UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

PROYECTO TÉCNICO DE ENFOQUE INVESTIGATIVO:

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 EQUISPLAST

AUTORES:

Luis Gerardo Mizquero Zarate Henry Javier Arias Armijos

TUTOR:

ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE

CUENCA – ECUADOR

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros; Luis Gerardo Mizquero Zarate, con documento de identificación Nº y Henry Javier Arias Armijos, con documento de identificación N° 0104841200 0705363240, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del "DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS de titulación: trabajo 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 EQUISPLAST", mismo que se ha 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 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2018

fins to

Luis Gerardo Mizquero Zarate C.I. 0104841200

Henry Javier Arias Armijos C.I. 0705363240

CERTIFICACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque; declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: "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 EQUISPLAST", realizado por los autores: Luis Gerardo Mizquero Zarate y Henry Javier Arias Armijos, obteniendo el Proyecto Técnico de Enfoque Investigativo que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2018

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque CI. 0102257482

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros; Luis Gerardo Mizquero Zarate, con documento de identificación Nº y Henry Javier Arias Armijos, con documento de identificación Nº 0104841200 "DETERMINACIÓN 0705363240, del trabajo de titulación: DE autores 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 EQUISPLAST", certificamos que el total contenido de este Proyecto Técnico de Enfoque Investigativo es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2018

tim

Luis Gerardo Mizquero Zarate C.I. 0104841200

Henry Javier Arias Armijos C.I. 0705363240

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme y haber culminado con éxito mi carrera universitaria, a mis padres Luis y Ana por ser el eje principal de mi vida ya que gracias a sus enseñanzas supieron guiarme por el sendero del amor y servicio, a mis hermanos, Diana, Daniel, por estar en cada momento especial de mi vida y ser el soporte de felicidad de nuestra familia.

Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación a mi director de tesis Ing. Flavio Quizhpi. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad.

Luis Gerardo Mizquero Zarate.

Agradezco a Dios por darme las fuerzas y la salud para cumplir con mi objetivo, a mis padres, Sergio Javier y María Imelda que supieron brindarme su apoyo incondicional para poder tener una buena educación, ya que con su sacrificio aprendí el valor del esfuerzo para poder alcanzar una meta, a mi hermano Sergio Javier y a mi amigo José Vicente quienes me brindaron su apoyo en momentos difíciles.

Al Ing. Flavio Quizhpi director de tesis quien me supo encaminar de manera correcta el proyecto de titulación, brindando siempre su conocimiento, confianza y amistad.

Henry Javier Arias Armijos

DEDICATORIA

Este logro profesional y personal dedico a mis padres Luis y Ana quienes a lo largo de estos años de lucha constante han sabido inculcarme su perseverancia y disciplina para alcanzar las metas propuestas, a mis hermanos Diana y Daniel por apoyarme e incentivarme a seguir adelante, agradezco a mis familiares y amigos que de una u otra manera me apoyaron a culminar mi carrera universitaria.

Luis Gerardo Mizquero Zarate.

Dedico este trabajo de titulación a mi familia y amigos que supieron brindarme apoyo en los momentos difíciles de mi vida, pero de manera muy especial a mi madre querida, ya que junto a ella luchamos día a día para poder alcanzar nuestra meta propuesta y que hoy con mucho esfuerzo y dedicación se la culminó.

Henry Javier Arias Armijos

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad".

Albert Einstein

RESUMEN

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) debe operar de forma segura, confiable, garantizando la continuidad de servicio, los equipos y elementos que lo conforman deben garantizar el correcto funcionamiento, los cuales se construyen para soportar exigencias climáticas, térmicas, mecánicas y eléctricas, bajo normas que garanticen la cálida y seguridad en este contexto, los Postes de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (P.R.F.V) juegan un papel crucial especialmente en la seguridad para sistemas de Subtransmisión y Distribución.

Al disponer de resultados de coordinación de aislamiento el cual consiste en seleccionar un conjunto de tensiones soportadas normalizadas que caracteriza el aislamiento del material considerando condiciones ambientales, factores de seguridad, niveles de contaminación entre otras propias de la región validando los resultados obtenidos mediante ensayos de impulso tipo rayo y frecuencia industrial en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sobre muestras de Postes de (P.R.F.V) basado en la normativa IEC 60060-1 (High-voltage test techniques) determinando corrientes de fuga, voltaje de ruptura y BIL obteniendo valores de aislamiento propios del materia.

El valor de rigidez dieléctrica se determinó mediante un proceso estadístico en el cual se realizó un total de 70 ensayos, para la detección de descargas parciales se empleó el método convencional y posterior mente un proceso de filtrado en el software MATLAB, mientras que fue evaluado BIL por el método U50%.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECI	IMIENTOV
DEDICATC	DRIAVI
RESUMEN.	
ÍNDICE DE	E CONTENIDOSVIII
ÍNDICE DE	E FIGURASXII
ÍNDICE DE	E TABLASXV
GLOSARIO	XVII
1. Introduc	cción1
1.1. Plan	nteamiento Del Problema
1.2. Just	ificación
1.3. Ob	jetivos
1.3.1.	Objetivo General
1.3.2.	Objetivos Específicos 4
2. Fundam	ento Teórico
2.1. Pro (PRFV)	ceso de fabricación del Postes de Poliéster Reforzados con fibra de Vidrio
2.1.1.	Laminado de Filamentos5
2.1.2.	Pulverización
2.1.3.	Pultrusíon 6
2.1.4.	Centrifugado
2.2. Ais	lamiento Eléctrico7
2.2.1.	Tipo de Aislamiento7
2.3. Rig	idez Dieléctrica
2.3.1.	Estándar ASTM D-149
2.3.1.1.	Método A: Prueba de Corto tiempo
2.3.1.2.	Método B: Prueba Paso a Paso9
2.3.1.3.	Método C: Prueba lenta de velocidad en ascenso9
2.4. Coo	ordinación de Aislamiento10
2.4.1.	IEC 60071-1 Coordinación de Aislamiento parte 1: Definiciones y Reglas . 10

2	2.4.2.	IEC 60071-2 Coordinación de Aislamiento parte 2: Guía de Aplicación	13
2.5	. Des	scargas Parciales	14
2	2.5.1.	Origen De Las Descargas Parciales	15
2	2.5.2.	Tipos De Descargas Parciales	15
2	2.5.2.1.	Descarga Parcial Interna	15
2	2.5.2.2.	Descarga Parcial Superficial	16
2	2.5.2.3.	Descarga Parcial Arborescencia Eléctrica	16
2	2.5.2.4.	Descarga Parcial Corona	17
2	2.5.3.	Medición de Descargas Parciales (DP)	17
2	2.5.3.1.	IEC 60270: Métodos Convencionales	17
2	2.5.3.2.	IEC 6478: Métodos no Convencionales	19
3. (Coordin	ación De Aislamiento	19
3.1	. Niv	eles de aislamiento normalizados	20
3	3.1.1.	Origen y clasificación de las sobretensiones	21
3.2	. Ten	siones y sobretensiones representativas	21
3	3.2.1.	Tensión continua (frecuencia industrial)	21
3	3.2.2.	Sobretensiones temporales	21
3.3	. Pro	cedimiento de coordinación de aislamiento	21
3	3.3.1.	Determinación de las sobretensiones representativas (Urp)	22
3	3.3.1.1.	Parámetros generales de Funcionamiento del Sistema	22
3	3.3.1.2.	Contaminación	22
3	3.3.1.3.	Tensión a frecuencia industrial	23
3	3.3.1.4.	Sobretensiones temporales (Fallas a tierra)	23
3	3.3.1.5.	Determinación del Factor de falla a Tierra k	23
H	Ecuacion	nes de Carson	23
3.4	. Fall	as a tierra	26
3	3.4.1.	Sobretensiones por rechazo de carga	27
3	3.4.2.	Sobretensiones de energización y la re-energización de línea	27
3.5	. Sob	retensión de frente lento	29
3	3.5.1.	Sobretensiones particulares que afectan en la línea entrante	29
3	3.5.2.	Sobretensiones que afectan a todo el equipamiento	30
3.6	. Sele	ección del pararrayos	31
3	3.6.1.	Tención continúa de operación (COV)	32
3	3.6.2.	Sobretensión temporal (TOV)	32

	3.6.3.	Tensión Nominal Del Pararrayos	33
	3.6.4.	Pararrayos en la entrada de la línea energización desde el extremo remoto	33
3	.7. D	Determinación de tensiones de soportabilidad para coordinación (Ucw)	34
	3.7.1.1	. Tensión soportada de coordinación para sobretensiones de frente lento.	35
	3.7.1.2 de las	2. Análisis normativa IEEE 1410 (Guía para mejorar el rendimiento del ra líneas aéreas de distribución de energía eléctrica)	iyo 37
	3.7.1.2	2.1. Nivel Isoceraunico	37
	3.7.1.2	2.2. Densidad de descargas a tierra	37
	3.7.1.2	2.3. Rango de colección de rayos	37
	3.7.1.2	2.4. Factor de protección (árboles y estructuras cercanas)	38
	3.7.1.3	 Tensión soportada de coordinación para sobretensiones de frente rápi 39 	do
3	.8. D	Determinación de las tensiones soportadas especificadas (Urw)	40
	3.10.1	. Factor de seguridad (Ks)	40
	3.10.2	. Factor de corrección atmosférico	40
	3.10.3	. Tensiones de soportabilidad requeridas	42
3	.9. S	elección de los niveles de aislamiento normalizados ($m{U}m{w}$)	43
	3.11.1	. Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración	43
	3.11.2	. Tensión soportada a impulso tipo rayo	43
4.	Deter	minación de Descargas Parciales y Rigidez Dieléctrica	45
4	.1. D	Descargas Parciales	45
	4.1.1.	Implementación del Circuito de Medición Directa para detección de DP	46
	4.1.2.	Procedimiento de la detección de Descargas Parciales	47
	4.1.3.	Degradación del aislamiento	56
4	.2. P	ruebas de Rigidez Dieléctrica	58
5.	Sobret	tensión de flameo U50%	64
5	.1. Iı	npulso tipo rayo	64
	5.1.1.	Electrodos	65
5	.2. Т	ensión de flameo	66
	5.2.1. U50%	Método de ensayo niveles múltiples para determinar la tensión de flam 67	eo
	5.2.2.	Tensión U50%	67
	5.2.3.	Tensión inicial	67
	5.2.4.	Incremento de tensión (ΔV)	68

5.2.5.	Metodología de ensayo niveles múltiples
5.2.6. rayo	Implementación del Circuito para la realización de pruebas de impulso tipo 69
5.2.6.	Análisis estadístico de resultados según la metodología niveles múltiples 71
Conclusion	nes
Recomend	aciones
REFERENC	IAS
Anexos	
Anexo 1: De rms	scarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 5 kV
Anexo 2: De kVrms	escarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 10
Anexo 3: De kVrms	escarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 15
Anexo 4: De kVrms	escarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 20
Anexo 5: De kVrms	escarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 25
Anexo 6: De kVrms	escarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 30
Anexo 7: Tab	oulaciones ensayos Aislamiento-Voltaje
Anexo 8: Tab	oulaciones ensayos Temperatura-Voltaje
Anexo 9: On	das de Impulso tipo rayo captada a diferentes niveles de tensión
Anexo 10: M	uestras de postes PRFV, sometidas al ensayo de impulso tipo rayo95
Anexo 11: Da	atos ensayos de impulso tipo rayo BIL95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Composición del Polímero (PRFV)
Figura 2.2. Proceso de laminado de filamento
Figura 2.3 Proceso de Pulverización
Figura 2.4 Proceso de Pultrusíon
Figura 2.5 Proceso de Centrifugado7
Figura 2.6 Incremento del nivel de tensión, según método A del ASTM 8
Figura 2.7 Incremento del Voltaje, según método B del ASTM D-1499
Figura 2.8 Incremento del Voltaje, según método C del ASTM D-149 10
Figura 2.9 Clasificación de sobretensiones estandarizadas12
Figura 2.10 Procedimiento para Coordinación de Aislamiento14
Figura 2.11 Impulsos de corriente con descarga parcial 15
Figura 2.12 Descarga parcial de tipo Interna16
Figura 2.13 Descarga parcial de tipo Superficial16
Figura 2.14 Descarga parcial de tipo arborescencia eléctrica17
Figura 2.15 Descarga parcial de tipo Corona
Figura 2.16 Circuito de Medición Indirecta para la detección de descargas parciales 18
Figura 2.17 Circuito de Medición directa para la detección de descargas parciales18
Figura 3.1 Estructura Trifásica-Semicentrada de las unidades de construcción del MEER24
Figura 3.2 Disposición de la estructura Trifásica-Semicentrada
Figura 3.3 Relación R0/ X1 y X0 / X1 para valores constantes de factor de falla a tierra k
Figura 3.4 Alcance del 2% de sobretensiones de frente lento en el extremo receptor debido a la energización y re-energización de la línea "Aplicado al sistema de distribución de la CentroSur"
Figura 3.5 Relación entre el 2% de los valores de sobretensiones de frente lento fase a fase
Figura 3.6 Pararrayos Ohio Brass "Distribution class PDV", heavy Duty
Figura 3.7 Características eléctricas del pararrayos Heavy Duty PDV-100Optima
Figura 3.8 Factor de coordinación determinístico para aislamiento externo
Figura 3.9 Factor de coordinación determinístico para otros equipos
Figura 3.10 Mapa Isoceraunico del Ecuador

