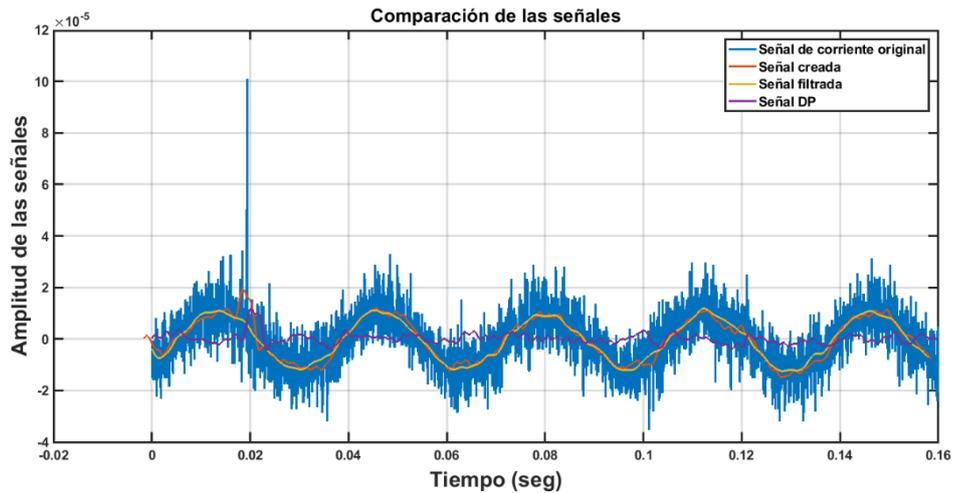


Figura 3.6 Señal de DP (morada) a una tensión de 5 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.1.2 Muestra tomada para una tensión de 10 kV rms

En la Figura 3.7 se muestra la señal filtrada de la corriente de fuga sobre la pieza de ensayo, con una tensión de 10 kV rms, en la misma figura se puede observar que se presentan corrientes desde $17,8 \mu\text{A}$ hasta $23,9 \mu\text{A}$, dando como resultado que, a este nivel de tensión no se presentan valores de corrientes significativas.

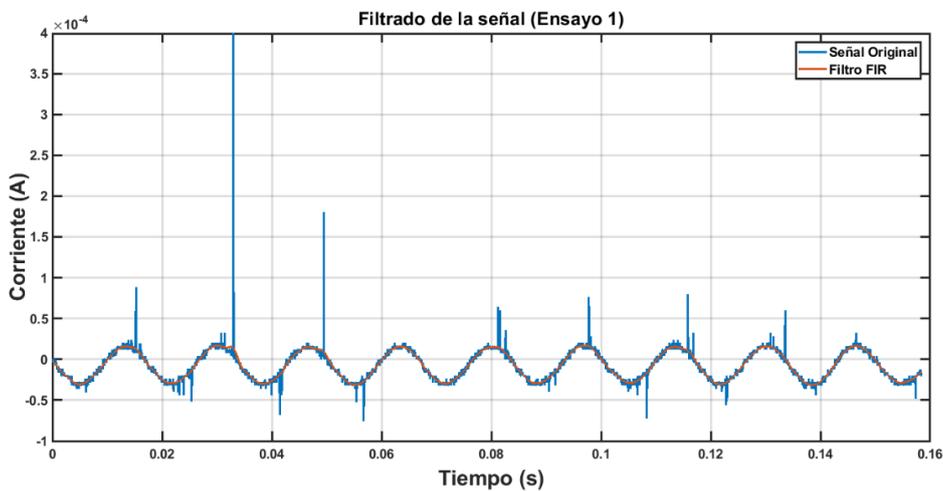


Figura 3.7 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 10 kVrms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.8 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde para una tensión de 10 kV rms, se presentan únicamente DP superficiales, con valores de corrientes poco relevantes, que siguen sin producir descargas parciales.

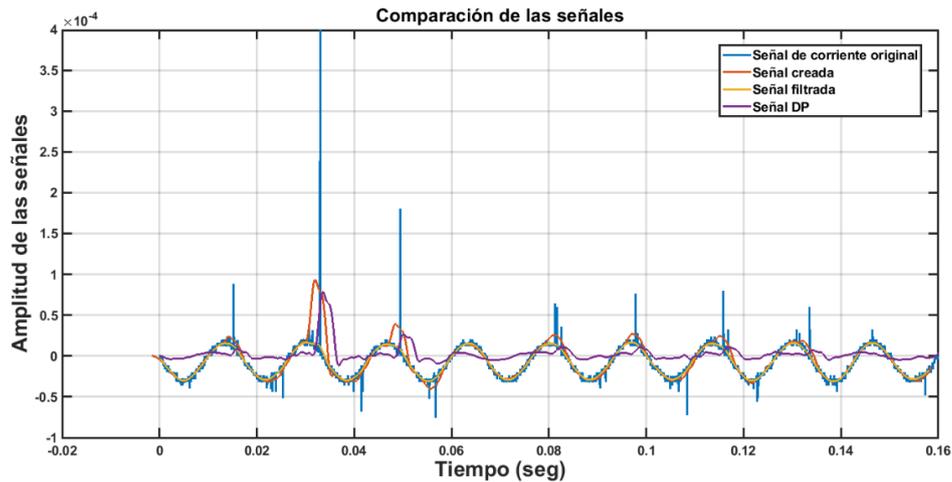


Figura 3.8 Señal de DP (morada) a una tensión de 10 kV rms.

Fuente: Autores

3.2.1.3 Muestra tomada para una tensión de 15 kV rms

En la Figura 3.9 se muestra la señal filtrada de la corriente de fuga sobre la pieza de PRFV, con una tensión de 15 kV rms, se puede apreciar que las corrientes desde $37,8 \mu A$ hasta $45,1 \mu A$, dando como resultado que, a este nivel de tensión, siguen sin presentarse valores de corrientes significativas, como se puede observar en la Figura 3.4.

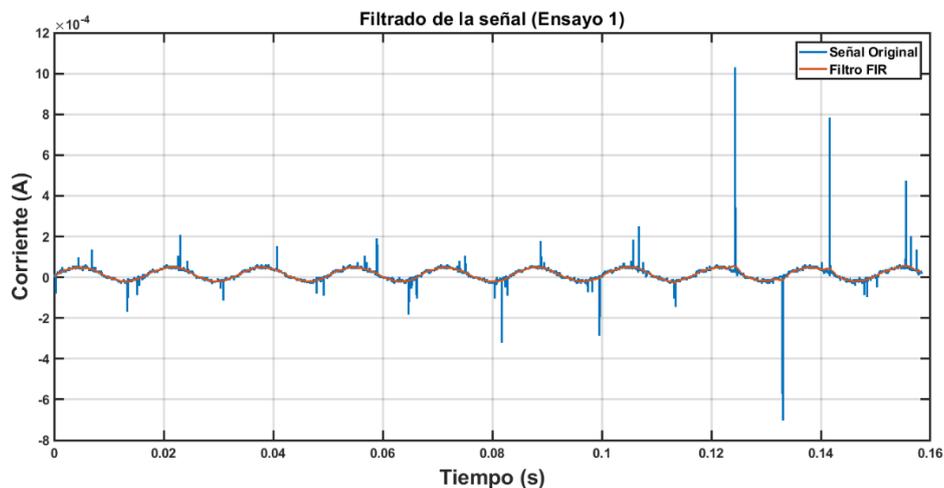


Figura 3.9 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 15 kV rms.

Fuente: Autores

En la Figura 3.10 se puede notar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), en la cual se muestra que para una tensión de 15 kV rms, siguen presentándose únicamente DP superficiales.

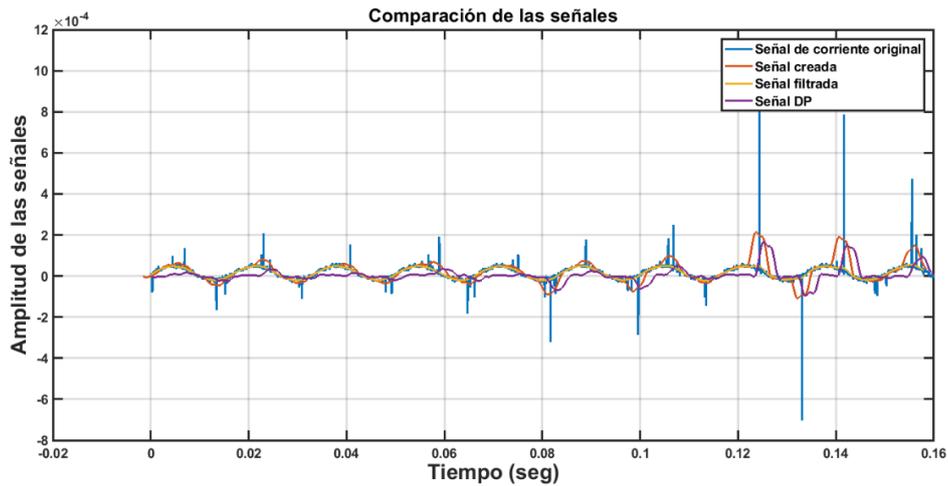


Figura 3.10 Señal de DP (morada) a una tensión de 15 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.1.4 Muestra tomada para una tensión de 20 kV rms

La señal filtrada de la corriente de fuga sobre la cruceta, con una tensión de 20 kV rms es mostrada en la Figura 3.11, asimismo se ve que las corrientes van desde $68 \mu A$ hasta $93 \mu A$, lo cual representa que, a este nivel de tensión existe la presencia de valores de corrientes significativas, como se puede observar en Figura 3.4.

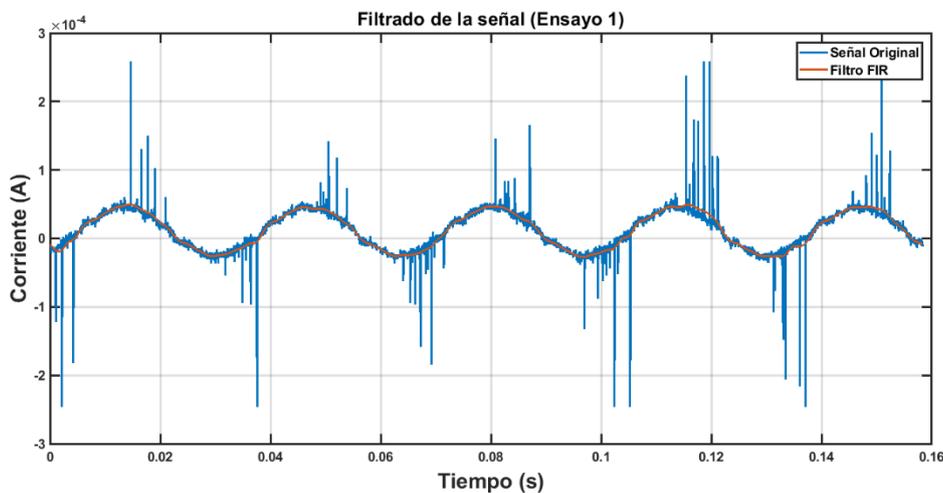


Figura 3.11 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 20 kV rms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.12 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde para una tensión de 20 kV rms, los valores de corriente ya son más significativos, presentándose pequeñas presencias de DP.

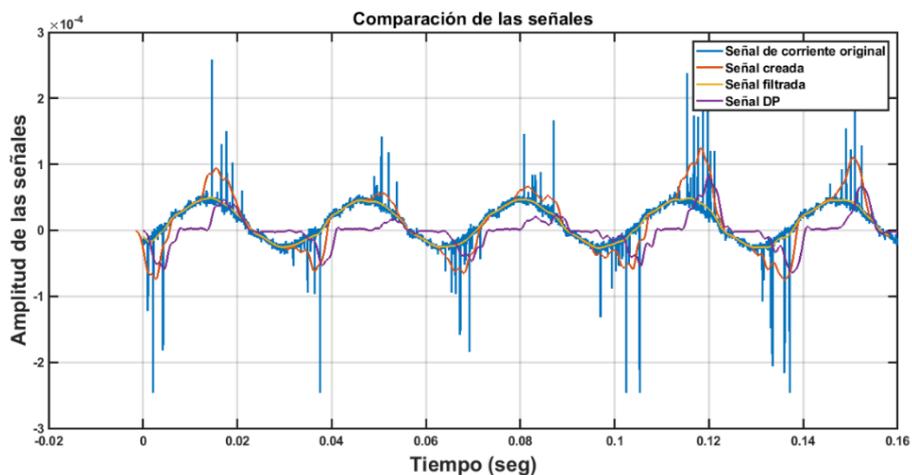


Figura 3.12 Señal de DP (morada) a una tensión de 20 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.1.5 Muestra tomada para una tensión de 25 kV rms

La señal filtrada de la corriente de fuga sobre la cruceta de PRFV, con una tensión de 25 kV rms son observables en la Figura 3.13, los datos de esta gráfica representan también corrientes que van desde $120 \mu A$ hasta $160 \mu A$, lo cual significa que, a este nivel de tensión existe la presencia de valores de corrientes significativas.

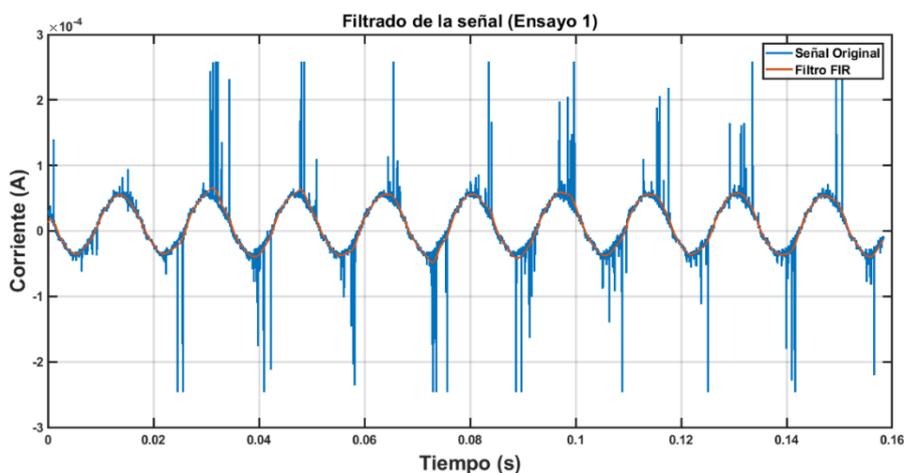


Figura 3.13 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 25 kV rms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.14 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde para una tensión de 25 kV rms, los valores de corriente son a un más significativos, presentándose notorias DP, de tal forma que, al aumentar la tensión, se presentara un arco

eléctrico entre los electrodos, los mismo que no pueden ser cuantificados por seguridad de los equipos de medición.

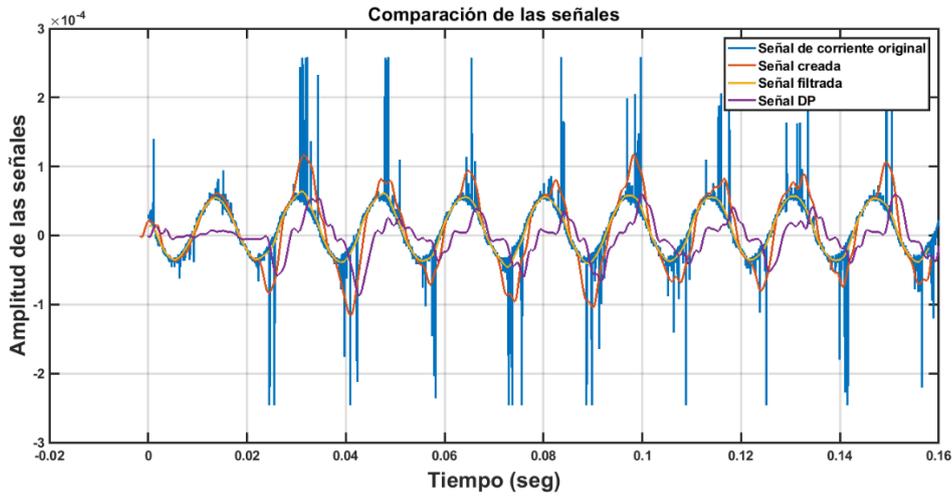


Figura 3.14 Señal de DP (morada) a una tensión de 25 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.2 Resultados de la medición y detección de DP en ambiente húmedo

3.2.2.1 Muestra tomada para una tensión de 5 kV rms

La señal filtrada de la corriente de fuga sobre la cruceta con una tensión de 5 kV rms es visualizada en la Figura 3.15, en la cual se presentan corrientes desde $86.8 \mu A$ hasta $100.8 \mu A$, siendo destacable que, a este nivel de tensión, sí existen valores de corrientes significativas.

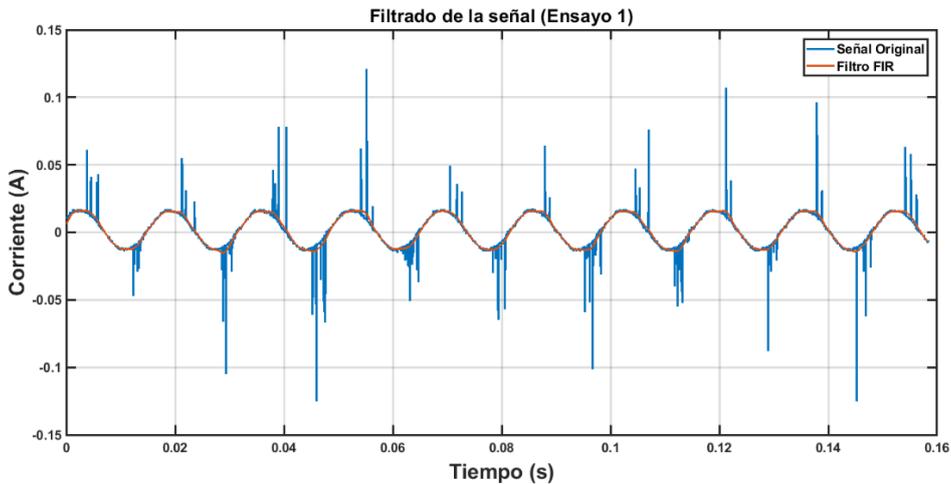


Figura 3.15 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 5 kVrms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.16 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde se puede deducir que las corrientes de fugas son mínimas, con la presencia de este nivel de tensión y el ruido presente en los ensayos no produce descargas parciales.

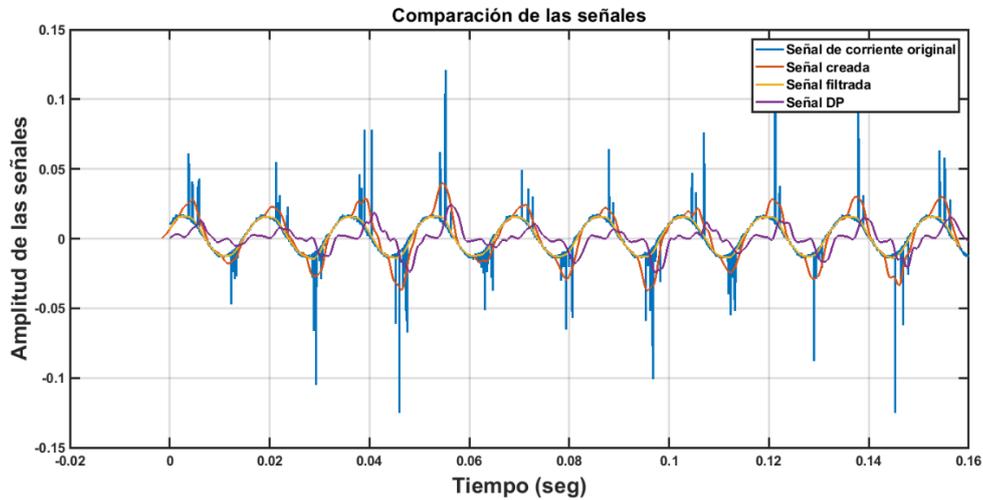


Figura 3.16 Señal de DP (morada) a una tensión de 5 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.2.2 Muestra tomada para una tensión de 10 kV rms

La señal filtrada de la corriente de fuga sobre la cruceta con una tensión de 10 kV rms es observada en la Figura 3.17, donde también se representan valores de corriente desde $191 \mu A$ hasta $525 \mu A$, siendo esto una muestra de que, a este nivel de tensión, existe la presencia de valores de corrientes significativas, como se puede observar en la Figura 3.4.

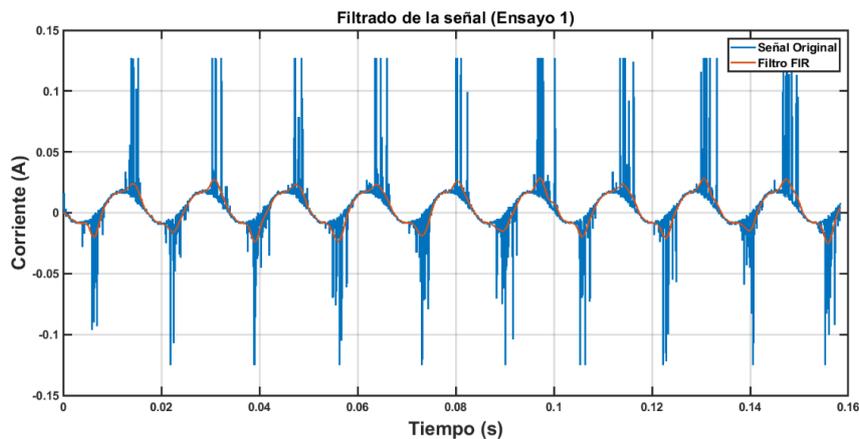


Figura 3.17 Señal de corriente original (azul) y filtrada (roja) a una tensión de 10 kV rms.
Fuente: Autores

En la Figura 3.18 se puede apreciar la diferencia entre la señal filtrada (color amarillo) y la señal creada (color rojo), obteniendo como resultado la señal de DP (color morado), donde los valores de corriente son a un más significativos, presentándose DP, de tal forma que, al aumentar la tensión, se presentara un arco eléctrico entre los electrodos, los mismo que no pueden ser cuantificados por seguridad de los equipos de medición.