Figura 3.11 Curva del factor de coordinación m en función de tensión soportada al impulso de conmutación
Figura 4.1 Circuito de medición directa para detección de DP 46
Figura 4.2 Data Acquisition DAQ National Instruments
Figura 4.3 Esquema labVIEW para adquisición de datos de Corriente y Voltaje
Figura 4.4 Circuito implementado para medición y detección de DP 48
Figura 4.5 Señal de tensión y corriente adquiridos por DAQ a una tensión de 5kV rms en ensayó de DP49
Figura 4.6 Señal de corriente sin filtrar (azul) y filtrada (roja) correspondiente a una tensión de 5kV rms en ensayo de DP
Figura 4.7 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 5kV rms en ensayo de DP
Figura 4.8 Señal de corriente sin filtrar y filtrada correspondiente a una tensión de 10 kV rms en ensayo de DP
Figura 4.9 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 10 kV rms en ensayo de DP
Figura 4.10 Señal de corriente sin filtrar y filtrada correspondiente a una tensión de 30 kV rms en ensayo de DP
Figura 4.11 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 30 kV rms en ensayo de DP
Figura 4.12 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 35kV rms en ensayo de DP
Figura 4.13 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 35kV
Figura 4.14 Fluke 1550C/1555 Insulation Tester
Figura 4.15 Curva de degradación de aislamiento en muestras de poste PRFV 58
Figura 4.16 Muestras de Postes PRFV de la Empresa Equisplast
Figura 4.17 Configuración de electrodos 59
Figura 4.18 Incremento del nivel de tensión, según método A del ASTM 59
Figura 4.19 Muestras de Postes PRFV después de las pruebas61
Figura 4.20 Distribución Gaussiana de los 70 datos obtenidos de las pruebas de tensión de ruptura
Figura 5.1 Forma de onda de impulso tipo rayo64
Figura 5.2 Circuitos de tensión de impulso tipo rayo
Figura 5.3 Procedimiento para ensayo niveles múltiples
Figura 5.4 Circuito Esquemático implementado en el laboratorio de alta tensión70
Figura 5.5 Circuito implementado en el laboratorio de alta tensión

Figura 5.6 Adquisición de datos y muestra de PRFV en ensayos de impulso tipo rayo	о а
120.7kV pico	72
Figura 5.7 Prueba niveles múltiples	72
Figura 5.8 Resultados prueba niveles múltiples	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Condiciones Atmosféricas normalizadas por la IEC 60071-112
Tabla 2.2 Niveles de Contaminación dados por la normativa IEC 6007113
Tabla 3.1 Tensiones soportadas normalizadas
Tabla 3.2 Nivele de aislamiento normalizado Gama I
Tabla 3.3 Datos característicos de la red de Distribución CentroSur
Tabla 3.4 Determinación Tensión de Frecuencia Industrial
Tabla 3.5 Disposición de Conductores en eje estructura Trifásica-Semicentrada
Tabla 3.6 Componentes del Sistema trifásico "Secuencia Positiva, negativa, cero"
Tabla 3.7 Sobretensiones por fallas a tierra 27
Tabla 3.8 Sobretensiones por rechazo de carga "Fase-Tierra, Fase-Fase"27
Tabla 3.9 Condiciones del sistema de distribución para aplicación "sobretensión de frentelento 2% debido e energización y re cierre trifásico"28
Tabla 3.10 Resultados Sobretensiones frontales lentas para entrada de la línea por reenergización y para equipos por Energización y re-energización
Tabla 3.11 Máxima tensión residual con corrientes de descarga pararrayos 18 kV HeavyDuty PDV-100 Optima
Tabla 3.12 Nivel de protección al impulso de maniobra e impulso atmosférico depararrayos 18 KV Heavy Duty PDV-100 Optima
Tabla 3.13 Tensiones Representativas de Frente Lento
Tabla 3.14 Sobretensiones temporales "con factor de coordinación Kc=1"
Tabla 3.15 Sobretensiones frontales lentas para equipos de entrada de línea (aislamiento externo)
Tabla 3.16 Sobretensiones frontales lentas para equipos
Tabla 3.17 Datos característicos del sistema de distribución (SD)
Tabla 3.18 Resultados cantidad de flameos inducidos (rayos/100Km/año)
Tabla 3.19 Análisis de descargas atmosféricas IEEE 1410 39
Tabla 3.20 factores de comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada al equipo de transformación 40
Tabla 3.21 Datos iniciales para determinar sobretensiones de frente rápido
Tabla 3.22 Resultados sobretensiones de frente rápido
Tabla 3.23 Factores de corrección atmosférica para sobre tensión a frecuencia industrial,impulso tipo rayo, impulso de conmutación
Tabla 3.24 Resultados de tensiones de soportabilidad requeridas

Tabla 3.25 Resumen de tensiones mínimas requeridas
Tabla 3.26 Resumen de tensiones de resistencia requeridas
Tabla 3.27 Resultados coordinación de aislamiento aplicando la normativa IEC 60071 45
Tabla 4.1 Componentes empleados para circuito de medición de DP
Tabla 4.2 Niveles de tensión y tiempo de duración del ensayo
Tabla 4.3 Valores obtenidos sobre 10 muestras de PRFV a 5 kV rms en ensayo de DP 49
Tabla 4.4 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste (PRFV) a 10 kV rms en ensayo deDP
Tabla 4.5 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 15kVrms en ensayo de DP
Tabla 4.6 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 20kV rms en ensayo de DP
Tabla 4.7 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 25kV rms en ensayo de DP 53
Tabla 4.8 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 30 kV rms en ensayo de DP
Tabla 4.9 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste (PRFV) a 35 kV rms55
Tabla 4.10 Valores de resistencia de aislamiento en muestras de poste (PRFV) de 0 a 50kV rms57
Tabla 4.11 Datos de Ensayo de voltaje de ruptura de 70 muestras
Tabla 4.12 Cuadro comparativo de rigidez dieléctrica de diversos postes de fibra de vidrio
Tabla 5.1 Factores electrogeometricos 66
Tabla 5.2 Lista de componentes empleados para el circuito de Impulso tipo Rayo
Tabla 5.3 Resultados prueba niveles múltiples

GLOSARIO

ASTM: Sociedad Americana de Materiales de Prueba. **IEC:** Comisión Electrotécnica Internacional. **IEEE:** Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. **COV:** Tención continúa de operación. DAQ: Adquisición de datos, National Instruments. **DP:** Descargas parciales. H: Altitud sobre el nivel del mar m.s.n.m. *Id:* Intensidad nominal de descarga [k.A] **K:** Factor de defecto a tierra. Ka: Factor de corrección por altura. Kc: Factor de coordinación. **Ks:** Factor de seguridad. kV: Kilovoltio Unidad de medida del potencial eléctrico. **LIW:** Conversión a tensión soportada por impulso de rayo. **Ng:** Densidad de descargas a tierra. pC: Pico Culombio, unidad de carga eléctrica. **PRFV:** Poliéster reforzado con fibra de vidrio. **Rii:** Resistencia AC del conductor (Ω/km) **RMG:** Radio medio geométrico del conductor AC (m) **SEP:** Sistema Eléctrico de Potencia. Sf: Factor de protección ante descargas atmosféricas. SWD: Conversión a tensión soportada de frecuencia industrial de corta duración. **Td:** Días de tormenta al año. **TOV:** Sobretensión que tolerar el pararrayos. **Uc:** Voltaje de operación continua $\lceil k V \rceil$ **Ucd:** Factor de coordinación determinista. **Ucw:** Tensión soportada de coordinación $\lceil kV \rceil$ **Ue2**: Valor de sobretensión fase-tierra con una probabilidad del 2% de ser excedida $\lceil kV \rceil$ Uk: Tasa de defectos anuales de la línea aérea para un diseño que corresponda al primer kilómetro a partir del equipo de transformación [1/(100km.año); 1/(m.año)] **Um:** Tensión asignada al equipo $\lceil kV \rceil$

Up2: Valor de sobretensión fase-fase con una probabilidad del 2% de ser excedida [kV]

Upl: Nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo rayo [kV]
Ups: Nivel de protección del pararrayos a impulsos tipo maniobra [kV]
Ur: Tensión asignada al pararrayos [kV]
Urp: Sobretensión representativa [kV]
Urw: Tensión soportada especificada [kV]
Us: Tensión base [kV]
Uw: Nivel de aislamiento normalizado [kV]
Z0: Impedancia de secuencia cero.
Z1: Impedancia de secuencia positiva.
Z2: Impedancia de secuencia negativa.

µA: Micro Amperio unidad de medida de la intensidad de corriente eléctrica.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) debe operar de forma segura y confiable, garantizando la continuidad del suministro eléctrico, ya que una falla del mismo representa pérdidas económicas considerables, para ello se establecen niveles de confiabilidad altos para mantener el suministro de energía constante.^[1]

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovables (MEER), realizo la homologación de las unidades de propiedad (UP) y de las unidades de construcción (UC), donde especifica características técnicas que deben cumplir los equipos y materiales para la construcción de las redes eléctricas.^{[1] [2]}

Las unidades de propiedad dentro de sus especificaciones para la construcción del poste de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) no dictamina una normativa que establezca el nivel de aislamiento y rigidez dieléctrica.^[3]

Para ello se realizarán pruebas en el laboratorio de alta tensión en un determinado número de muestras de postes de poliéster reforzados con fibras de vidrio (PRFV) donde se determinara descargas parciales (DP) y rigidez dieléctrica mediante coordinación de aislamiento, el cual consiste en establecer un conjunto de voltajes normalizados que caracteriza el aislamiento del material, considerando condiciones ambientales, factores de seguridad y niveles de contaminación propios de la región como establece la norma IEC 60071 "Coordinación de Aislamiento".^{[4] [5]}

Para determinar la rigidez dieléctrica nos basaremos en el estándar American Society for Testing and Materials "ASTM D-149", la cual establece el procedimientos para la determinación de la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes sólidos a frecuencias comerciales en condiciones específicas.^[6]

1.1. Planteamiento Del Problema

Uno de los elementos más importantes en un Sistema de Distribución (SD) son los postes, cuyo fin es el soporte de redes eléctricas de media y baja tensión, líneas de comunicaciones, iluminación entre otros; en la actualidad se emplean postes de hormigón armado (HA) y de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV).

En lo referente a postes de polímeros reforzados con fibra de vidrio (PRFV), las unidades de propiedad (UP) específica normas de fabricación; para esfuerzos tangenciales, longitudinales y carga de rotura la norma ANSI CI36.20-2008, para la resistencia a los rayos UV las normas ANSI C136.20, ASTM G154 y ensayos de autoextinsión (velocidad de combustión) la norma ASTM D635, [3] pero no especifica una norma en cuanto a nivel y pruebas de aislamiento, por lo cual se propone realizar ensayos en alto voltaje para determinar rigidez dieléctrica, nivel de degradación y contaminación basado en normativas internacionales como ASTM D149, ASTM D3426, IEC 60270, determinando características predominantes de aislamiento para una correcta construcción de poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV). ^{[5] [6] [7]}

1.2. Justificación

La Empresa Equisplast dedicada a la fabricación de postes (PRFV) con el interés de mejorar la calidad del producto, presto interés en realizar pruebas de alto voltaje para determinar la calidad y nivel de aislamiento de los postes.

Mediante coordinación de aislamiento, se establece un conjunto de tensiones normalizadas que caracteriza el aislamiento del material, considerando condiciones ambientales, factores de seguridad y niveles de contaminación propios de la región como establece la norma International Electrotechnical Commission "IEC 60071" "Coordinación de Aislamiento"

La rigidez dieléctrica en materiales sólidos, a diferencia de aislamientos de otro tipo resultan inutilizables ante una descarga disruptiva. Mediante la normativa ASTM D-149 la cual describe metodologías para estimar rigidez dieléctrica en materiales aislantes sólidos, permitirá determinará la tensión de ruptura y valor de rigidez dieléctrica del aislante, el cual se lo podrá contrastar mediante la coordinación de aislamiento.^[6]

El análisis de las descargas parciales da como resultado el estado de aislamiento, importante para la detección de posibles fallas en equipos eléctricos, la norma IEC 60270 plantea métodos para la detección de las descargas parciales, las mediciones se podrán realizar mediante un circuito de medición directa, la cual determinará las corrientes de fuga que se producen atreves del aislante. ^[5]

Para la comprobación del Nivel Básico de Impulso (BIL), se realizarán pruebas de tensión normalizada de impulso tipo rayo, con forma de onda de 1.2 µs de frente y de 50 µs de cola en el laboratorio de alta tensión, obteniendo una base estadística de los resultados, comprobando el nivel de aislamiento.

Realizadas las pruebas se cotejara los datos, determinado las características predominantes del aislamiento del poste, validando la calidad del producto.

1.3. Objetivos

1.3.1.Objetivo General

• Determinar las 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 EQUISPLAST.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar rigidez dieléctrica y nivel de degradación en la muestra de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PR.FV).
- Evaluar método de medición y detección de descargas parciales mediante análisis de corrientes en muestra de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PR.FV).
- Determinar el Nivel Básico de Impulso (BIL), corrección de altura óptima para región "coordinación de aislamiento" en poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PR.FV).
- Identificar e interpretar resultados obtenidos, evaluando con estándares internacionales para determinar la calidad del producto.
- Determinar características predominantes de aislamiento para una correcta construcción de poste de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) con valores de BIL, grado de contaminación y rigidez dieléctrica óptimos.

CAPÍTULO 2

2. Fundamento Teórico

2.1. Proceso de fabricación del Postes de Poliéster Reforzados con fibra de Vidrio (PRFV)

Equisplast es una empresa ecuatoriana que se dedica al desarrollo de nuevas soluciones en postes y estructuras de poliéster reforzados con fibra de vidrio -PRFV-, estableciéndose como líder del mercado ecuatoriano con presencia comercial en toda Suramérica.^[8]

Los postes de poliéster son fabricados con materiales compuestos (fibra, resina, protección UV), presentando características resistentes y un mejor desempeño, ^{[9] [10]} está compuesto por un 40 % de resina, 60 % de fibra de vidrio y recubrimiento total para protección de rayos UV, como lo establece las Unidades de Propiedad -UP- conforme a las normas ANSI C136.20, ASTM G154, obteniendo un poliéster termoestable con gran resistencia a altas temperaturas, debido al tipo de resina usado para su fabricación. ^{[3] [11]}



Figura 2.1. Composición del Polímero (PRFV). Fuente: Los Autores

El proceso de fabricación consta de: laminado de filamentos, pulverización, pultrusíon y centrifugado.^[12]

2.1.1. Laminado de Filamentos

El lamiando de filamento consiste en el enrollado de mechas de fibra de vidrio, impregnadas con resina en un mandril giratorio con patrones preestablecidos, siendo un proceso semiautomatizado permitiendo uniformidad en la colocación de la fibra. ^{[10] [11]}



Figura 2.2. Proceso de laminado de filamento. Fuente: [11]

2.1.2. Pulverización

Consiste en la aplicación uniforme de resina y fibra de vidrio sobre el producto laminado, mediante máquinas que succiona y compacta la mezcla, evitando imperfecciones en la superficie del producto. ^{[10] [11]}



Figura 2.3 Proceso de Pulverización. Fuente: [11]

2.1.3. Pultrusion

Este proceso consiste en impregnar resina a las mechas de fibra de vidrio, en el cual se obtiene un perfecto acabado superficial, alcanzando alta resistencia mecánica. ^{[10] [11]}



Figura 2.4 Proceso de Pultrusíon. Fuente: [11]

2.1.4. Centrifugado

El Centrifugado, consiente en la compactación de resina y fibra de vidrio mediante un molde giratorio brindando uniformidad a los polímeros cilíndricos o redondos, debido a la gran velocidad que toma el molde, secando los residuos de aire y ofreciendo una superficie lisa sobre el poste. ^{[10][11]}



Figura 2.5 Proceso de Centrifugado. Fuente: ^[11]

2.2. Aislamiento Eléctrico

El aislamiento eléctrico es parte fundamental de un SEP, ya que evita daños parciales o totales debido a los diferentes niveles de tensión, además soporta sobretensiones causadas por fallas temporales y mantiene la seguridad en equipos; por lo que se requiere un nivel óptimo de aislamiento que brinde altos niveles de confiabilidad. El nivel de aislamiento se determina acorde a los niveles de tensión, contaminación y condiciones climáticas que debe soportar el equipo. ^{[13] [14]}

La propiedad más importante que tiene un material aislante es la rigidez dieléctrica E_c –, esta se define como el máximo nivel de tensión que se puede soportar el aislante entre dos electrodos sin que exista la disrupción.^[15]

2.2.1. Tipo de Aislamiento

La Comisión Electrotécnica Internacional -IEC- define 4 tipos de aislamientos existentes.

Aislamiento Interno

Este aislamiento se enfoca a equipos que están protegidos de los efectos de la atmósfera y otras condiciones externas, mediante materiales aislantes, pudiendo ser sólidos, líquidos o gaseosos ^[4] ^[16]

Aislamiento Externo

Es la distancia que existe entre el aire atmosférico y la superficie del aislante solido que están sujetos a esfuerzos dieléctricos, condiciones ambientales como la contaminación, la humedad, etc.^[4]

Aislamiento Auto Regenerado

Es el aislamiento que después de un corto tiempo de descarga disruptiva, recupera completamente sus propiedades aislantes.^[4]

Aislamiento No Auto Regenerado

Este tipo de elemento pierde su propiedad aislante, o no las recupera en su totalidad después de una descarga disruptiva.^[4]

2.3. Rigidez Dieléctrica

La característica más importante de un aislante, es su rigidez dieléctrica, para ello existen estándares que indican el nivel de aislamiento. La rigidez dieléctrica es el máximo gradiente potencial que puede soportar un medio aislante antes de que ocurra una degradación del mismo o una rotura total, su unidad de medida es kV/mm.^[17]

2.3.1. Estándar ASTM D-149

El estándar ASTM D-149, se refiere al "Método de prueba para la tensión de ruptura dieléctrica y rigidez dieléctrica de los materiales de aislamiento sólido a frecuencias comerciales", dicho estándar dictamina un procedimiento para determinar la rigidez dieléctrica en materiales aislantes sólidos, obteniendo como resultado la tensión de ruptura del aislante, mismo que se podrá establece por tres métodos tales como: ^[6]

2.3.1.1. Método A: Prueba de Corto tiempo

Este método se basa en aplicar tensión uniforme a los electrodos de prueba, desde cero hasta producir avería en el material, tal como se muestra la figura 2.6.^[6]



Figura 2.6 Incremento del nivel de tensión, según método A del ASTM Fuente: Los Autores

Este método establece un tiempo promedio de rotura entre 10s y 20s, en mucho de los casos se utilizará una tasa referencial de 500 v/s. ^[6]

2.3.1.2. Método B: Prueba Paso a Paso

Este método consiste en aplicar un voltaje inicial a los electrodos de prueba, el voltaje inicial será acorde al material aislante que se incrementará a manera escalonada hasta producirse la ruptura, tal como lo establece la figura 2.7.^[6]



Figura 2.7 Incremento del Voltaje, según método B del ASTM D-149 Fuente: Los Autores

Para determinar el nivel de tensión inicial se realizará pruebas preliminares pudiendo ser el 50 % del voltaje de ruptura. ^[6]

Al momento de producirse la ruptura, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Si la ruptura se produce al incrementar el voltaje, el valor de ruptura es igual al nivel de tensión anterior.^[6]
- Si la ruptura se produce antes de finalizar la prueba, el valor de tensión de la ruptura será el último de la etapa completada con éxito.^[6]

Para realizar una prueba con éxito la ruptura se dará entre 4 a 10 niveles, si ocurre después del 10mo, se realizará nuevamente la prueba con un valor de tensión inicial mayor; al darse la ruptura antes del 4to nivel con tiempo menor a los 120s, se debe repetir la prueba con un nivel de voltaje inicial menor.^[6]

2.3.1.3. Método C: Prueba lenta de velocidad en ascenso

Este es similar al método A, con la variante que se realiza con un nivel de tensión inicial hasta el valor de tensión de ruptura, tal como lo indica la figura 2.8.^[6]



Figura 2.8 Incremento del Voltaje, según método C del ASTM D-149 Fuente: Los Autores

2.4. Coordinación de Aislamiento

Consiste en seleccionar un conjunto de tensiones soportadas normalizadas que caracteriza el aislamiento del material, considerando condiciones ambientales y características de equipos de protección disponibles. ^[4] La coordinación de aislamiento es necesario dentro de un SEP, dado que está expuesto a sobretensiones ocasionado por fallas, operación de interruptores y descargas atmosféricas. ^[18]

La normativa IEC presenta una guía de aplicación para la selección de la soportabilidad o resistencia dieléctrica de un equipo y su aplicación en relación a las tensiones que pueda aparecer en el sistema e instalaciones^{[4] [19]}

Las Normas a utilizar para el cálculo de coordinación de aislamiento son:

- IEC 60071 1, Coordinación del aislamiento: definición, principios y reglas.
- IEC 60071 2, Coordinación de aislamiento: Guía de aplicación

2.4.1. IEC 60071-1 Coordinación de Aislamiento parte 1: Definiciones y Reglas

La norma define conceptos y procedimientos básicos a seguir únicamente para sistemas trifásicos de corriente alterna superiores a 1 kV; la normativa define sobretensiones que pueden presentarse en el sistema, clasificándolos según su forma y su duración.^[4]

- Sobretensión Permanente: Voltaje a la frecuencia de la red, considerada con un valor de voltaje eficaz constante, aplicada permanentemente a cualquier par de bornes de una configuración de aislamiento. ^[4]
- Sobretensión Temporal: Sobretensión de frecuencia de potencia de duración relativamente larga.^[4]
- Sobretensión Transitoria: Sobretensión de corta duración, que no sobrepasa de unos milisegundos, generalmente fuertemente amortiguada^[4]

A su vez, la Sobretensión transitoria se dividen en:

- Sobretensión de Frente Lento: Sobretensión transitoria, generalmente unidireccional con un tiempo de pico de $20 \ \mu s < T_p \le 5000 \ \mu s$, y de duración de cola $T_2 < 20 \ ms$.^[4]
- Sobretensión de Frente Rápido: Sobretensión transitoria, por lo general unidireccional, con el tiempo de pico $0.1\mu s < T_p \le 20\mu s$, y de duración de cola $T_2 < 300\mu s$.^[4]
- Sobretensión de Frente Muy Rápido: Sobretensión transitoria, generalmente unidireccional con tiempo pico de $T_f \leq 0.1 \, \mu s$ y con o sin oscilación superpuestas de frecuencia 300 $kHz < f < 100 \, MHz$.^[4]
- Sobretensión Combinado: Sobretensión (temporal, de frente lento, de frente rápido, de frente muy rápido), que consiste en dos componentes de tensión aplicadas simultáneamente, dicha sobretensión se clasifica como su componente de valor de cresta más elevado. ^[4]

La norma IEC 60071, determina tiempos de duración de los niveles de tensión estandarizadas para pruebas:

- Tensión de Frecuencia Industrial de corta duración.- Tensión sinusoidal con una frecuencia entre los 48 Hz y 62 Hz, con una duración de 60 segundos.^[4]
- Impulso de Conmutación Estándar.- Tensión de impulso que tiene un tiempo de pico de 250 μs y un tiempo de valor medio de 2500 μs.^[4]
- Impulso de Rayo Estándar.- Tensión de impulso que tiene un tiempo de frente de 1.2 μs y un tiempo de valor medio de 60 μs.^[4]

Class	Low frequency Transie		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over- voltage shapes		1000			
Range of voltage or over- voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz or} 60 \text{ Hz} T_t \ge 3 600 \text{s}$	$\begin{array}{l} 10 \ \text{Hz} < f < \\ 500 \ \text{Hz} \end{array}$ $\begin{array}{l} 0.02 \ \text{s} \leq T_{\rm t} \leq \\ 3 \ 600 \ \text{s} \end{array}$	20 µs < T _p ≤ 5 000 µs T ₂ ≤ 20 ms	0,1 μs < T ₁ ≤ 20 μs T ₂ ≤ 300 μs	$T_{\rm f} \le 100 {\rm ns}$ 0,3 MHz < $f_{\rm 1} <$ 100 MHz 30 kHz < $f_{\rm 2} <$ 300 kHz
Standard voltage shapes			Tp		a
	f = 50 Hz or 60 Hz T _t ^a	48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz T ₁ = 60 s	$T_{\rm p} = 250 \ \mu { m s}$ $T_2 = 2500 \ \mu { m s}$	$T_1 = 1,2 \ \mu s$ $T_2 = 50 \ \mu s$	
Standard withstand voltage test	а	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

Figura 2.9 Clasificación de sobretensiones estandarizadas. Fuente: ^[4]

La norma IEC establece las siguientes condiciones atmosféricas:^{[4] [20]}

Temperatura t_0	20 °C
Presión b 0	(1013 mbar)
Humedad absoluta h_{ao}	$11 g/m^3$

 Tabla 2.1 Condiciones Atmosféricas normalizadas por la IEC 60071-1

 Fuente:
 [4]

La contaminación como el polvo, lluvia acida o polución en general ante condiciones climáticas como lluvia ligera, nieve, roció o niebla pueden producir flameo por arco eléctrico en redes aéreas; la selección consiste en determinar el nivel de contaminación existente en la zona o área de estudio asemejando las condiciones a los entornos típicos propuestos por la norma IEC 60071 en donde a cada nivel de contaminación corresponde un valor mínimo de distancia de fuga expresado en mm/kV.^{[4] [19]}