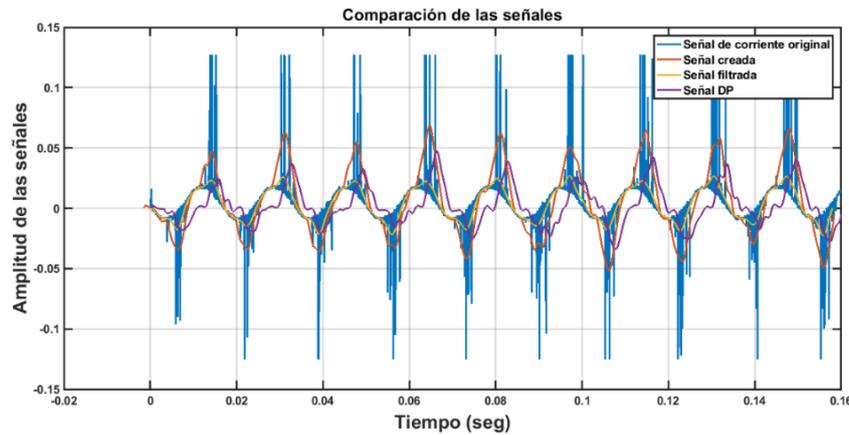


Figura 3.18 Señal de DP (morada) a una tensión de 10 kV rms.
Fuente: Autores

3.2.3 Comparación de los resultados de DP en ambientes diversos

En este punto es importante recordar que las descargas parciales contienen mecanismos de ionización que liberan electrones a gran velocidad sobre el campo eléctrico. Al momento de realizar los ensayos, se incrementa el número de moléculas, por lo que es necesario una buena evaluación del elemento aislante.

Otro punto importante que se considera para las comparaciones de resultados son los procedimientos utilizados. El primero de tipo Streamer, que considera la amplitud de la señal con valores de corriente que van desde 10 a 100 mA de forma rápida, alrededor de los nanosegundos [1], [32].

El segundo, se presenta el tipo Townsend, de forma más lenta, pero los pulsos aplicados disminuyen y comienzan a dar indicios de deterioro en el material. Finalmente, la magnitud de las DP comienza a decrecer hasta valores de los $200 \mu A$, y las repeticiones son más continuas, por microsegundo, conocido este como tipo Pitting, donde el dieléctrico llega al fallo [32].

Para este caso de estudio se llevaron a cabo los ensayos tanto en ambiente seco como en humedad. En este sentido, se determinó que, en el ambiente seco, los resultados obtenidos

demuestran que para valores de tensión entre 5 kV y 20 kV la presencia de descargas parciales es poco significativas. Sin embargo, el deterioro de las crucetas se da tanto de forma volumétrica (nivel interior) y superficial (contorno del material), pero no alcanza la degradación suficiente para causar la ruptura de la cruceta de PRFV.

No obstante, al aumentar la tensión a 25 kV se incrementa la velocidad y la energía de las partículas en movimiento que son necesarias para generar la corriente de ruptura y la DP en las crucetas, produciendo valores de corriente desde 120 μA hasta 160 μA . Lo que denota una presencia audible más continua, durante los ensayos, hasta que se da el fallo, por lo que el nivel máximo alcanzado en corriente y tensión es éste.

En el caso de los ensayos en humedad se empieza con una tensión de prueba inicial igual que los ensayos en seco, pero la presencia de descargas parciales sigue siendo poco significativa. Sin embargo, la situación cambia al llegar al nivel de tensión de 10 kV, debido a que no se llega a soportar tensiones superiores a este valor, con lo que se puede decir que la presencia de DP es mucho mayor como consecuencia del movimiento acelerado de las partículas en la superficie, dando un fallo inmediato, con corrientes desde 191 μA hasta 525 μA .

3.3 Resultados de la medición de rigidez dieléctrica y análisis estadístico dentro de los ensayos de crucetas de PRFV

Para el número de muestras analizadas se tomó en consideración que la empresa Equisplast, tiene una capacidad de producción máxima de 20 cm de cruceta por minuto, lo que da un total de 3600 crucetas completas mensualmente, permitiendo determinar en base a la Ecuación (3.1)

$$n = \frac{(1.65)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5 \cdot 3600}{(0.1)^2 (3600 - 1) + (1.65)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5} \quad (3.1)$$

$$n = 66.82 \text{ muestras}$$

Como las crucetas son materiales que están en contacto directo con los elementos aisladores, podrían sufrir descargas continuas, por fallos en el aislamiento; razón por la cual, la empresa Equisplast tiene diferentes compuestos que son utilizados para la fabricación de dichas crucetas.

Por lo tanto, en el presente estudio se analizaron estos compuestos; considerando el dimensionamiento de las muestras, mismas que se especifican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dimensionamiento de las muestras de cada compuesto.
Fuente: Autores

Compuesto	Dimensión [mm]	Espesor [mm]
1	50 x 50	9
2	60 x 60	9

Los niveles de voltaje de ruptura se expresan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos del voltaje de ruptura en las muestras.
Fuente: Autores

Número de muestra	Voltaje de ruptura [kV]		Número de muestra	Voltaje de ruptura [kV]	
	Compuesto 1	Compuesto 2		Compuesto 1	Compuesto 2
1	27,105	34,591	35	32,927	36,909
2	31,923	36,545	36	34,195	32,136
3	27,109	38,364	37	28,286	32,591
4	29,468	35,182	38	33,727	30,545
5	30,773	31,909	39	30,750	30,227
6	34,818	34,727	40	31,414	36,136
7	31,418	31,864	41	32,514	39,318
8	29,664	36,318	42	33,136	28,364
9	26,932	35,455	43	32,327	35,091
10	30,786	34,364	44	29,950	37,682
11	28,609	37,545	45	34,091	39,409
12	30,286	33,727	46	29,918	38,409
13	28,882	30,864	47	29,600	28,136
14	31,818	34,500	48	27,377	29,682
15	30,636	36,636	49	32,950	30,545
16	28,105	41,955	50	33,332	31,091
17	28,523	37,500	51	29,664	30,773
18	25,632	34,727	52	34,473	38,727
19	30,236	35,727	53	29,891	33,727
20	29,932	36,227	54	24,827	30,818
21	34,864	35,364	55	30,050	33,091
22	28,732	36,091	56	33,077	36,000
23	27,327	23,682	57	28,918	26,636
24	28,377	32,500	58	29,923	29,136
25	30,818	34,909	59	30,114	36,409
26	31,645	28,500	60	33,836	30,636
27	30,132	41,455	61	29,814	30,727
28	31,909	34,227	62	26,936	36,909
29	32,318	35,409	63	33,282	32,045
30	31,527	39,500	64	31,964	33,136
31	28,877	32,227	65	31,736	28,909
32	29,836	35,773	66	33,182	29,727
33	34,909	33,818	67	28,832	37,091
34	30,836	33,455	68	26,932	38,273

Una vez terminadas las pruebas se estableció aproximadamente que a más de 30 kV para el compuesto 1, se produce la ruptura, en el caso del compuesto 2 este valor es superior a 34 kV.

3.3.1 Determinar los valores de la media aritmética y desviación estándar

Con los valores obtenidos del voltaje de ruptura en las pruebas, se determina la media aritmética y desviación estándar, lo que nos permite elaborar la distribución gaussiana, orientada se encuentran un valor determinante dentro de las pruebas analizadas. La Ecuación (3.2) permite el cálculo de la media aritmética y la Ecuación (3.3) la desviación estándar.

Media Aritmética:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + \dots + X_n}{N} \quad (3.2)$$

$$\bar{X}(\text{Compuesto 1}) = 30.569 \text{ [kV]}$$

$$\bar{X}(\text{Compuesto 2}) = 34.039 \text{ [kV]}$$

Desviación estándar:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.3)$$

$$S(\text{Compuesto 1}) = 2.360$$

$$S(\text{Compuesto 2}) = 3.621$$

3.3.2 Elaboración de la distribución gaussiana

Con los valores obtenidos de la media aritmética y la desviación estándar, se procede encontrar la distribución normal, para poder formar la campana de Gauss, en cada uno de los compuestos, dando como resultado para el compuesto 1 que, si bien gran parte de la distribución de los datos, se encuentran cercanos a la media aritmética, los valores que se muestran a la izquierda de la media, soportan tensiones de ruptura más bajas, pero en cuanto a la cantidad de datos mostrados en la Figura 3.19 son similares a los encontrados en el lado derecho.

Los valores encontrados de la media hacia la derecha soportan un nivel de tensión mayor, aquí se notó que la cantidad de muestras resultan ser similares a las del lado izquierdo, lo

que nos lleva a una distribución Gaussiana esperable; es decir, un 50% a ambos lados de la media.

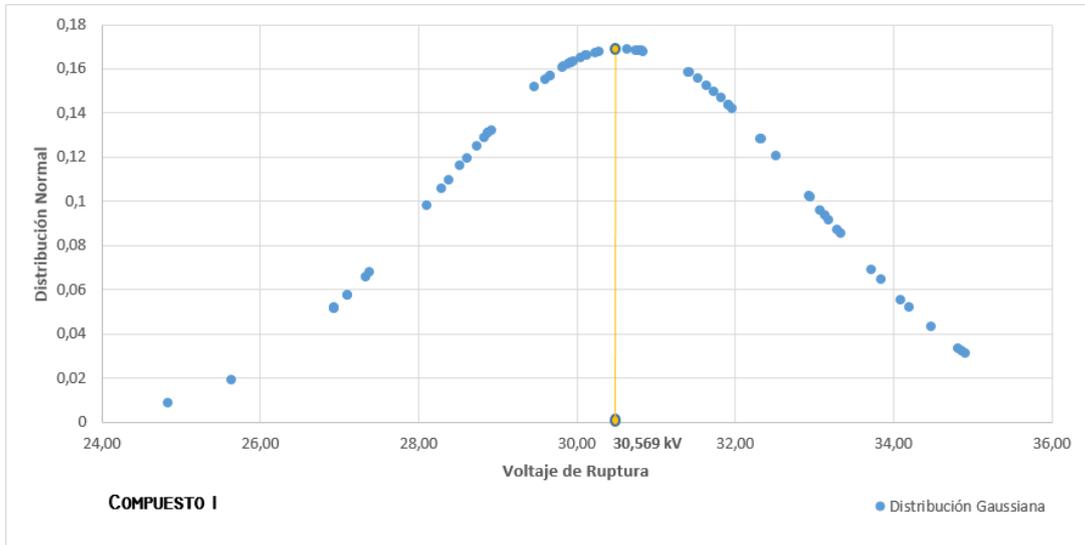


Figura 3.19 Distribución Gaussiana de los resultados obtenidos de las pruebas de rigidez dieléctrica.
Fuente: Autores

Para el caso del compuesto 2, la mayor distribución de datos, se encuentran en la parte cóncava derecha, cercana al valor de la media aritmética, por otro lado, los valores al lado izquierdo resultan ser los más bajos en distribución y que soportan menor tensión de ruptura, debido a la construcción de la cruceta. Mientras que los valores del lado derecho soportan mayor nivel de tensión, debido a la forma en L que se fabrican las crucetas y presentan menores imperfecciones, tal como se muestra en la Figura 3.20.

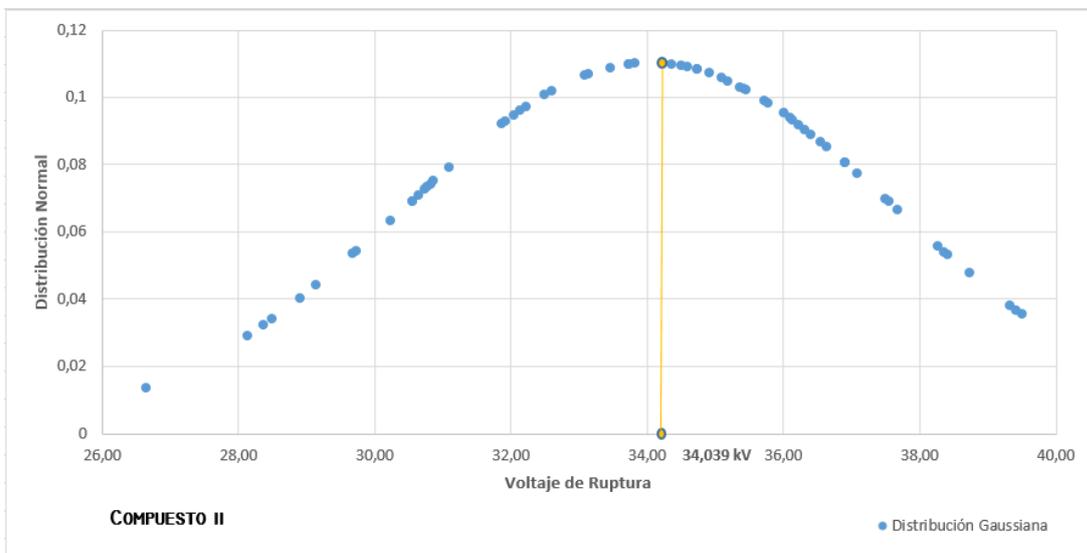


Figura 3.20 Distribución Gaussiana de los resultados obtenidos de las pruebas de rigidez dieléctrica.
Fuente: Autores

Para determinar el valor de la rigidez dieléctrica, se utiliza el valor de voltaje de ruptura de ambos compuestos en [kV] y la distancia de los electrodos en [mm], como se mencionó anteriormente. La Ecuación (3.4) determina el valor de rigidez dieléctrica.

$$E_r = \frac{V_r}{d} \quad (3.4)$$

$$E_r(\text{Compuesto 1}) = 3,396$$

$$E_r(\text{Compuesto 2}) = 3,782$$

Según las especificaciones y características técnicas el valor de la rigidez dieléctrica en crucetas debe ser superior a 8 kV/mm, debido a la norma ASTM D 149, pero al tratarse de perfiles de PRFV esto varía según la geometría y grosor del perfil. Además, aspectos como el tipo, orientación y gramaje del refuerzo de fibra con la que se elabora el material de la cruceta son considerados. Por lo que, el valor de estas características cambia entre 4 kV/mm el mínimo y 9 kV/mm máximo, lo que muestra que el resultado obtenido está por debajo del mínimo con respecto a los parámetros establecidos.

3.4 Prueba para la determinación del BIL

Los niveles de voltaje que se deben aplicar para poder determinar el nivel básico de aislamiento dependerán de características dieléctricas previamente observadas. Si bien la prueba de niveles múltiples puede ser aplicada con cualquier valor de voltaje, es necesario tener en cuenta que si se realiza con un voltaje muy bajo la probabilidad de falla será siempre 0%. Por el contrario, si se aplica valores de voltaje muy altos cada impulso tipo rayo que se aplique provocará falla en la pieza del material de muestra, siendo la probabilidad de falla 100%.

Al no existir normativa que indique los niveles de voltaje que se deben aplicar sobre las crucetas de PRFV, se debe tomar como referencia un valor de voltaje próximo al obtenido en la determinación de la rigidez dieléctrica. Para evitar la fatiga del material por descargas eléctricas consecutivas en un corto período de tiempo, los impulso tipo rayo serán aplicados cada 60 segundos hasta llegar a un total de 15 eventos; paralelamente, se registra si estos producen o no algún tipo de falla en el material de muestra. Para los ensayos sobre las muestras PRFV a diferencia de las demás pruebas dieléctricas, se utilizó piezas de crucetas de perfil completo con una longitud de 11 cm.

Las descargas en forma de impulso pueden provocar falla del material ya sea ocurriendo una descarga por el contorno del material o perforando el mismo. En la Figura 3.21 se muestra el circuito armado en el laboratorio de alta tensión de la UPS.



Figura 3.21 Circuito armado en el laboratorio de A.T. de la UPS para ensayos del BIL.
Fuente: Autores

3.4.1 Resultados de los ensayos en ambiente húmedo

Los ensayos dentro del simulador de lluvia se registraron desde un voltaje de 48.85 kVp, para este nivel de voltaje todas las descargas de impulso tipo rayo fueron resistidas por el material, por lo que se traduce en un 0% de probabilidad de falla, para los siguientes niveles de voltaje la probabilidad de falla aumenta, siendo así que en 58.57 kVp ocurrirá una falla en cada impulso que se aplique al material de prueba.

Las fallas sobre el material se manifiestan como una descarga a tierra a través del contorno del material de prueba. En la Tabla 3.3 se muestran la cantidad de impulsos aplicados y el total de fallas presentes.

Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de impulso tipo rayo en ambiente húmedo.
Fuente: Autores

		Voltaje (kVp)						
		48.85	51.05	52.53	54.00	55.44	56.96	58.57
Impulso tipo rayo	1	0	1	0	0	1	1	1
	2	0	0	0	0	1	1	1
	3	0	0	0	1	0	0	1
	4	0	0	0	0	1	1	1
	5	0	1	0	0	1	0	1
	6	0	0	0	1	1	1	1
	7	0	0	1	1	0	1	1
	8	0	0	1	1	1	1	1
	9	0	0	1	1	0	1	1
	10	0	1	1	1	1	1	1
	11	0	0	1	1	1	1	1
	12	0	1	1	1	1	1	1
	13	0	0	1	0	1	1	1
	14	0	0	1	1	0	1	1
	15	0	0	1	1	1	1	1
Total descargas		0	4	9	10	11	13	15
Porcentaje de falla		0.0%	26.7%	60.0%	66.7%	73.3%	86.7%	100.0%

3.4.2 Resultados de los ensayos en ambiente seco

En condiciones ambientales secas las pruebas se registraron desde 61.72 kVp, valor en el cual no se presentan fallas en el material y, lo mismo que ocurrió cuando se elevó el voltaje a 63.32 kVp.

Es destacable que el tercer nivel de voltaje con el que se aplican los impulsos es 64.22 kVp, valor en el que, las muestras fallaban en un 100% de los impulsos, realizando además varias pruebas con diferentes piezas en el mismo nivel de voltaje.

Desde los 64.22 kVp en adelante, se comprobó visualmente que la falla en el material ocurría por la perforación de la pieza de PRFV, al suceder esto desde el primer impulso y al no existir regeneración del material, los siguientes 14 impulsos aplicados seguían el mismo camino, provocando grave daño físico a la muestra. En la Tabla 3.4 se muestran la cantidad de impulsos aplicados y el total de fallas presentes.

Tabla 3.4 Resultados de las pruebas de impulso tipo rayo en ambiente seco.
Fuente: Autores

		Voltaje (kVp)			
		61.72	63.32	64.22	64.99
Impulso tipo rayo	1	0	0	1	1
	2	0	0	1	1
	3	0	0	1	1
	4	0	0	1	1
	5	0	0	1	1
	6	0	0	1	1
	7	0	0	1	1
	8	0	0	1	1
	9	0	0	1	1
	10	0	0	1	1
	11	0	0	1	1
	12	0	0	1	1
	13	0	0	1	1
	14	0	0	1	1
	15	0	0	1	1
Total descargas		0	0	15	15
Porcentaje de fallas		0.0%	0.0%	100.0%	100.0%

3.4.3 Curva de ajuste de datos del U50% en ambiente húmedo

Según el porcentaje de fallas producidos por cada nivel de voltaje se estima el valor de U50% con una curva polinómica y su ecuación generada en el software Excel. A partir de esta ecuación establecemos que $U50\% = 52.46$ kVp como se observa en la Figura 3.22

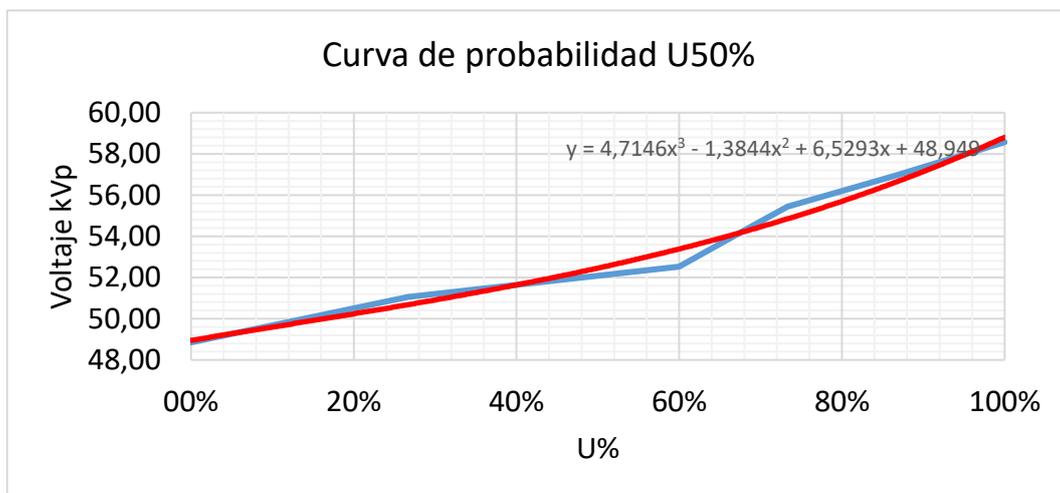


Figura 3.22 Curva polinómica de ajuste de datos recolectados (en color rojo).
Fuente: Autores

3.4.4 Resultado en ambiente seco

Al intentar determinar el valor de U50% se evidencia que no existen valores de porcentajes de falla diferentes de 0% y 100%, por lo que la alternativa en este caso es obtener el voltaje medio ponderado entre los niveles de voltaje que presentan la primera falla, siendo estos 63.32 kVp y 64.22 kVp, por lo tanto, el valor de U50% es 63.77 kVp.