Nivel de Contaminación	Ejemplos de entornos típicos	Distancia de fuga nominal mínima mm / KV
I Ligero	Áreas sin industrias y con baja densidad de viviendas equipadas con plantas de calefacción Áreas con baja densidad de industrias o casas pero sometidas a frecuentes vientos y / o lluvias Zonas agrícolas Áreas montañosas Todas estas zonas estarán situadas a una distancia mínima de 10 km a 20 km del mar y no estarán expuestas a vientos directamente desde el mar	16
II Medio	Áreas con industrias que no producen humo particularmente contaminante y / o con densidad media de viviendas equipadas con plantas de calefacción Áreas con alta densidad de casas y / o industrias pero sometidas a frecuentes vientos y / o lluvias Áreas expuestas al viento desde el mar, pero no demasiado cerca de las costas (al menos a varios kilómetros de distancia)	20
III Pesado	Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de plantas de calefacción que producen contaminación Áreas cercanas al mar o en cualquier caso expuestas a vientos relativamente fuertes del mar	25
IV Muy Pesado	Áreas generalmente de extensión moderada, sometidas a polvos conductores y al humo industrial produciendo depósitos particularmente conductores gruesos Zonas generalmente de extensión moderada, muy cerca de la costa y expuestas al mar-aerosol o vientos muy fuertes y contaminantes del mar Áreas desérticas, caracterizadas por la ausencia de lluvias durante largos periodos, expuestas a fuertes vientos con arena y sal, y sometidas a condensación regular	31

 Tabla 2.2 Niveles de Contaminación dados por la normativa IEC 60071

 Fuente: [4]

La normativa establece dos categorías de sobretensiones normalizadas,

- Gama I: Mayor a 1 kV hasta 245 kV.
 - o Esta gama cubre redes de Sub transmisión y distribución
- Gama II: Mayor a 245 kV.
 - o Esta gama cubre principalmente redes de transmisión

2.4.2. IEC 60071-2 Coordinación de Aislamiento parte 2: Guía de Aplicación

La norma detalla pasos a seguir para realizar la coordinación determinando los niveles de aislamiento de equipos e instalaciones, tensiones soportadas normalizadas considerando factores de seguridad.^[15]



Figura 2.10 Procedimiento para Coordinación de Aislamiento Fuente: Los Autores

2.5. Descargas Parciales

Es un fenómeno que indica la degradación del aislamiento a diferentes niveles de potencial siendo por pulso de corriente o voltaje; el pulso se mide utilizando circuitos detectores adecuados como lo indica la normativa IEC 60270. Las DP se producen cuando la intensidad del campo eléctrico excede la resistencia dieléctrica del aislamiento, suelen presentarse mediante emisiones de sonido, luz, calor y reacciones químicas.^{[5] [23] [5]}

Las -DP- son consecuencia de la concentración de esfuerzos eléctricos que puede darse en el aislamiento o superficie, por lo general tiene una duración menor a 1 μs sin embargo pueden presentarse de forma continua como las denominadas descargas sin impulsos en medios dieléctricos gaseosos.^[5]



Figura 2.11 Impulsos de corriente con descarga parcial Fuente: ^[14]

2.5.1. Origen De Las Descargas Parciales

La detección de DP en equipos de un SEP se dio a principios del siglo XX presentándose de forma visual y auditiva; los sistemas para la medir la presencia DP se basaban en señales eléctricas, la cual valora patrones de pulsos de descargas a una escala calibrada audible, dichos ensayos tenían un índice bajo de confiabilidad; en la década de los años 40 mediante la invención del osciloscopio y tubos de rayos catódicos se pudo tener una mayor comprensión de fenómeno y determinar los efectos perjudiciales sobre materiales aislantes.^[23]

2.5.2. Tipos De Descargas Parciales

Considerando condiciones ambientales, humedad, contaminación y propiedades del material aislante, se tiene 4 tipos.^[22]

2.5.2.1. Descarga Parcial Interna

Se producen en la parte interna del material aislante de tipo solido o líquido; en aislantes solidos se produce fisuras, fallas o agujeros internos causado por la falta de homogeneidad, mientras que en aislantes líquidos las DP se producen al existir burbujas de aire teniendo como consecuencia un valor bajo de rigidez dieléctrica.^[14]



Figura 2.12 Descarga parcial de tipo Interna. Fuente: Los Autores.

2.5.2.2. Descarga Parcial Superficial

Se produce entre la interacción de dos medios dieléctricos, por general un material aislante y aire, debido a la presencia de contaminación, produciéndose carbonización sobre la superficie, las condiciones ambientales como la humedad y polución son determinantes para la aparición de descargas superficiales.^[22]



Figura 2.13 Descarga parcial de tipo Superficial. Fuente: Los Autores

2.5.2.3. Descarga Parcial Arborescencia Eléctrica

Este tipo de DP se producen al existir defectos sobre el material aislante, con el tiempo la descomposición tiende a crecer formando a su paso ramificaciones asemejándose a un árbol, provocando la ruptura total.^[22]



Figura 2.14 Descarga parcial de tipo arborescencia eléctrica. Fuente: Los Autores.

2.5.2.4. Descarga Parcial Corona

La DP de tipo corona se produce entre dos puntos de conducción a alto nivel de tensión, al exceder el valor critico se presenta el efecto corona, ionizándose el aire alrededor del conductor, por lo general se presenta de forma lumínica "color purpura brilloso".^[22]

El efecto corona es de baja energía, pero al estar sometido por tiempos prolongados, produce una degradación considerable del aislamiento.^[22]



Figura 2.15 Descarga parcial de tipo Corona Fuente: ^[22]

2.5.3. Medición de Descargas Parciales (DP)

La normativa IEC establece métodos para la medición y detección de DP. [14] [23]

- IEC 60270 para métodos convencionales
- IEC 62478 para métodos no convencionales.^[5]

2.5.3.1. IEC 60270: Métodos Convencionales

La norma establece dos métodos convencionales de detección de DP mediante circuitos de medición directa e indirecta, ambos métodos analizan la señal eléctrica, en el cual se visualiza los pulsos o picos de corriente, como recomendación el material aislante deberá estar libre de impurezas, seco y a temperatura ambiente, ya que estos pueden causar descargas parciales prematuras que no correspondan a fallas del aislamiento.^[5]

Los dos métodos emplean los mismos elementos, a diferencia que para la medición directa la muestra se coloca en serie con la impedancia de medición, mientras que en la medición indirecta la muestra se coloca en paralelo con el capacitor de acoplo y la impedancia de medición, los elementos que conforman el circuito son: ^[14]

- Fuente de alta tensión
- Impedancia para realizar el filtrado de ruido o de interferencias denominada "Zn"
- Un capacitor que permita el paso de corriente a altas frecuencias, denominado "Ck"
- Osciloscopio para la adquisición de datos "corriente y voltaje" con respectivas sondas.
- Muestra a cual se le realizara la prueba denominada "Ca"
- Impedancia de medición, por el cual circulan los pulsos de corriente para adquisición de datos, denominada "Zm".



Figura 2.16 Circuito de Medición Indirecta para la detección de descargas parciales Fuente: Los Autores



Figura 2.17 Circuito de Medición directa para la detección de descargas parciales Fuente: Los Autores
2.5.3.2. IEC 6478: Métodos no Convencionales

Los métodos no convencionales, se refiere al procedimiento usados antes de la invención de equipos de medida como osciloscopios, uno de los métodos no convencionales es el visual, el cual se detecta mediante la observación de la prueba, notando el instante y nivel de tensión al que se producen las DP, otro método es el auditivo, el cual consiste en percibir el instante de la descarga parcial, ya que al elevar el nivel de tensión se produce un zumbido característico, al producirse la ruptura del material aislante se genera un estruendo, indicando que el material perdió sus propiedades aislantes.^{[23][14]}

CAPÍTULO 3

3. Coordinación De Aislamiento

El estándar IEC 60071 describe una metodología para la coordinación del aislamiento en sistemas de alto voltaje; en el cual se determina un conjunto de tensiones soportadas normalizadas para el aislamiento longitudinal, fase-tierra y fase-fase del material e instalaciones, considerando características de los dispositivos de protección disponibles y condiciones ambientales.^[4]

La normativa IEC 60071 cubre:

- Ensayos a tensión de corta duración a frecuencia industrial.
- Ensayos a impulsos tipo maniobra.
- Ensayos a impulso tipo rayo.
- Ensayos a tensión combinado.

Las tensiones soportadas normalizadas se muestran en la tabla 3.1, el conjunto de tensiones constituye un nivel de aislamiento asignado según la normativa IEC.^[4]

Nivel de t	ensión sopo	rtado norma	lizado de co en	orta duraciór kV)	n a frecuenci	a industrial	(expresados
10	20	28	38	50	70	95	140

185	230	275	325	360	395	460	510
570	630	680					
	Nivel de te	ensión sopor	tado a impu	lsos normal	izado (expre	sados en kV	7)
20	40	60	75	95	125	145	170
250	325	450	550	650	750	850	950
1050	1175	1300	1425	1550	1675	1800	1950
2100	2250	2400					

 Tabla 3.1 Tensiones soportadas normalizadas

Fuente: ^[4]

3.1. Niveles de aislamiento normalizados

Los niveles de tensión soportados normalizados se asocian al nivel de tensión más elevado del sistema, para el aislamiento de tipo gama I las tensiones normalizadas de corta duración a frecuencia industrial e impulso tipo rayo fase-fase es igual a las tensiones fase-tierra, tal como se muestra en la tabla 3.2.^[4]

	Nivele de aislamiento normalizado $1KV < Um \le 245Kv$	Gama I
Tensión más elevado U _m KV (Valor eficaz)	Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial KV (Valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a impulso tipo rayo Kv (Valor de cresta)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
123	185 230	450 550
145	185 230 275	450 550 650
170	230	550

	275	650
	325	750
	275	650
	325	750
245	360	850
	395	950
	460	1050

 Tabla 3.2 Nivele de aislamiento normalizado Gama I

 Fuente:
 [4]

3.1.1. Origen y clasificación de las sobretensiones

Las sobretensiones se clasifican por parámetros tales como duración, forma y el efecto sobre el aislamiento.

Orígenes de la sobretensión:

- Tensión permanente a frecuencia industrial
- Sobretensión temporal
- Sobretensión de frente lento
- Sobretensión de frente rápido
- Sobretensión de frente muy rápido
- Sobretensión combinado

3.2. Tensiones y sobretensiones representativas

3.2.1. Tensión continua (frecuencia industrial)

Para el diseño de coordinación de aislamiento, la tensión a frecuencia industrial se considerada como constante e igual a la tensión de red más alta.^[4]

3.2.2. Sobretensiones temporales

Tipos de sobretensiones temporales presentes en un SEP.^[4]

- Fallo a tierra.
- Rechazo de carga.
- Resonancia y ferroresonancia.
- Sobretensiones longitudinales durante la sincronización.
- Las combinaciones de orígenes de sobretensiones temporales.

3.3. Procedimiento de coordinación de aislamiento

La determinación de las tensiones de coordinación consiste en definir el valor más bajo de las tensiones toleradas de aislación que cumplen el criterio de desempeño al ser sometido a sobretensiones representativas en condiciones de servicio.^[4]

3.3.1. Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp})

Las sobretensiones que esfuercen el aislamiento deben determinarse en amplitud, forma y duración, mediante un análisis de red el cual incluye la localización de los dispositivos de limitación de sobretensiones.^[4]

Las sobretensiones puede caracterizarse por:

- Un valor máximo estimado
- Un conjunto de valores de cresta
- Una distribución estadística de valores de cresta.

3.3.1.1. Parámetros generales de Funcionamiento del Sistema.

Dentro de un SEP, las consideraciones principales que se deben de tener en cuenta:^[15]

- Tensión nominal
- Frecuencia nominal
- Tensión asignada al equipo (*Um*)
- Nivel de contaminación ambiental
- Sistemas de puesta a tierra
- Altura sobre el nivel del mar
- Temperatura promedio

La Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR encargada de la distribución y comercialización de la energía eléctrica en la las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago, dota con una tensión nominal de 22KV en redes de distribución trifásicas.

Datos Red o	le Distrib	ución	
Voltaje del Sistema más Alto	Us	24000	V (rms Fase-Fase)
Altitud	Н	3640	m.s.n.m
Nivel de Contaminación	Medio	20	mm/kV

Tabla 3.3 Datos característicos de la red de Distribución CentroSur

Fuente: Los Autores

3.3.1.2. Contaminación

La lluvia, conjuntamente con la contaminación, puede reducir drásticamente la resistencia de aislamiento, el destello de aislamiento se produce cuando la superficie está contaminada y se moja debido a lluvia ligera, nieve, rocío o niebla sin un efecto de lavado significativo.

La normativa IEC 60071 dictamina cuatro niveles cualitativos de contaminación, como se indica en la Tabla 2.2 el cual describe ambientes y condiciones al cual puede estar sometido un material aislante.

3.3.1.3. Tensión a frecuencia industrial

Para propósitos de coordinación de aislamiento el voltaje más alto del sistema es igual a la máxima de tensión de diseño de los equipos de patio $U_s = U_m$ y la tensión base, U_{base} descrita por la ecuación 3.1.^[4]

$$U_{base} = U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \tag{3.1}$$

Donde

- U_m : Es el voltaje más alto del sistema.

Paso 1: determinad	ción de las sobretensiones represen	tativas – valores U _{rp}
	Tensión de Frecuencia Industrial	,
U _{base}	19,59591794	kV
Tabla 3.4	Determinación Tensión de Frecuenci	a Industrial

Fuente: Los Autores

3.3.1.4. Sobretensiones temporales (Fallas a tierra)

La amplitud de una sobretensión depende del sistema de puesta a tierra del neutro y la localización de la falla donde la sobretensión a frecuencia industrial es la magnitud más alta que puede producirse en una fase mientras ocurre una falla a tierra. ^[4]

3.3.1.5. Determinación del Factor de falla a Tierra k

La norma IEC 60071-2 define un factor de falla a tierra "k" este depende de la características del sistema, dicho factor se determina mediante las impedancias de secuencia positiva Z1 = R1 + jX1 y secuencia cero Z0 = R0 + jX0 del sistema, incluyendo la resistencia de falla R.^[4]

Impedancia serie de una red con retorno por tierra considerando suelo real

Para el modelado de la matriz de secuencia de la red eléctrica de distribución se emplea el modelo de ecuaciones de Carson, estas se basan considerando la tierra como un plano sólido semi–infinito y homogéneo, es decir la conductibilidad de la tierra es uniforme.^[1]

Ecuaciones de Carson

En las fórmulas de Carson para la impedancia propia y mutuas con retorno común por tierra, son encontradas a través del método de imágenes de los distintos conductores, cuya distancia bajo la superficie es igual a la distancia que el conductor tiene sobre tierra. Para la impedancia propia del conductor se emplea la ecuación 3.2: ^[1]

$$Zii = Rii + \frac{1}{2}\pi \times 10^{-4}\omega + j\frac{\omega\mu}{2\pi}ln\frac{De}{RMGi}\left(\frac{\Omega}{Km}\right)$$
(3.2)

Para las impedancias mutuas se emplea la ecuación 3.3.

$$Zik = \frac{1}{2}\pi \times 10^{-4}\omega + j\frac{\omega\mu}{2\pi}ln\frac{De}{Dik}\left(\frac{\Omega}{Km}\right)$$
(3.3)

Donde:

- Rii: es la resistencia AC del conductor (Ω/km)
- RMGi: es el radio medio geométrico del conductor AC (m)
- Sii: Distancia del conductor i a su imagen (m)
- Sik: Distancia del conductor i a la imagen del conductor k (m)
- Dik: Distancia del conductor i al conductor k (m)

Datos generales del sistema de distribución.

La topología comúnmente utilizada en sistemas de distribución es la Trifásica-Semicentrada-Pasante o Tangente "3SP" descrita en las (UC)



Figura 3.1 Estructura Trifásica-Semicentrada de las unidades de construcción del MEER Fuente: ^[2]

Los conductores comúnmente empleados para Fase PIGEON 3/0 mientras que para neutro es de tipo RAVEN 1/0 montados sobre postes de hormigón armado de 12m de altura con un empotramiento de 1.7m.

Topología estructural del sistema de distribución

Como datos iniciales en la tabla 3.2 se indica la disposición de la estructura, distancias entre fases, neutro y tierra.



Figura 3.2 Disposición de la estructura Trifásica-Semicentrada Fuente: Los Autores

Aplicando las ecuaciones de Carson obtenemos la matriz de impedancia característica para la topología de red expuesta.

1	Disposición	De Co	onductores En Eje	es	
Eje 2	Y			Eje Y	
Altura F1:	-1,100	[m]	Posición F1:	10,3	[m]
Altura F2:	-0,700	[m]	Posición F2:	10,3	[m]
Altura F3:	1,100	[m]	Posición F3:	10,3	[m]
Altura N:	0,150	[m]	Posición N:	9,1	[m]
Profundidad T:	0,600	[m]	Posición T:	-1066,051	[m]

 Tabla 3.5 Disposición de Conductores en eje estructura Trifásica-Semicentrada

Fuente: Los Autores

		Component	es Del Sistema	Trifásico	
Zs	Real	Imaginario	Módulo	Ángulo (Gr)	Unidad
ZO	0,51320	0,94746	1,07752	61,55709	$[\Omega/\mathrm{Km}]$
Z1	0,32003	0,42573	0,53260	53,06687	[Ω/Km]
Z2	0,32003	0,42573	0,53260	53,06687	$[\Omega/Km]$

Tabla 3.6 Componentes del Sistema trifásico "Secuencia Positiva, negativa, cero" Fuente: Los Autores

Secuencia positiva *Z*1 = 0.32003 + *j*0.42573

Secuencia cero *Z*0 = 0.51320 + *j*0.94746

El rango de valores positivos bajos de X0/X1 es válido para sistemas con neutro puesto a tierra se analiza en la figura 3.3



Figura 3.3 Relación R0/ X1 y X0 / X1 para valores constantes de factor de falla a tierra k Fuente: Los Autores

$$\frac{X0}{X1} = \frac{0.94746}{0.42573} = 2.2255$$
$$\frac{R0}{X1} = \frac{0.51320}{0.42573} = 1.2055$$

Mediante el análisis de la figura 3.3 conjuntamente con la tabla 3.6 se obtiene un Factor de Falla a tierra k=1.4 para un sistema de neutro puesto a tierra.

3.4. Fallas a tierra

La falla fase-Tierra es una de las causas más frecuentes de sobretensiones temporales, para el análisis se considera el caso de falla monofásica, el valor de amplitud de la sobretensión depende del sistema de puesta a tierra del neutro. En sistemas con neutro puesto a tierra el tiempo de despeje de la falla es generalmente menor a 1 segundo.^{[4] [15]}

Para la determinación de la magnitud de sobretensiones representativas $U_{rp}(p-e)$ ocasionadas por estos fenómenos se emplea la ecuación 3.4.^{[4][15]}

$$U_{rp}(p-e) = K \frac{U_s}{\sqrt{3}} [Fase - Tierra]$$
(3.4)

Donde:

- k: factor de defecto a tierra
- Us: tensión base

$$Urp(p-e) = 1.4 \frac{24KV}{\sqrt{3}} = 19.398 [Fase - Tierra]$$

Sobretensiones por fallas a tierra

Κ	1,4	
Urp(p-e)	19,39896904	kV
Tabla 3.7 So	bretensiones por fallas a tie	erra

Fuente: Los Autores

3.4.1. Sobretensiones por rechazo de carga

Las sobretensiones temporales fase-tierra por rechazo de carga dependen de la cantidad de carga desconectada, características de las fuentes de generación y configuración de la red después de la desconexión.^{[4] [15]}

En sistemas de extensión moderada, una pérdida total de carga puede producir sobretensiones fase-tierra con una amplitud similar a 1,2 p. u. La duración depende del equipo de control de tensión, en grandes sistemas después de una pérdida total de carga, las sobretensiones fase-tierra pueden alcanzar una amplitud de hasta 1,5 p. u. las ecuaciones 3.5 y 3.6 estiman la sobretensión por rechazo de carga fase-tierra y fase-fases respectivamente. ^[4] [¹⁵]

$$Urp(p-e) = K \frac{Us}{\sqrt{3}} [Fase - Tierra]$$
(3.5)

$$Urp(p-p) = KUs[Fase - Fase]$$
(3.6)

Donde:

- k: factor de defecto a tierra
- Us: tensión base

$$Urp(p-e) = 1.4 \frac{24 \, Kv}{\sqrt{3}} = 19.398 \, Kv \, [Fase - Tierra]$$

Sobrete	ensiones por rechazo de carga	
	fase a tierra	
$U_{rp}(p-e)$	19,39896904	kV
	fase a fase	
$U_{rp}(p-p)$	33,6	kV

 $Urp(p - p) = 1.4 \cdot 24 Kv = 33.6KV [Fase - Fase]$

Tabla 3.8 Sobretensiones por rechazo de carga "Fase-Tierra, Fase-Fase"Fuente: Los Autores

3.4.2. Sobretensiones de energización y la re-energización de línea

Para un sistema protegido por pararrayos, la sobretensión máxima prevista es igual al nivel de protección a impulso tipo maniobra U_{ps} del pararrayos, para lo cual se evaluar el factor de coordinación determinista K_{cd} dependiendo de la relación entre el nivel de protección a impulsos tipo maniobra del pararrayos U_{ps} y el valor de sobretensión estadística U_{e2} el cual tendrá un rango de 2% en valores p.u. de la tensión base, el cual se establece el evaluando la figura 3.4 $^{\rm [4]\,[13]}$



Figura 3.4 Alcance del 2% de sobretensiones de frente lento en el extremo receptor debido a la energización y re-energización de la línea "Aplicado al sistema de distribución de la CentroSur" Fuente: [4]

Condiciones del sistema de distribución	l
Energización	
Resistores de cierre de pasos simple	No
Red de alimentación	Inductivo
Compensación en Paralelo	<50%
$U_{e2}p.u.$	
Rango de sobretensión de frente lento 2% debido e	2,9 p.u.
energización y re cierre trifásico	

 Tabla 3.9 Condiciones del sistema de distribución para aplicación "sobretensión de frente lento 2% debido e energización y re cierre trifásico"

Fuente: los Autores



Figura 3.5 Relación entre el 2% de los valores de sobretensiones de frente lento fase a fase Fuente: los Autores

El valor de sobretensión estadística entre fases U_{p2} se determina a partir de la sobretensión fase-tierra. La figura 3.5 muestra las relaciones posibles entre los valores de las sobretensiones estadísticas entre fases y fase-tierra. El límite superior de este rango se aplica para reenergización trifásica, mientras que el límite inferior se aplica a sobretensiones de energización.

Al obtener el valor de la sobretensión fase a tierra con un 2% de probabilidad de ser excedido $U_{e2} = 2.9 p. u.$ y basado en la figura 3.4 relación entre los valores 2% de las sobretensiones de frente lento entre fases y fase – tierra

$$\frac{U_{p2}}{U_{e2}} = 1.6 \qquad \qquad \frac{U_{p2}}{2.9} = 1.6$$

Obteniendo el valor de la sobretensión fase a fase que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido para recierre trifásico

$$U_{p2} = 1.6 \cdot 2.9 = 4.64p.\,u.$$

3.5. Sobretensión de frente lento

Para la determinación de las sobretensiones representativas, es necesario conocer las características de equipos y estado durante la energización o re energización.

3.5.1. Sobretensiones particulares que afectan en la línea entrante.

El método phase-peak demuestra que la re-energización de la línea desde una estación 2 puede resultar con una probabilidad del 2% de tener sobretensiones en la estación 1 $U_{e2} = 2.9 p. u.$ y $U_p = 4.64 p. u.$ Las sobretensiones representativas para líneas de entrada externas, antes del pararrayo, son los valores de truncamiento y se determina mediante la

ecuación 3.7 y 3.8 para energización y re energización fase-tierra y fase-fase respectivamente.^[4]

$$U_{et} = 1.25 \cdot U_{e2} - 0.25 \, [fase - tierra] \tag{3.7}$$

$$U_{pt} = 1.25 \cdot U_{p2} - 0.43 \left[fase - fase \right]$$
(3.8)

Donde:

- U_{e2} : Valor de la sobretensión fase a tierra que tiene una probabilidad del 2% de ser excedido
- U_{et} : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a tierra
- U_{p2} : Valor de la sobretensión fase a fase que tiene una probabilidad del 2% de ser excedida
- U_{pt} : Valor de sesgamiento de la distribución acumulada de las sobretensiones fase a fase.

$$U_{et} = 1.25 \cdot 2.9 - 0.25 = 3.375 \, p. \, u.$$

$$U_{nt} = 1.25 \cdot 4.64 - 0.43 = 5.37 \, p.\,u.$$

3.5.2. Sobretensiones que afectan a todo el equipamiento

Todo equipo localizado en una subestación eléctrica es sujeto de sobretensiones de frente lento debido a la energización y re-energización de líneas, sin embargo estos impulsos son menores que en el extremo receptor (subestación eléctrica 2). $U_{e2} = 1.9 p. u.$ y $U_{p2} = 2.9 p. u.$

$$U_{et} = 1.25 \cdot 1.9 - 0.25 = 2.125 \, p. \, u.$$

$$U_{pt} = 1.25 \cdot 2.9 - 0.43 = 3.195 \, p.\, u.$$

Los resultados obtenidos anteriormente "sobretensiones que afectan la línea entrante y sobretensiones que afectan los equipos" se encuentran en valores por unidad considerando 1 p.u. 22KV por lo cual se transformara mediante las ecuaciones 3.9 y 3.10 respectivamente.

$$Uet(V) = Uet p.u. \cdot Ubase[fase - tierra]$$
 (3.9)

 $Upt(V) = Upt \ p. u. \quad Ubase[fase - fase]$ (3.10)

Sobretensiones frontales lentas	

Para equipos de entrada de línea		Para otros equipos			
Re energización		Energización y re-energización			
Ue2 p.u	2,9	Ue2 p.u	1,9		
Up2 p.u	4,64	Up2 p.u	2,9		
			•		
Uet (p.u)	3,375	Uet p.u	2,125		
Upt(p.u)	5,37	Upt p.u	3,195		
			-		
Uet kV	66,13622306	Uet kV	41,64132563		
Upt kV	105,2300793	Upt kV	62,60895783		

 Tabla 3.10 Resultados Sobretensiones frontales lentas para entrada de la línea por re energización y para equipos por Energización y re-energización

Fuente: Los Autores

3.6. Selección del pararrayos

En el mercado existe una gran variedad de fabricantes de pararrayos las marcas más reconocidas son:

- ABB.
- Siemens.
- Cooper.
- Ohio Brass (Hubell Power System).

La Empresa Eléctrica Regional CentroSur en su área de concesión comúnmente emplea la marca Ohio Brass (Hubell Power System), de tipo distribution class PDV heavy Duty.