3.4.5 Cálculo de la corrección atmosférica

Los valores de tensión de flameo obtenidos en el laboratorio obedecen a condiciones atmosféricas propias del lugar, que durante los ensayos fueron:

Temperatura promedio → 20.9°C
Altura sobre el nivel del mar → 2550
Presión atmosférica → 750.9 mbar

La normativa IEC 60071-2 establece que los ensayos deben realizarse al nivel del mar, con una temperatura de 20°C y una presión de 1013 mbar y una humedad absoluta de 11 g/m³, pero al ser estas condiciones ideales, la Ecuación 3.5 permite realizar una compensación, obteniendo un factor de corrección de altitud Ka.

$$Ka = e^{m\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \quad (3.5)$$

Donde:

- H = altura sobre el nivel del mar [m]
- m = 1.0 para tensiones soportadas en coordinación a impulsos tipo rayo
- m = 0.5 para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración

Al aplicar la fórmula para determinar el factor de corrección de altitud obtuvimos:

- Ka = 1.2095 para tensiones soportadas en coordinación a impulsos tipo rayo.
- Ka = 1.0998 para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración.

En la Tabla 3.5 se detalla los valores resultantes de la corrección de altura, tanto para las condiciones ambientales secas y de humedad.

Tabla 3.5 Valores de corrección de altura.
Fuente: Autores

Tipo de sobretensión	Factor de corrección atmosférica Ka	Ensayo en ambiente seco	Corrección atmosférica ambiente seco	Ensayo en ambiente húmedo	Corrección atmosférica ambiente húmedo
Frecuencia Industrial	1.0998	63.77	70.13	52.46	57.70
Impulso Tipo Rayo	1.2095	63.77	77.12	52.46	63.45

3.4.6 Determinación del valor del BIL

Una vez obtenidos los valores de la tensión de flameo U50% se aplica la Ecuación 2.9 para determinar el valor de BIL

Condiciones de humedad

$$\text{BIL} = 0.9616 \times 52.46 \text{ kV}$$

$$\text{BIL} = 50.45 \text{ kV}$$

Condiciones secas

$$\text{BIL} = 0.9616 \times 63.77 \text{ kV}$$

$$\text{BIL} = 61.32 \text{ kV}$$

3.4.7 Comparaciones de resultados de respuesta al impulso tipo rayo

Las diferentes pruebas a las que son sometidas las piezas durante los ensayos, generaron que las respuestas frente a los impulsos tipo rayo resulten considerablemente diferentes, no por el valor de voltaje que soportaron, sino más bien por el hecho de que la falla en la pieza húmeda se daba con una descarga que rodeaba la pieza, mientras que la pieza en ambiente seco sufría falla con una perforación a través del material a la misma altura de los electrodos del espinterómetro, como se puede observar en la Figura 3.23.



Figura 3.23 Cruceta de PRFV después de 15 impulsos tipo rayo de 64.22 kVp en ambiente seco.
Fuente: Autores

Por esto se puede asumir que, aunque un ambiente de lluvia favorece ampliamente la conducción de corrientes por la superficie de la cruceta, el compuesto de PRFV se verá mayormente deteriorado si los impulsos tipo rayo lo perforan.

CAPÍTULO 4. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Para realizar ensayos en el equipo simulador de lluvia de la UPS – Cuenca, como no es conveniente ingresar el espinterómetro dentro de la cabina de lluvia por su propia constitución física, se recomienda preparar o construir los acoplamientos necesarios para que la muestra de material quede firmemente sujeta entre los electrodos, ya sean planos o de punta.
- Una vez finalizadas las pruebas de DP, se puede decir que el efecto superficial sobre la muestra de la cruceta de PRFV, alcanza un valor máximo de corriente de ruptura a una tensión de 25 kV, para el ambiente seco. No así, en el caso de las pruebas en lluvia, donde la corriente de ruptura máxima se da únicamente hasta los 10 kV, lo que demuestra que bajo esta condición tiende a conducir y producirse DP más continuas de forma rápida, lo que ocasiona el fallo acelerado en el aislante. Para niveles de voltaje superiores a los determinados no se llevó a cabo la medición por la presencia del arco eléctrico y posibles daños a los equipos.
- En cuanto a la degradación del aislamiento de la muestra de cruceta de PRFV, después de cada prueba de DP, se evidencia que el nivel de aislamiento es variado. Sumado a esto, se adquirieron datos de factores importantes como el PI y DAR que cumplieron con los valores de tolerancia establecidos.
- Los resultados de rigidez dieléctrica se obtuvieron de forma probabilística, para los dos compuestos, demostrando que existe una diferencia de tensión de 4 kV, lo que demuestra que el compuesto 2 puede llegar a soportar la incidencia de voltaje más elevado.
- El valor de rigidez dieléctrica resultante según la norma ASTM debe ser superior a 8 kV/mm, para las crucetas, pero al tratarse de perfiles de PRFV esto varía según la geometría y grosor del perfil, el tipo, orientación y gramaje del refuerzo de fibra con

la que se elabora el material. Llegando a valores entre 4 y 9 kV/mm, demostrándose que el resultado obtenido tiene muy poca diferencia con respecto a los parámetros especificados.

- La determinación de la tensión crítica de flameo U50% resultó en un comportamiento diferente del material según las condiciones ambientales a las que estaba sometido. Es notable que las condiciones de lluvia provocaban que la falla se produjera a través de la superficie del material de muestra, mientras que para las condiciones ambientales secas la falla del material producía perforaciones que destruían notablemente el recubrimiento de la cruceta de PRFV.

Recomendaciones

- Se recomienda a la empresa Equisplast, uniformidad en la elaboración de las crucetas. Esto, debido a la porosidad existente en las muestras y el tamaño de la cavidad en el dieléctrico. Factores que afecta directamente al material aislante y que en cuestión de segundos ocasiona la explosión en las crucetas y perforación de estas.
- Se recomienda que, para realizar los ensayos, se debe utilizar las primeras muestras para verificar visualmente si las fallas se producen por descargas sobre la superficie del material, o por perforación del mismo, ya que esto ayudará a determinar el tamaño de la muestra.
- Por su inherente composición no metálica, las crucetas de PRFV muestran características dieléctricas improbables de encontrar en una cruceta de acero galvanizado, por lo que es recomendable su uso en estructuras situadas en lugares proclives a entrar en contacto con conductores, elementos energizados o descargas atmosféricas.
- La implementación del software FEMM en futuros estudios es recomendable. Puesto que, este es un conjunto de programas diseñados para resolver problemas electromagnéticos en dos dimensiones, usando el método de elementos finitos. Además, tiene como objetivo establecer el efecto del campo eléctrico en función de la tensión aplicada a los materiales aislantes analizados.

- Se recomienda la realización de pruebas futuras sobre un tercer compuesto químico que utiliza la empresa Equisplast para la elaboración de las crucetas. El objetivo sería analizar y estudiar la resistencia del material sobre estas crucetas que tienen un mayor grado de resistencia.
- Se recomienda realizar ensayos posteriores sobre los efectos que producirían las descargas parciales a altas frecuencias sobre las crucetas de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Saguay and R. Torres, “Análisis de comportamiento de medios dieléctricos ante las altas tensiones eléctricas,” UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2011.
- [2] V. C. Egberto, “Método de fabricación por centrifugado de postes de fibra de vidrio para mejorar la calidad del rendimiento de instalaciones de redes secundarias de baja tensión,” Universidad José Carlos Mariátegui, 2018.
- [3] H. Armijos and L. Mizquero, “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 (P.R.F.V) pertenecientes a la empresa Equisp,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
- [4] D. Mogrovejo, “Maestría en Auditoría Integral y Gestión de Riesgos,” Universidad del Azuay, 2018.
- [5] J. Ochoa and J. Macas, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SIMULADOR DE LLUVIA PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-CUENCA,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
- [6] J. Bravo, “GENERACIÓN DE IMPULSOS DE ALTA TENSIÓN PARA DIVERSAS APLICACIONES,” 2005.
- [7] IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques, “IEEE Power and Energy Society,” 10 mayo 20., New York, 2013, p. 500.
- [8] B. Tapia and D. Criollo, “Aplicación de ensayos disruptivos para la determinación del BIL a través de esferas espinterométricas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana,” 2018.
- [9] Equisplast, “Postes y crucetas de Plástico Reforzado,” *J. Chem. Inf. Model.*, p. 28, 2016.
- [10] E. T. CRE, “Características técnicas crucetas de poliéster reforzado con fibra de vidrio,” p. 8, 2017.
- [11] D. Luengas and S. De la Rosa, “Diseño y construcción de un simulador de lluvia para estudios hidrológicos,” 2015.
- [12] D. Villalba, “Comparación entre normas IEEE e IEC sobre coordinación de aislamiento (En sistemas de distribución hasta 69kV),” 2016.
- [13] Á. Blázquez, “Monitorización continua de Descargas Parciales para caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas eléctricas,” UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
- [14] F. Quizhpi and F. Gómez, “Determinación de las Condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores mediante el análisis de corriente,” 2017.
- [15] M. Quizhpi-Cuesta, F. Gómez-Juca, W. Orozco-Tupacyupanqui, and F. Quizhpi-Palomeque, “An alternative method for Partial Discharges measurement using digital filters,” *2017 10th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2017*, pp. 92–97, 2017.

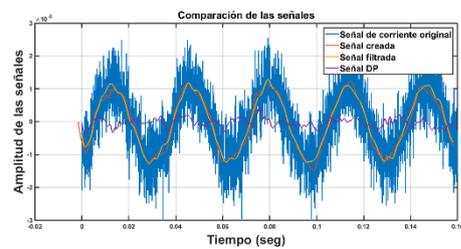
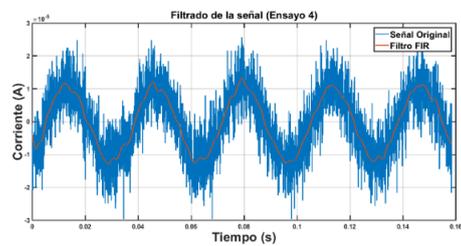
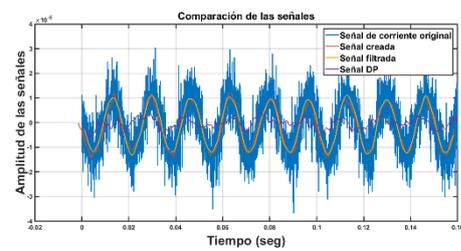
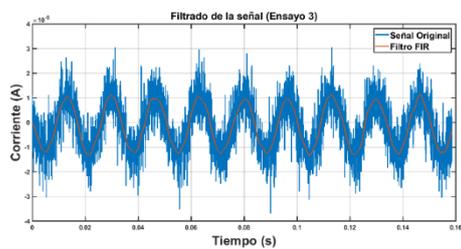
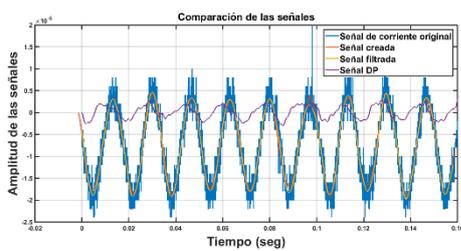
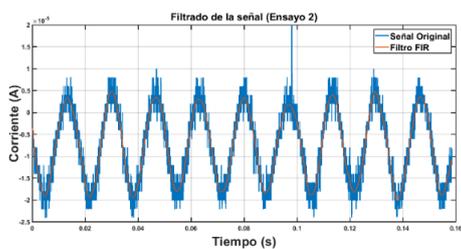
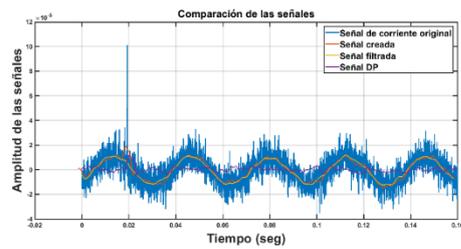
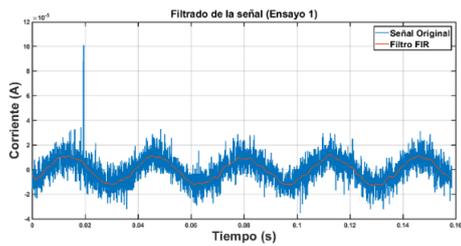
- [16] B. Lozano, “DISEÑO DE SOFTWARE OFF-LINE PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESCARGAS PARCIALES,” 2013.
- [17] F. Godoy, “Estudio de atributos estadísticos para evaluación de aislamientos eléctricos,” 2012.
- [18] A. S. for T. and Materials, “ASTM D 149: Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power,” *Astm*, vol. 9, no. Reapproved, pp. 1–13, 2013.
- [19] B. Cabrera and V. Humala, “Análisis del valor de corriente debido a sobretensiones en guantes dieléctricos aplicados a media tensión,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
- [20] S. Grzybowski and T. Disyadej, “Electrical performance of fiberglass crossarm in distribution and transmission lines,” *Transm. Distrib. Expo. Conf. 2008 IEEE PES Powering Towar. Futur. PIMS 2008*, pp. 1–5, 2008.
- [21] D. Díaz, “Implementación de filtros FIR utilizando la plataforma de simulación Matlab,” p. 54, 2017.
- [22] I. Artetxe, “Procesado digital de señales mediante circuitos integrados reconfigurables,” 2014.
- [23] H. Castillo and A. Córdova, “Modelación matemática y simulación de un filtro digital híbrido Fir adaptativo lineal óptimo,” p. 215, 2010.
- [24] W. Huang, “Fast Fourier Transform and MATLAB Implementation for.” .
- [25] Manuel, *Análisis en el dominio de la frecuencia - Análisis de Fourier*. 2005.
- [26] I. Sánchez, *Tipos de simuladores de lluvia*. 1999.
- [27] E. Contreras and R. Boccardo, “Simulador de lluvia para ensayos de aislantes eléctricos de alta tensión,” *Univ. Simón Bolív.*, pp. 271–278.
- [28] C. A. Group, “Guía de la medición de aislamiento,” pp. 1–28, 2010.
- [29] Fluke Corporation, “Manual Insulation Tester 1550C / 1555,” no. April, p. 38, 2010.
- [30] O. Portocarrero, “Determinación de los protocolos de prueba en alta tensión a ser aplicados en equipos y materiales utilizados en nivel de hasta 22kV,” 2012.
- [31] D. Ing. Eléctrica, “Principios para la Coordinación de los Niveles de Aislación de Aparatos e Instalaciones en Redes Eléctricas de Alta Tensión,” *Cátedra Transm. y Distrib. la Energía*, pp. 1–25, 2014.
- [32] F. Álvarez, “Nuevos desarrollos en la medida de descargas parciales y técnicas avanzadas de análisis para el diagnostico del estado de los aislamientos en sistemas eléctricos de alta tensión,” p. 216, 2015.

ANEXOS

ANEXO A: GRÁFICAS DE LAS DP PRODUCIDAS EN CADA NIVEL DE TENSIÓN DENTRO DE LOS ENSAYOS

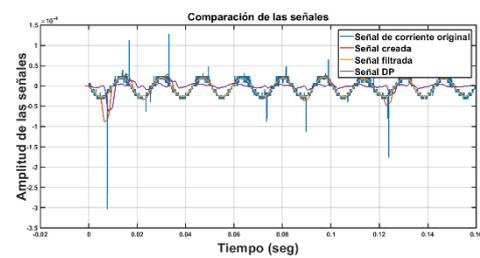
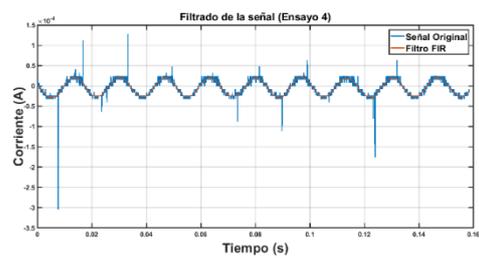
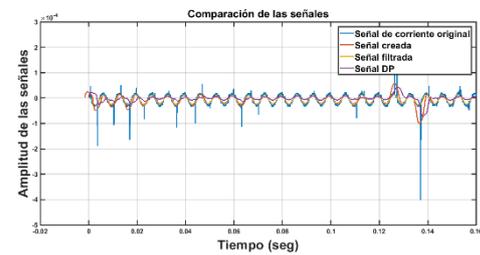
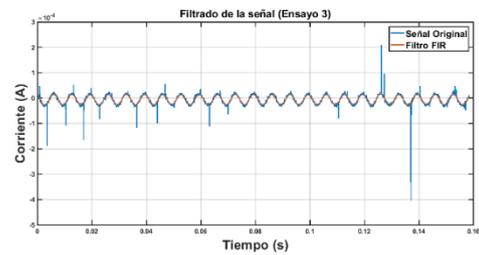
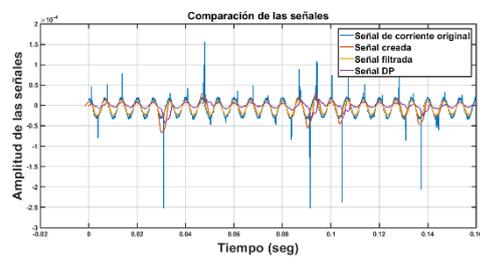
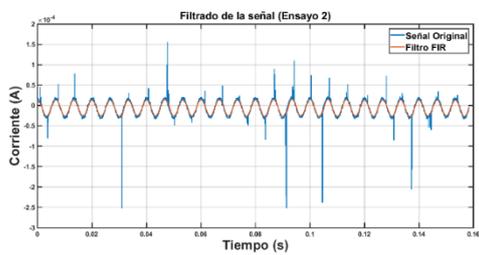
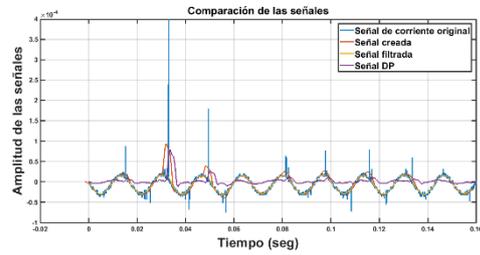
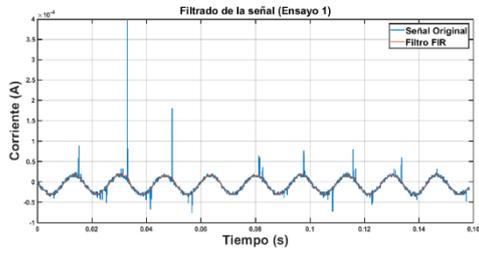
Anexo A1

Descargas parciales producidas a un nivel de tensión de 5 kV rms



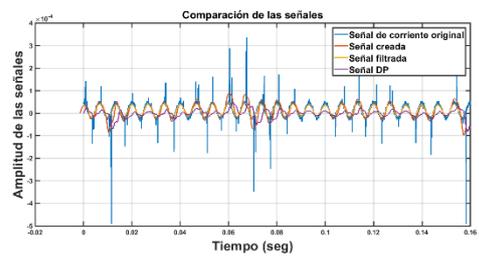
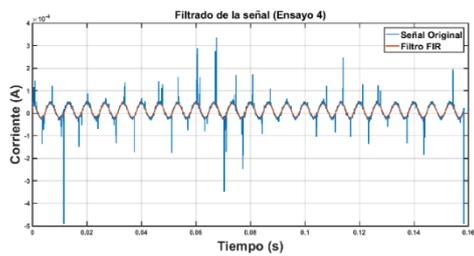
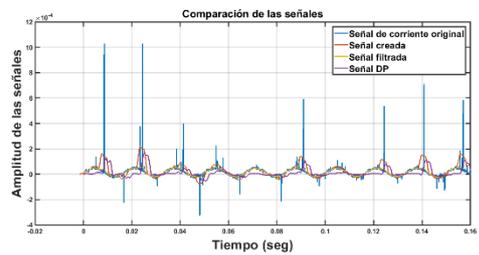
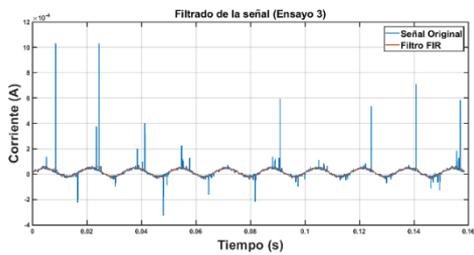
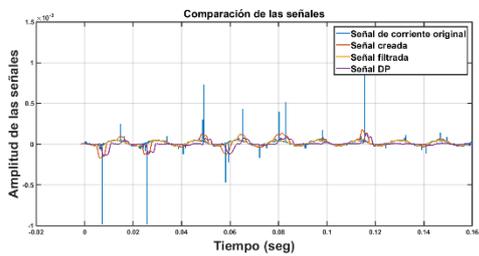
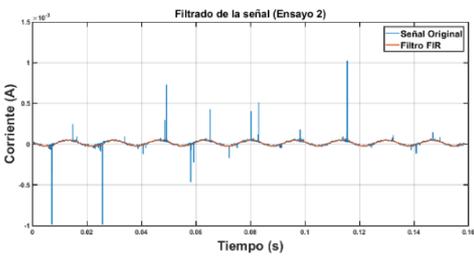
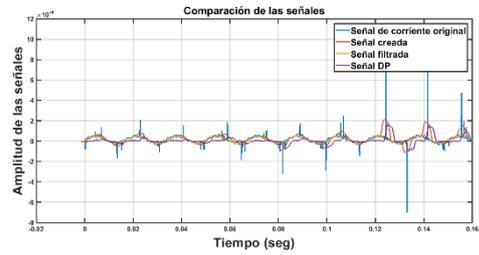
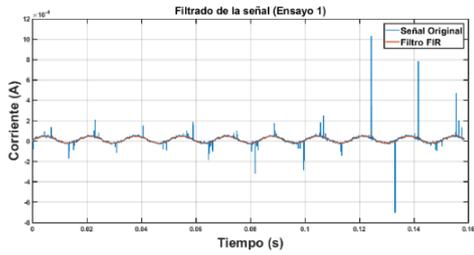
Anexo A2