Figura 3.6 Pararrayos Ohio Brass "Distribution class PDV", heavy Duty. Fuente: ^[24]

Electrical Characteristics

1	PDV-100 Optima										
	Rated	MCOV	Unit	0.5 µsec	500 A		8/20 Max	imum Di	scharge V	oltage - k	٧
	kV	kV	Number	IR-kV (1)	Maximum IR-kV ⁽²⁾	1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
	3	2.55	213703	10.6	7.6	8.0	8.5	9.0	9.9	11.1	13.2
	6	5.1	213705	21.3	15.3	15.9	17.0	18.0	19.8	22.3	26.5
	9	7.65	213708	31.2	22.4	23.3	24.9	26.4	29.0	32.6	38.8
	10	8.4	213709	34.0	24.4	25.4	27.1	28.8	31.6	35.6	42.3
	12	10.2	213710	40.4	29.0	30.3	32.3	34.2	37.6	42.3	50.3
	15	12.7	213713	51.4	36.9	38.5	41.1	43.5	47.8	53.8	64.0
	18	15.3	213715	60.6	43.5	45.4	48.4	51.3	56.4	63.5	75.5
	21	17.0	213717	68.3	49.0	51.1	54.5	57.8	63.5	71.4	85.0
	24	19.5	213720	81.9	58.8	61.3	65.5	69.3	76.2	85.7	102.0
	27	22.0	213722	91.9	65.9	68.8	73.4	77.8	85.5	96.2	114.4
	30	24.4	213724	101.1	72.5	75.7	80.7	85.5	94.0	105.8	125.8
	36	29.0	213729	121.4	87.0	97.9	97.0	102.7	112.9	127.0	151.1

Figura 3.7 Características eléctricas del pararrayos Heavy Duty PDV-100Optima Fuente: ^[24]

3.6.1. Tención continúa de operación (COV).

El COV o Uc es el valor máximo de la tensión (RMS), a frecuencia industrial que se puede aplicar de forma continua en los terminales de un pararrayos, y se estima mediante la ecuación 3.11. ^{[24] [25]}

$$COV = \frac{Vmax}{\sqrt{3}} \tag{3.11}$$

Donde.

Heavy Duty

- COV ó Uc = Máxima tensión de servicio continuo del pararrayos en kV.
- Umax= tensión entre fases de la red más el factor de regulación del 5%.

La normativa IEC 60071-1 el voltaje estandarizado es de 24 kV.

$$COV = \frac{24kV}{\sqrt{3}} = 13.856 \, kV$$

3.6.2. Sobretensión temporal (TOV)

Los pararrayos funcionan por un limitado periodo de tiempo por encima de su COV, la sobretensión que tolera el pararrayos depende del tiempo de falla, para asegurar el correcto funcionamiento se analizará la magnitud y duración de la sobretensión.^{[24] [26]}

$$TOV = Ke \cdot COV \tag{3.12}$$

Donde.

 Ke: Factor de falla a tierra, que para el caso es de 1,4 por ser un sistema sólidamente puesto a tierra.

$$TOV = 1.4 \cdot 13.856 \, Kv = 19.39 \, kV$$

3.6.3. Tensión Nominal Del Pararrayos

La tensión nominal del pararrayos R, es el valor mayor entre Ro y Re (sobredimensionamiento máximo y minimo).

$$Ro = \frac{COV}{Ko}$$
(3.13)

Donde.

- Ko: Factor de diseño del pararrayos. Para PDV-100 Heavy Duty Ko = 0,8

$$Ro = \frac{13.856 \ kV}{0.8} = 17.320 \ kV$$

Ko: Es la capacidad del pararrayos y depende del tiempo de duración de la sobretensión temporal. Se elige Ko = 0.8 para un tiempo de despeje de falla de 1 segundo.

$$Re = \frac{TOV}{Kt}$$
(3.14)
$$Re = \frac{19.398 \, KV}{1.15} = 16.868 \, kV$$

Dado que Ro>Re, la tensión nominal del pararrayos es Ro multiplicada por un factor de seguridad del 5%.^{[24] [26]}

$R = 17.320 \ KV \cdot 1.05$	5 = 18.18 kV
------------------------------	---------------

Máxima tensión residual con corrientes de descarga					
10 kA 8/20us	56,4	kV			
1,5 kA 8/20us	25,4	kV			
(COV)	15,3	kV			

Tabla 3.11 Máxima tensión residual con corrientes de descarga pararrayos 18 kV Heavy Duty PDV-100 Optima

Características De Los Pararrayos		
Nivel de protección al impulso de maniobra-NPM (Ups)	25,4	kV

 Tabla 3.12 Nivel de protección al impulso de maniobra e impulso atmosférico de pararrayos 18 KV Heavy

 Duty PDV-100 Optima

Fuente: Los Autores

3.6.4. Pararrayos en la entrada de la línea energización desde el extremo remoto

Con el fin de limitar sobretensiones por energización se instalan pararrayos en la entrada de la línea con las siguientes características de protección: ^[24] [25]

- El NPM (U_{ps} , Nivel de protección al impulso tipo maniobra) es igual a la máxima tensión residual para impulsos de corrientes de maniobra, 1kA.
- El NPR (U_{pt}t, Nivel de protección para el impulso tipo rayo) es la tensión máxima residual para un impulso atmosférico a la corriente nominal de descarga, 10 kA.

Las sobretensiones de frente lento representativas son:

$$[Fase - tierra] (Urp = NPM)$$
(3.15)

$$[Fase - Fase] (Urp = 2xNPM)$$
(3.16)

$$[Fase - Fase] (Upt) \tag{3.17}$$

[Fase - tierra] (Urp = NPM) = 25.4 kV

$$[Fase - Fase] (Urp = 2xNPM) = 50.8 kV$$

 $Fase - Fase (Upt) = 62.608 \, kV$

Tensiones Representativas de Frente Lento						
Fase-Tierra (Urp=NPM)	25,4	kV	Para cualquier equipo			
Fase - Fase (Urp=2xNPM)	50,8	kV	Para el equipo en entrada de línea			
Fase - Fase (Upt)	62,60895783	kV	Para cualquier equipo, salvo en entrada de línea			

Tabla 3.13 Tensiones Representativas de Frente Lento

Fuente: Los Autores

3.7. Determinación de tensiones de soportabilidad para coordinación (U_{cw})

La IEC 60071-2 determina que la tensión soportada de coordinación es igual a la sobretensión representativa temporal, donde el factor de coordinación es igual a la unidad.^[19]

$$\begin{bmatrix} Fase - tierra \end{bmatrix} U_{cw} = k_c \cdot U_{rp}$$
(3.18)
$$\begin{bmatrix} Fase - Fase \end{bmatrix} U_{cw} = k_c \cdot U_{rp}$$
(3.19)

Donde

- k_c : factor de coordinación
- U_{rp} : Amplitud de la sobretensión representativa [Fase tierra]; [Fase Fase]

 $[Fase - tierra] Ucw = 19.398 \, kV$

$$[Fase - Fase] Ucw = 33.6 kV$$



Fase a Tierra, en V: Ucw = Kc x Urp =	19,39896904
Fase a fase, en V: Ucw = Kc x Urp =	33,6
21401	1

 Tabla 3.14 Sobretensiones temporales "con factor de coordinación Kc=1"

 Fuente: Los Autores

3.7.1.1. Tensión soportada de coordinación para sobretensiones de frente lento

El método determinístico consiste en estimar la tensión máxima y la resistencia dieléctrica mínima con un margen de incertidumbre, la tensión de coordinación se obtiene multiplicando el valor máximo por el factor de coordinación determinista k_{cd} ; Para equipos no protegidos por pararrayos la sobretensión máxima es igual al valor de truncamiento ($U_{et} \circ U_{pt}$) y el factor de coordinación determinista es $k_{cd} = 1$.^{[4] [15]}



Factor de Coordinación determinístico para equipo de entrada (aislamiento externo)

Figura 3.8 Factor de coordinación determinístico para aislamiento externo Fuente: ^[19]

Donde:

- a) Factor de coordinación aplicado al nivel de protección contra sobretensiones para obtener la tensión de resistencia de coordinación fase a tierra (se aplica también al aislamiento longitudinal).^[19]
- b) Factor de coordinación aplicado al doble del nivel de protección contra sobretensiones para obtener la tensión soportada de coordinación fase a fase. ^[19]
 - Fase a tierra:

$$\frac{Ups}{Ue2 \cdot Vbase} \gg Kcd [Fase - tierra]$$
(3.20)
$$\frac{25.4 \text{ kV}}{19.59 \text{ kV} \cdot 2.9 \text{ p. u.}} \approx Kcd$$

• Tensiones de coordinación

$$Ucw = Kcd \cdot Urp [Fase - tierra]$$
(3.21)

$$Ucw = 1.075 \cdot 25.4 \ kV$$

• Fase a fase:

$$\frac{Ups}{Ue2*Vbase} \gg Kcd [Fase - Fase]$$

$$\frac{25.4 kV}{19.59kV \cdot 4.64 p.u.} \approx Kcd$$
(3.22)

• Tensiones de coordinación Ucw = Kcd x Urp

$$Ucw = Kcd \cdot Urp [Fase - Fase]$$
(3.23)
$$Ucw = 1 \cdot 50.8 \ kV$$

Sobretensiones frontales lentas				
Equipo de entrada de línea (aislamiento externo solamente)				
Fase a l	tierra	fase a fase		
Ups/Ue2=	0,4469	2Ups/Up2=	0,558701	
Kcd =	1,1	Kcd =	1.075	
Ucw = Kcd x Urp		Ucw = K	lcd x Urp	
Ucw =	27.94	Ucw =	54.61	

Tabla 3.15 Sobretensiones frontales lentas para equipos de entrada de línea (aislamiento externo)

Fuente: Los Autores

Factor de Coordinación Para todos los equipos:



Figura 3.9 Factor de coordinación determinístico para otros equipos Fuente: ^[19]

• Fase a tierra:

$$\frac{25.4 \, kV}{19.59 \, kV \cdot 1.9 \, p. u.}$$
 » Kcd

• Tensiones de coordinación

$$Ucw = 1 \cdot 25.4 \, kV$$

• Fase a fase:

$$\frac{25.4 \, kV}{19.59 \, kV \cdot 2.9 \, p. u.}$$
 » Kcd

• Tensiones de coordinación

 $Ucw = 1 \cdot 62.608 \, kV$

Sobretensiones frontales lentas

Otro Equipamiento				
fase	a tierra	fase a	fase	
Ups/Ue2=	0.6822	2Ups/Ups=	0.8939	
Kcd=	1.1	Kcd =	1.025	
Ucw =	Kcd x Urp	Ucw = Kcd x Urp		
Ucw =	27.94	Ucw =	62,60895783	

Tabla 3.16 Sobretensiones frontales lentas para equipos



3.7.1.2. Análisis normativa IEEE 1410 (Guía para mejorar el rendimiento del rayo de las líneas aéreas de distribución de energía eléctrica)

3.7.1.2.1. Nivel Isoceraunico

Es el número promedio de días de tormenta al año, considerando como día de tormenta en el cual se percibe por lo menos un trueno, para determinar el nivel ceráunico del área de concesión de la empresa eléctrica regional CentroSur se ubica la zona dentro del mapa que se muestra en la figura 3.10, determinando un valor de 20 días de tormenta al año.^[26]



Figura 3.10 Mapa Isoceraunico del Ecuador Fuente: ^[15]

3.7.1.2.2. Densidad de descargas a tierra

Es número de descargas a tierra que se espera por Km^2

$$Ng = 0.04Td^{1.25} \tag{3.24}$$

Donde:

Td = Dias de tormenta al año

Ng = 1.691 [descargas por año por Km²]

3.7.1.2.3. Rango de colección de rayos.

Esta expresado por la ecuación 3.25 definiendo el total de descargas atmosféricas cada 100 km por año (descargas/100km/año), y está en función de la densidad de descarga Ng.^[26]

$$N = Ng\left(\frac{28h^{0.6}+b}{10}\right) \tag{3.25}$$

Donde.