Descargas parciales producidas a un nivel de tensión de 10 kV rms



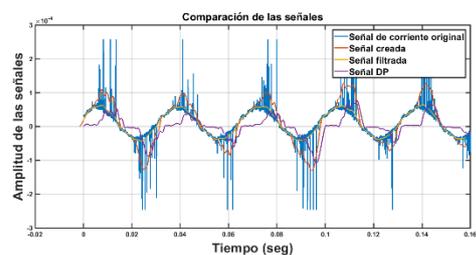
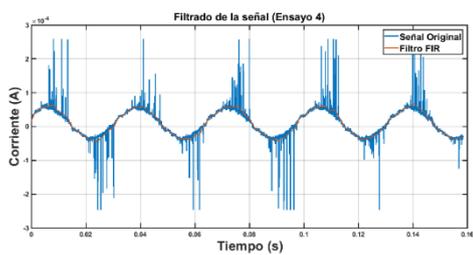
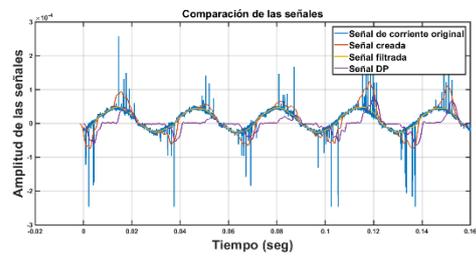
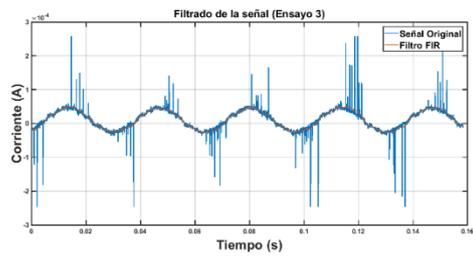
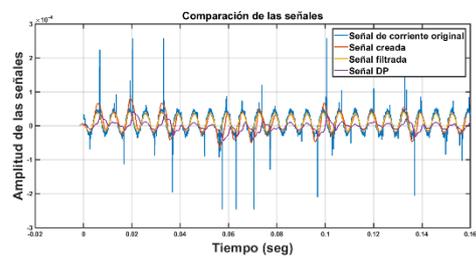
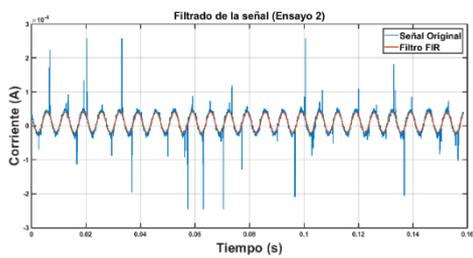
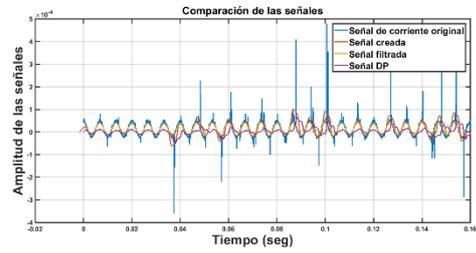
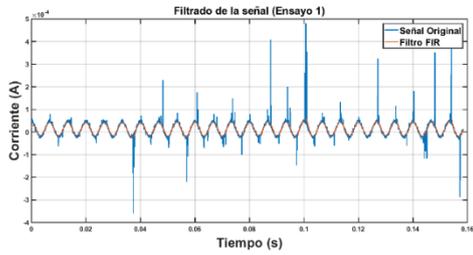
Anexo A3

Descargas parciales producidas a un nivel de tensión de 15 kV rms



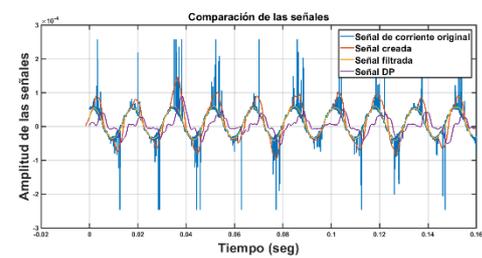
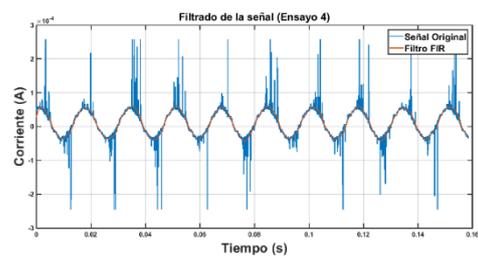
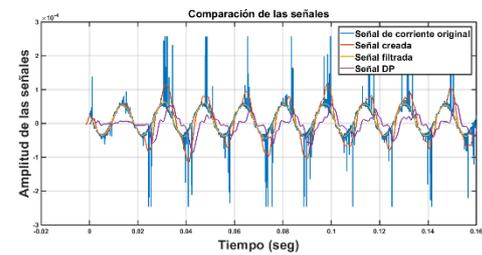
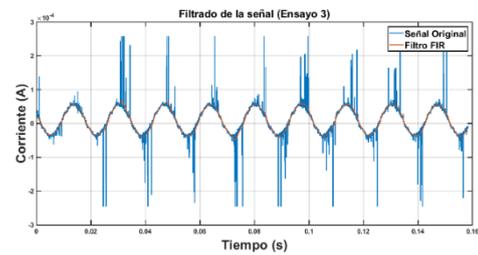
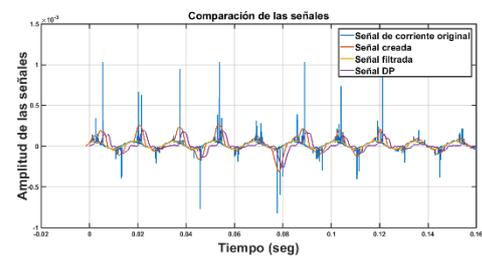
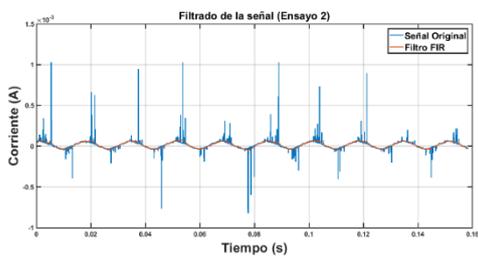
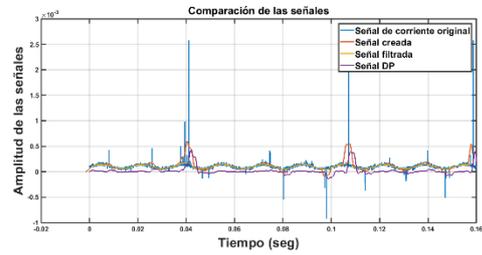
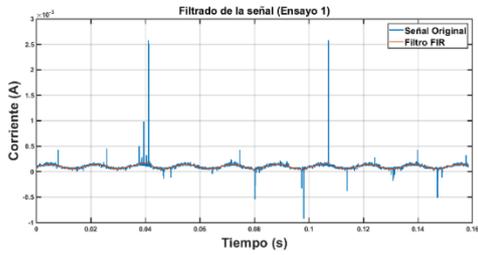
Anexo A4

Descargas parciales producidas a un nivel de tensión de 20 kV rms



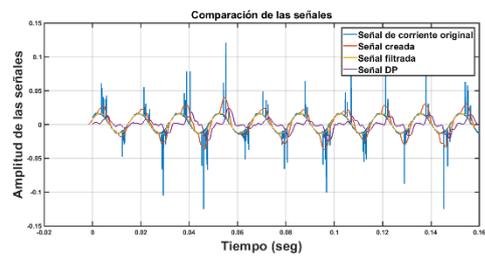
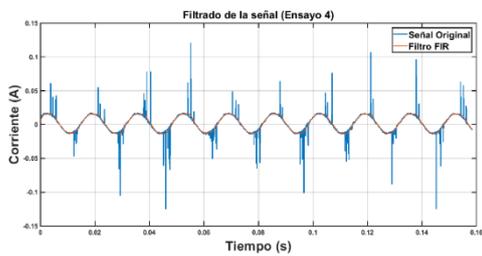
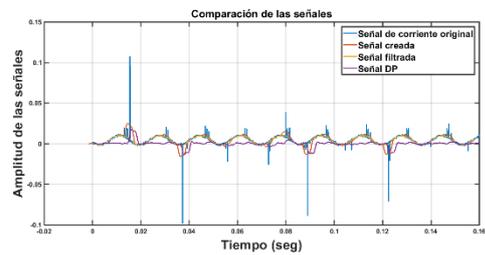
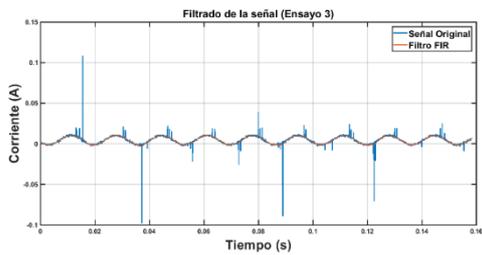
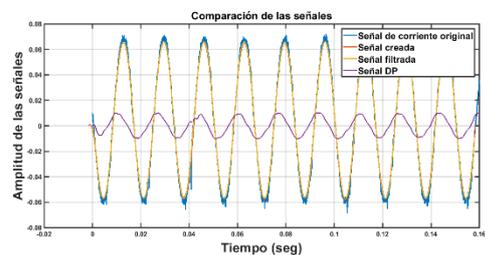
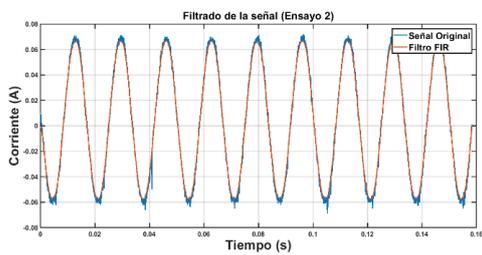
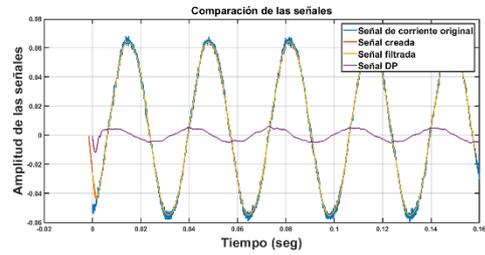
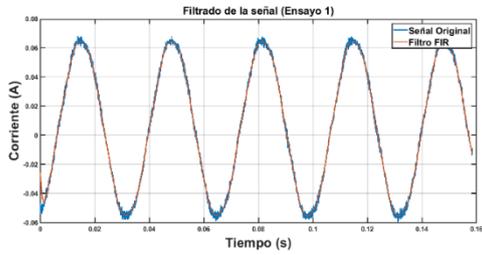
Anexo A5

Descargas parciales producidas a un nivel de tensión de 25 kV rms



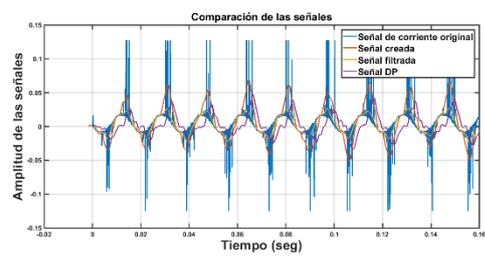
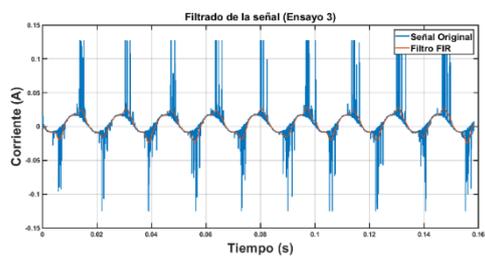
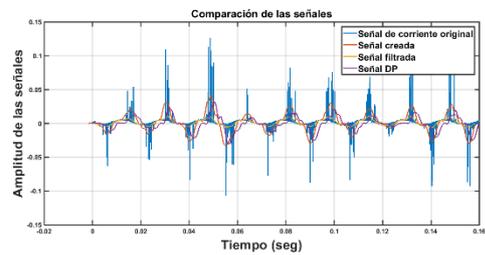
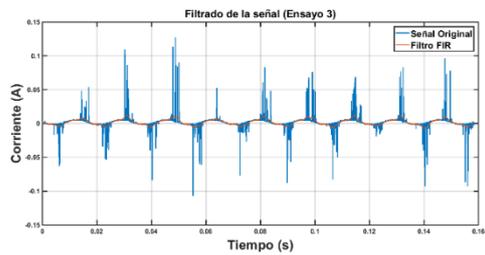
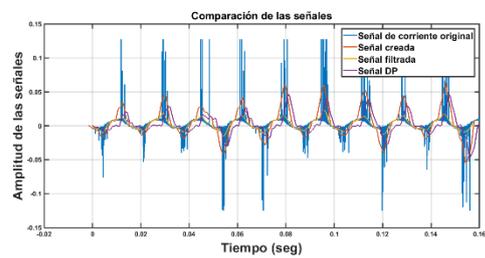
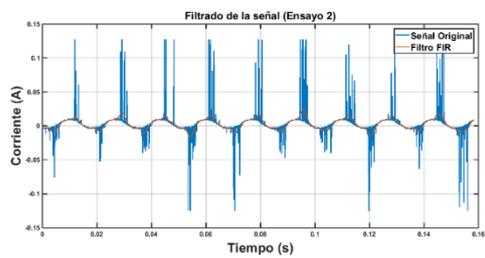
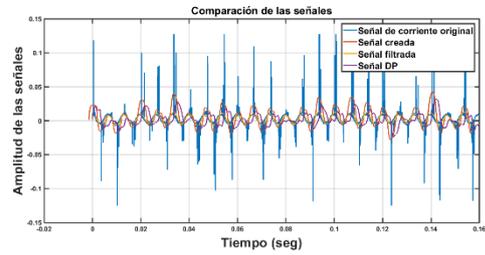
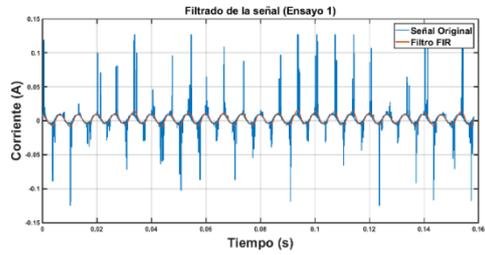
Anexo A6

Descargas parciales producidas en lluvia a un nivel de tensión de 5 kV rms



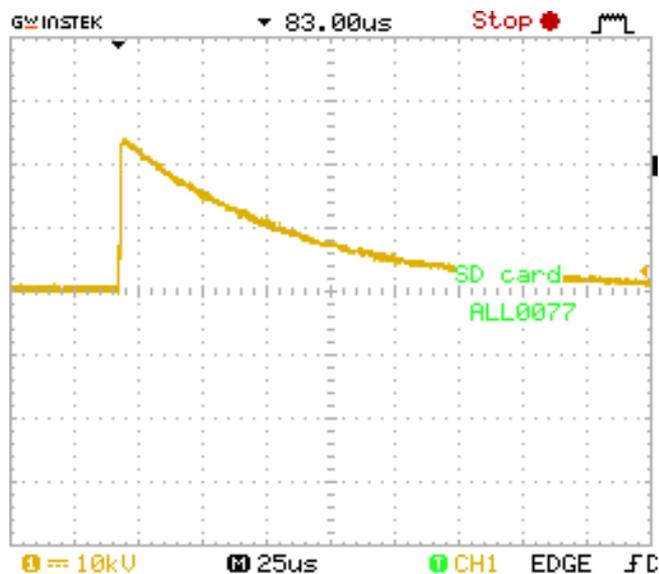
Anexo A7

Descargas parciales producidas en lluvia a un nivel de tensión de 10 kV rms

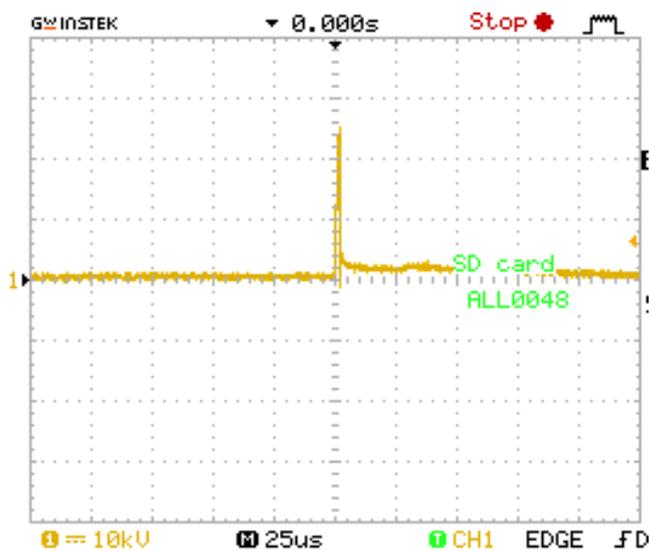


ANEXO B: GRÁFICAS DEL IMPULSO TIPO RAYO DENTRO DE LOS ENSAYOS

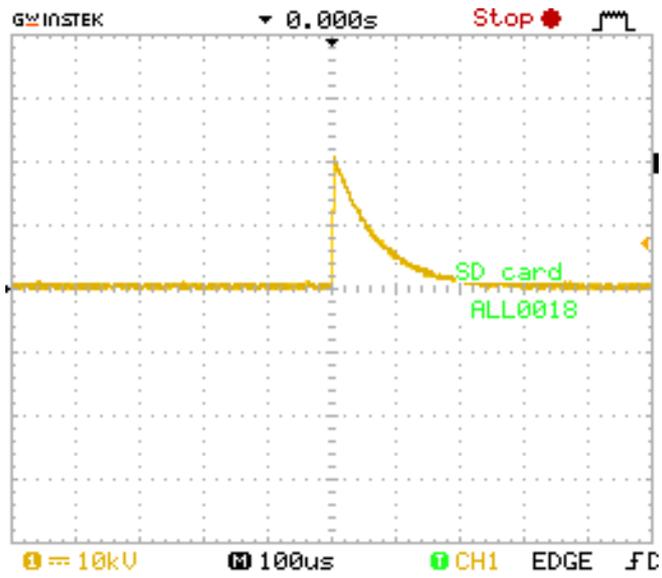
Anexo B1



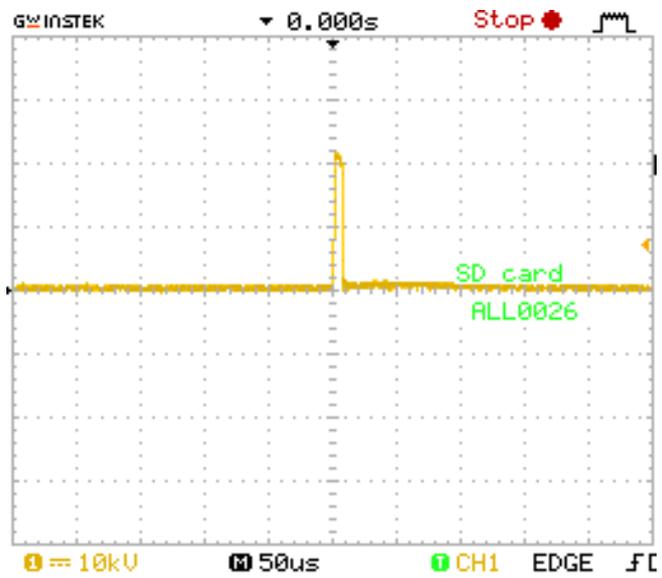
Captura osciloscopio impulso tipo rayo sin falla del material a 61.72 kVp en ambiente seco



Captura osciloscopio impulso tipo rayo con falla del material a 64.99 kVp en ambiente seco



Captura osciloscopio impulso tipo rayo sin falla del material a 55.46 kVp en ambiente húmedo



Captura osciloscopio impulso tipo rayo con falla del material a 56.96 kVp en ambiente húmedo