- N: Rango de colección de rayos (rayo/100Km/año)
- h: altura del poste (m)
- b: ancho de la estructura
- Ng: densidad de descargas (rayo/100Km/año)

Dimensiones de la estructura			
Altura del poste- entierro	10,2		
Longitud de la cruceta	4,2		
Datos del Sistema de distribución (SD)			
Días de tormenta por año	20		
Densidad de descargas a tierra	1,69179402		

Tabla 3.17 Datos característicos del sistema de distribución (SD)

Fuente: Los Autores

$$N = 1.6917 \left(\frac{28 \cdot (10.20)^{0.6} + 4.20}{10}\right)$$
$$N = 19.79 \left[rayo/100 Km/año\right]$$

3.7.1.2.4. Factor de protección (árboles y estructuras cercanas)

La norma IEEE 1410 determina un factor de protección Sf equivalente a 0.5 para redes de distribución.^[26]

$$Ns = N(Sf) \tag{3.26}$$

Donde

- N: Rango de colección de rayos
- Sf: factor de protección

Ns = 19.79(0.5)

$$Ns = 9.8971[descargas/100Km/año]$$

Al considerar un factor de protección Sf =0 es decir a campo abierto, se puede determinar mediante:

 $Flameos inducidos (campo abierto) = Ng \cdot 2[rayos/100 km/año]$ (3.27)

Flameos inducidos (campo abierto)	3,38358804	rayos/100Km/año
Flameos inducidos	6,76717609	(Rayos/100Km/año)
Table 2 10 Decelte des sentided de fle		$(100 V_{10} / 100 V_{10} / 100 V_{10})$

 Tabla 3.18 Resultados cantidad de flameos inducidos (rayos/100Km/año)

 Fuente: Los Autores

Las descargas atmosféricas provocan fallas sobre el sistema de Distribución (SD), mismas que se estiman mediante el número de fallas cada 100 km al año.^[26]

Fallas totales = #descargas directas + Flameos inducidos [rayos/100km/año](3.28)

Fallas totales = 9.8971 + 6.7671[*rayos*/100*km*/*a*ñ*o*]

Análisis de descargas IEEE 1410				
Nivel Ceráunico	20	Días de tormenta por año		
Densidad de descargas a tierra(Ng):	1,69179402	(Relámpagos/Km2/año)		
Rango de colección de Rayos:	19,7943871	(Rayos/100Km/año)		
Factor de protección:	0,5	adimensional		
Numero de descargas directas(Ns):	9,89719353	descargas/100Km/año		
Flameos inducidos a campo abierto:	3,38358804	rayos/100Km/año		
Flameos inducidos:	6,76717609	(Rayos/100Km/año)		
Fallas Totales:	16,6643696	(fallas/100Km/año)		

Fallas totales = 16.6643[rayos/100km/año]

Tabla 3.19 Análisis de descargas atmosféricas IEEE 1410Fuente: Los Autores

3.7.1.3. Tensión soportada de coordinación para sobretensiones de frente rápido

La metodología estadística simplificada de la norma IEC 60071-2 permite calcular la tensión mínima de soportabilidad de los equipos mediante la siguiente ecuación: ^[19]

$$Ucw = Upl + \frac{A}{n} \frac{L}{Lsp + La} = \pi r^2$$
(3.29)

Donde:

- A: factor de comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada al equipo de transformación Tabla 3.20
- n: el número mínimo de líneas conectadas al equipo de transformación (n=1 o n=2).
- Lsp: longitud del vano [m]
- Ltla: porción de la línea aérea que tiene una tasa de defectos igual a la tasa de retorno establecida.

Tipo de línea	A (kV)
Líneas de distribución (cebados entre fases)	
Con las crucetas puestas a tierra (cebado a tierra con una tensión pequeña)	900
Líneas con apoyos de madera (cebado a tierra con una tensión alta)	2700
Líneas de transporte (cebados fase tierra)	

Un solo conductor	4500
Haz doble	7000
Haz cuádruple	11000
Haz de seis u ocho conductores	17000

 Tabla 3.20 factores de comportamiento frente al rayo de la línea aérea conectada al equipo de transformación

 Fuente: Los Autores

Método estadístico simplificado utilizado						
Parámetro - A -	900	kV				
Longitud de espacio Lsp :	0.3	km				
Tasa de interrupción:	0,01666437	km.año				
Tasa de fracaso aceptable:	0,000333	años				
Nivel de protección contra descargas atmosféricas : Upl =	56,4	kV				
Max. Separación del aislamiento interno: L =	0.0115	Km				
Max. Separación del aislamiento externo: L =	0,007	Km				
La =	0.03	Km				

 Tabla 3.21 Datos iniciales para determinar sobretensiones de frente rápido

 Fuente: Los Autores

ruente:	LOS	Autores	

Aislamiento interno: Ucw =	56,50636364	kV			
Aislamiento externo: Ucw =	76.0875	kV			
Tabla 3.22 Resultados sobretensiones de frente rápido					

Fuente: Los Autores

3.8. Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw}) 3.10.1. Factor de seguridad (**Ks**)

Dicho factor compensa el envejecimiento de materiales, equipos, montaje de los mismos, calidad del producto, calidad de la instalación, entre otros. Si los proveedores de los equipos no especifican, la normativa IEC 60071-2 propone: ^[19]

- Para aislamiento interno Ks = 1,15.
- Para aislamiento externo Ks = 1,05.

3.10.2. Factor de corrección atmosférico

Para la determinación del factor de corrección atmosférico se considera, la presión atmosférica correspondiente a la altitud del lugar. La determinación del factor de corrección de altitud Ka se determina mediante la ecuación 3.30. ^{[13] [19]}

$$Ka = e^{m\left(\frac{H-1000}{8150}\right)} \tag{3.30}$$

Donde:

- *H*: es la altitud sobre el nivel del mar [m].
- m: es igual a 1.0 para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo rayo

- m: es igual a 0.5 para tensiones soportadas a frecuencia industrial de corta duración.
- *m*: es igual a 0.94 en base a la figura 3.11 para las tensiones soportadas de coordinación a impulsos tipo maniobra.



Figura 3.11 Curva del factor de coordinación m en función de tensión soportada al impulso de conmutación Fuente: ^[19]

Donde:

- a) aislamiento fase tierra
- b) aislamiento longitudinal
- c) aislamiento entre fases
- d) intervalo en el aire punta plano

Factor de corrección atmosférica					
Resistencia a la poten	frecuencia de ncia	Resistencia conm	a impulsos de utación	Resistencia	a los rayos
fase a tierra y	v fase a fase	fase a tierra para una U _{cw}		fase a fase y	fase a tierra
m =	0,5	m=	0,94	m =	1
Ka =	1,175816959	Ka =	1,355934382	Ka =	1,382545521
		fase a fase	para un U _{cw}		
		m =	1		

1,382545521 Tabla 3.23 Factores de corrección atmosférica para sobre tensión a frecuencia industrial, impulso tipo rayo, impulso de conmutación

Fuente: Los Autores

Ka =

3.10.3. Tensiones de soportabilidad requeridas

- Sobretensiones temporales a frecuencia industrial ٠
- Aislamiento externo _

$$\mathbf{U}_{\mathbf{rw}} = \mathbf{U}_{\mathbf{cw}} \cdot \mathbf{k}_{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{k}_{\mathbf{a}} \tag{3.31}$$

Donde

- k_a : Factor de corrección atmosférica.
- k_s : Factor de seguridad (factor que compensa el envejecimiento de materiales, equipos).
- U_{cw}: Tensión soportada de coordinación para sobretensiones temporales Fase-Fase, Fase-Tierra.
- Aislamiento Interno

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \tag{3.32}$$

Donde

- $-k_s$: Factor de seguridad (factor que compensa el envejecimiento de materiales.
- Ucw: Tensión soportada de coordinación para sobretensiones temporales Fase-Fase, Fase-Tierra

Sobretensiones de frente lento

Aislamiento externo

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \cdot k_a \tag{3.33}$$

Aislamiento Interno

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \tag{3.34}$$

Sobretensiones de frente rápido

Aislamiento externo

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \cdot k_a \tag{3.35}$$

Aislamiento Interno

$$U_{rw} = U_{cw} \cdot k_s \tag{3.36}$$

Resistencia temporal a sobretensiones		Resistencia a impulsos de conmutación	Resistencia a los rayos	
fase a tierra		fase a tierra		fase a tierra
Aislamiento interno		Equipo de entrada de línea	Aislamiento interno	
Urw	22,3088144	Aislamiento externo	Urw 1.020.553	

Aisla	amiento externo	Urw 397.790		Ais	alamiento externo
Urw	23,95011863	0	Otro equipos		1.104.541
	fase a fase	Aisla	miento interno		fase a fase
Aisla	amiento Interno	Urw	32.131	Ais	slamiento interno
Urw	38,64	Urw	32.131	Urw	1.020.553
Aisla	amiento externo	Aisla	miento externo	Ais	alamiento externo
Urw	41,48282231	Urw	39,779	Urw	1.104.541
		Urw	397.790		
		Equipo	Equipo de entrada de línea		
		Aisla	miento externo		
		Urw	792.758		
		0	Otro equipos		
		Aisla	miento Interno		
		Urw	628.015		
		Urw	738.003		
		Aislamiento Externo		1	
		Urw	792.758		
		Urw	931.599		

Tabla 3.24 Resultados de tensiones de soportabilidad requeridas

Fuente: Los Autores

3.9. Selección de los niveles de aislamiento normalizados (U_w)

Conversión de las tensiones soportadas especificas tipo maniobra a tensiones soportadas a frecuencia industrial y a tensiones soportadas a impulso tipo rayo. ^{[19] [25]}

En las tensiones de gama I, la tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial o la tensión soportada a impulsos tipo rayo deben cubrir las tensiones soportadas especificadas a impulso tipo maniobra entre fase y tierra y entre fases. ^[19]

3.11.1. Tensión soportada a frecuencia industrial de corta duración

Aislamiento externo

Fase-Tierra

$$SDW = 0.6 + \frac{U_{rw}}{8500} \tag{3.37}$$

Fase-Fase

$$SDW = 0.6 + \frac{U_{rw}}{12700} \tag{3.38}$$

3.11.2. Tensión soportada a impulso tipo rayoAislamiento externo

Fase-Tierra

$$LIW = 1.05 + \frac{U_{rw}}{6000}$$
(3.39)

Fase-Fase

$$LIW = 1.05 + \frac{U_{rw}}{9000} \tag{3.40}$$

- Aislamiento interno.

Fase-Tierra

$$SDW = U_{rw} \cdot 0.5 \tag{3.41}$$

Fase-Fase

$$SDW = U_{rw} \cdot 0.5 \tag{3.42}$$

Las tensiones normalizadas deben ser elegidas en función de los valores más elevados mismos que se comparan en las tablas 3.25 y 3.26.

En kV r.m.s para frecuencia		Aislamiento externo					
de potencia de con En nico do	rta duración	Equipo de entrada de					
En pico de	KV para		iea	Otro e	equipo	Aisiamien	to interno
conmutación o	impulso de						
rayo		U _{rw} (s)	<i>U_{rw}</i> (c)	U _{rw} (s)	<i>U_{rw}</i> (c)	U _{rw} (s)	<i>U_{rw}</i> (c)
frecuencia de	fase a tierra	23,95011863	24,05358966	23,95011863	24,05358966	22,3088144	16,0655
potencia de corta duración	fase a fase	41,48282231	48,06036603	41,48282231	56,57931605	38,64	36,90015452
T 1 1	fase a tierra	39,77904697		39,77904697		32,131	
conmutación	fase a fase	79,27585144		93,15991394		73,80030904	
Immulae de	fase a tierra	110,4541539	51,71276106	110,4541539	51,71276106	102,0553125	35,3441
conmutación	fase a fase	110,4541539	83,93793964	110,4541539	98,78221737	102,0553125	81,18033994

Tabla 3.25 Resumen de tensiones mínimas requeridas

Fuente: Los Autores

<i>En kV r.m.s para frecuencia de potencia de corta duración</i>		Equipo de lín	Aislamiento externo de entrada de línea Otro equipo		Aislamiento interno		
En pico de kV para conmutación o imp	ulso de r avo	II (s)	II (c)	II (s)	II (c)	II (s)	II (c)
commutación o mip	uiso uc rayo	$O_{rW}(s)$	$O_{rW}(c)$	O_{rW} (3)	$O_{rW}(c)$	$O_{rW}(s)$	$O_{rW}(c)$
frecuencia de	fase a tierra	23,95011863	24,05358966	23,95011863	24,05358966	22,3088144	16,0655
potencia de corta duración	fase a fase	41,48282231	48,06036603	41,48282231	48,06036603	38,64	31,40075
Term las la	fase a tierra	39,77904697		39,77904697		32,131	
Impulso de conmutación	fase a fase	79,27585144		79,27585144		62,8015	
Impulso de rayo	fase a tierra	110,4541539	51,71276106	110,4541539	51,71276106	102,0553125	35,3441

	fase a fase	110,4541539	83,93793964	110,4541539	83,93793964	102,0553125	69,08165
	77 1 1	2 0 (D	1	1	• 1		

 Tabla 3.26 Resumen de tensiones de resistencia requeridas

 Fuente: Los Autores

En la tabla 3.27 se indica los resultados obtenidos aplicando la normativa IEC 60071 mediante los cuales se validará la resistencia de aislamiento de los postes de poliéster reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V.) fabricados por la empresa Equisplast.

Sobretensión	Aislamiento externo	Aislamiento interno
Frecuencia Industrial	48,06036603	38,64
Impulso de conmutación	79,27585144	62,8015
Impulso tipo ravo	110,4541539	102,0553125

Tabla 3.27 Resultados coordinación de aislamiento aplicando la normativa IEC 60071 Fuente: Los Autores

CAPÍTULO 4

4. Determinación de Descargas Parciales y Rigidez Dieléctrica

4.1. Descargas Parciales

Las DP deterioran progresivamente el medio aislante, dicho daño es proporcional a la intensidad del campo eléctrico al cual está sometido, produciendo una falla total, parcial en un equipo o sistema. Para la detección de descargas parciales sobre muestras de postes PRFV se toma la normativa IEC 60270, empleando el método convencional directo mencionado en capítulo 2.5.3 e implementado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana. La señal de corriente y voltaje se obtuvieron mediante una –DAQ- Data Acquisition y por medio del software MATLAB se cuantifica los valores del mismo.

4.1.1.Implementación del Circuito de Medición Directa para detección de DP

El circuito está conformado por Vi que es la fuente de alta tensión, Z la impedancia que impide el paso de perturbaciones hacia la fuente de alta tensión, Ck el capacitor de acoplamiento, Ca el aislante en prueba, la impedancia Zm obtiene una medición directamente, proporcional a la corriente de fuga sobre la muestra de poliéster reforzados con fibra de vidrio (PRFV). Mediante DAQ y osciloscopio se podrá adquirir y procesar señales de voltaje y corriente. La figura 4.1 muestra el esquema implementado.



Figura 4.1 Circuito de medición directa para detección de DP Fuente: Los Autores

En la tabla 4.1, se específica las características de los elementos utilizados en el circuito de medición directa para detección de DP.

Elemento	Marca	Características	
Vi: fuente de alta tensión	Terco	100kv, 5kva	
Z: impedancia	Terco	1mω, 100kv	
Ck: capacitor de acoplamiento.	Terco	100pf, 100kv	
Zm: impedancia de medida.	Sec	1000ω	
Ca: material aislante (PRFV).	Equisplast	4cm x 4cm x0.7cm	
Osciloscopio	Tektronix	Bw de 350mhz y 5 gs/s.	



Figura 4.2 Data Acquisition DAQ National Instruments Fuente: National Instruments

En la figura 4.3 se muestra esquema de programación desarrollado en el software LabVIEW para la adquisición y visualización de datos.



Figura 4.3 Esquema labVIEW para adquisición de datos de Corriente y Voltaje Fuente: Los Autores

4.1.2. Procedimiento de la detección de Descargas Parciales

Para determinar las descargas parciales producidas en materiales aislantes sólidos, se aplica el principio del método eléctrico descrito en la norma IEC 60270. Mediante el software MATLAB, se realiza el procesamiento de datos de las señales de voltaje y corriente. En la figura 4.4 se muestra el circuito implementado para la medición directa y detección de DP el cual consta de un transformador de potencial, una resistencia de carga de 10 M Ω , un condensador de medida de 100pF,un espinterómetro para medición, resistencia de 1000 Ω .



Figura 4.4 Circuito implementado para medición y detección de DP Fuente: Terco

En la tabla 4.2 indica los niveles de tensión y tiempo de duración del ensayo a los que fueron sometidas las diferentes muestras de los postes de PRVF

Nivel de tensión (kV)	Duración (min)
5	30
10	30
15	30
20	30
25	30
30	30
35	30
40	30
45	30
50	30
55	30
60	30
65	30
70	30
75	30

Tabla 4.2 Niveles de tensión y tiempo de duración del ensayo.Fuente: Los Autores

Muestras sometidas a 5 kV rms

Para la medición y detección de DP se realizó un total de 10 pruebas, sometido a un nivel de tensión de 5 kVrms. En la figura 4.5 la señal de color azul representa el voltaje aplicado entre los electrodos mientras que la señal de color anaranjado representa la corriente de fuga sobre la muestra de PRFV, con una amplitud de 13.6 µA como se muestra en la tabla 4.3

Número de prueba DP a 5 kV rmsTensión Vrms CH1 (kV)Tensión Vrms CH2 (V)Corriente (A)Corriente (µA)Tensión (m.	Número de prueba DP a 5 kV rms	Tensión Vrms CH1 (kV)	Tensión Vrms CH2 (V)	Corriente (A)	Corriente (µA)	Tiempo (min)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------	-------------------------	---------------	----------------	-----------------

1	5,36	0,0136	0,0000136	13,6	30
2	5,38	0,0145	0,0000145	14,5	30
3	5,9	0,0155	0,0000155	15,5	30
4	5,88	0,0164	0,0000164	16,4	30
5	4,81	0,0173	0,0000173	17,3	30
6	5,17	0,0177	0,0000177	17,7	30
7	6,18	0,0169	0,0000169	16,9	30
8	5,92	0,016	0,000016	16	30
9	5,92	0,0162	0,0000162	16,2	30
10	5,9	0,0155	0,0000155	15,5	30

Tabla 4.3 Valores obtenidos sobre 10 muestras de PRFV a 5 kV rms en ensayo de DP.**Fuente:** Los Autores



Figura 4.5 Señal de tensión y corriente adquiridos por DAQ a una tensión de 5kV rms en ensayó de DP Fuente: Los Autores

En la figura 4.6 se muestra una señal de color azul, que representa la corriente de fuga sobre la muestra, presentando una magnitud considerable de ruido; para distinguir las DP se emplea un filtro digital de cuarto grado realizado en MATLAB, el algoritmo genera una onda y realiza la diferencia con la señal obtenida mediante la DAQ permitiendo apreciar las DP, al aumentar el grado del filtro mejora visual mente la señal pero puede perder información.



Figura 4.6 Señal de corriente sin filtrar (azul) y filtrada (roja) correspondiente a una tensión de 5kV rms en ensayo de DP Fuente: Los Autores

En la figura 4.7 se notan 3 señales, para determinar la presencia de DP se realiza una diferencia entre la señal filtrada (color rojo) y la señal creada (color azul), obteniendo como resultado la señal de DP (color negro), llegando a la conclusión que a este nivel de tensión las corrientes de fuga son mínimas, contienen un alto nivel de ruido y no se producen descargas parciales.



Figura 4.7 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 5kV rms en ensayo de DP Fuente: Los Autores

Muestras sometidas a 10 kV rms

En la tabla 4.4 se muestra los resultados obtenidos de muestras sometidas a 10kV presentando corrientes desde los 23.9 µA hasta los 82.9µA resaltando que a este nivel de tensión no se presentan valores de corrientes relevantes. En el anexo 2 se indica las señales de DP de 10 ensayos.

Número de prueba DP a 10 kV rms	Tensión Vrms CH1 (kV)	Tensión Vrms CH2 (V)	Corriente (A)	Corriente (µA)	Tiempo (min)
1	10	0,0253	0,0000253	25,3	30
2	10	0,027	0,000027	27	30
3	10	0,0265	0,0000265	26,5	30
4	9,62	0,0277	0,0000277	27,7	30
5	10,3	0,0285	0,0000285	28,5	30
6	10,3	0,0239	0,0000239	23,9	30
7	10,7	0,0254	0,0000254	25,4	30
8	11	0,0829	0,0000829	82,9	30
9	11	0,0318	0,0000318	31,8	30
10	10,3	0,0305	0,0000305	30,5	30

Tabla 4.4 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste (PRFV) a 10 kV rms en ensayo de DP Fuente: Los Autores

En la figura 4.8 se indica la magnitud de la corriente de fuga sobre la muestra de PRFV número 4, sometido a una tensión de 10kVrms



Fuente: Los Autores

En la figura 4.9 se resalta que en la muestra 4 de PRFV sometido a 10kVrms presenta una DP de tipo superficial entre el intervalo de 0.03s y 0.035s con un valor de corriente pico de 0.0015 A



Fuente: Los Autores

Muestras sometidas a tensiones desde 15 hasta 25 kV rms

En las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se indica los resultados obtenidos de corriente y voltaje de las muestras sometidas a 15, 20 y 25 kV rms respectivamente, presentando corrientes con magnitud desde los 93.5 µA hasta los 2.09 mA, se resalta que a estos niveles de tensión no se dan valores de corrientes relevantes, con mínima presencia de DP, En el anexo 3 al 5. Se muestra las señales de DP de los 30 ensayos con niveles de tensión mencionados

Número de prueba DP a 15 kV rms	Tensión Vrms CH1 (kV)	Tensión Vrms CH2 (V)	Corriente (A)	Corriente (µA)	Tiempo (min)
1	15	0,0935	0,0000935	93,5	30
2	15,1	0,117	0,000117	117,0	30
3	18,8	0,139	0,000139	139,0	30
4	16,1	0,105	0,000105	105,0	30
5	16,7	0,101	0,000101	101,0	30
6	14,9	0,101	0,000101	101,0	30
7	15,1	0,105	0,000105	105,0	30
8	15,1	0,101	0,000101	101,0	30
9	15	0,102	0,000102	102,0	30
10	15,9	0,103	0,000103	103,0	30

 Tabla 4.5 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 15kVrms en ensayo de DP

 Fuente: Los Autores

Número de prueba DP a 20 kV rms	Tensión Vrms CH1 (kV)	Tensión Vrms CH2 (V)	Corriente (A)	Corriente (µA)	Tiempo (min)
1	21,9	0,179	0,000179	179,0	30
2	22,4	0,208	0,000208	208,0	30
3	23	1,07	0,00107	1070,0	30
4	23	0,203	0,000203	203,0	30
5	20,8	0,174	0,000174	174,0	30
6	20,9	1,02	0,00102	1020,0	30
7	20,9	1,14	0,00114	1140,0	30
8	21	0,293	0,000293	293,0	30
9	20,9	0,23	0,00023	230,0	30
10	20,9	0,169	0,000169	169,0	30

Tabla 4.6 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 20kV rms en ensayo de DP

Fuente: Los Autores

Número de prueba DP a 25 kV rms	Tensión Vrms CH1 (kV)	Tensión Vrms CH2 (V)	Corriente (A)	Corriente (µA)	Tiempo (min)
1	24	1,05	0,00105	1050,0	30
2	24,3	0,194	0,000194	194,0	30
3	24,8	1,46	0,00146	1460,0	30
4	26,8	2,09	0,00209	2090,0	30
5	23,7	0,157	0,000157	157,0	30
6	24,7	0,472	0,000472	472,0	30
7	25,9	1,21	0,00121	1210,0	30
8	26,6	0,00109	0,00000109	1,1	30
9	24,4	0,206	0,000206	206,0	30
10	24,9	0,207	0,000207	207,0	30

 Tabla 4.7 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 25kV rms en ensayo de DP

 Fuente: Los Autores

Muestras sometidas a 30 kV rms

En la tabla 4.8 se muestra los resultados obtenidos a un nivel de tensión de 30 kV rms teniendo corrientes desde los 196 µA hasta los 1.3 mA, resaltando que a esta magnitud de tensión se presentan valores de corrientes relevantes además con notoria DP, de tal manera que al aumentar la tensión, se presentará un arco eléctrico entre los electrodos, estos valores no podrán ser cuantificados por los equipos de medición

Número de prueba	Tensión Vrms	Tensión Vrms	Corriente	Corriente (µA)	Tiempo
DP a 30 kV rms	CH1 (kV)	CH1 (V)	(A)	CH2	(min)
1	29,7	1,3	0,0013	1300	30
2	30,1	0,244	0,000244	244	30
3	31	1,34	0,00134	1340	30
4	29,8	0,196	0,000196	196	30
5	29,8	1,2	0,0012	1200	30
6	30	0,323	0,000323	323	30
7	31,5	0,244	0,000244	244	30
8	29,7	0,244	0,000244	244	30
9	31	0,244	0,000244	244	30
10	30,1	0,244	0,000244	244	30

 Tabla 4.8 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste PRFV a 30 kV rms en ensayo de DP

 Fuente: Los Autores

En la figura 4.10 se muestra la corriente de fuga sobre la muestra número dos a un nivel de tensión de 30kV rms



Figura 4.10 Señal de corriente sin filtrar y filtrada correspondiente a una tensión de 30 kV rms en ensayo de DP Fuente: Los Autores

En la figura 4.11 se resalta que en el segundo ensayo a 30kV rms, las DP se presentan de forma continua, la corriente de mayor amplitud se presentó entre el intervalo de 0.01 y 0.015 s con un valor de corriente pico mayor a 1.3 A.


ensayo de DP

Fuente: Los Autores

Muestras sometidas a más 35 kV rms

En la tabla 4.9 se muestra los resultados obtenidos con una tensión de 35 kV rms notando corrientes con magnitud desde 1.4 mA hasta los 2.1mA, resaltando que a este nivel de tensión se presentan valores de corrientes relevantes, una notoria presencia de DP, con arco eléctrico en intervalos cortos de tiempo, al aumentar el nivel de tensión, el arco será constante. En el anexo 6 se indica las señales de DP de los 10 ensayos con valores de tensión mayores 34.5 kV rms.

Número de prueba	Tensión Vrms	Tensión Vrms	Corriente	Corriente (µA)	Tiempo
DF a 55 KV HIIS	CHI(KV)	CHI(V)	(A) CH2		(1111)
1	37,9	1,7	0,0017	1,7	30
2	34,5	1,4	0,0014	1,4	30
3	35,6	1,5	0,0015	1,5	30
4	37	1,65	0,00165	1,65	30
5	38,9	1,7	0,0017	1,7	30
6	36,5	1,6	0,0016	1,6	30
7	35,8	1,67	0,00167	1,67	30
8	39	2,1	0,0021	2,1	30
9	38,5	1,8	0,0018	1,8	30
10	36,3	1,6	0,0016	1,6	30

Tabla 4.9 Valores obtenidos sobre 10 muestras poste (PRFV) a 35 kV rmsFuente: Los Autores

En la figura 4.12 se muestra la corriente de fuga sobre la muestra número 5 a un nivel de tensión de 35kV.



Figura 4.12 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 35kV rms en ensayo de DP

Fuente: Los Autores

En la figura 4.13 se resalta que en la muestra 5 de PRFV sometido a 35kVvrms, las DP se presentan durante todo el periodo de medición, la corriente de mayor amplitud se presentó entre el intervalo de 0 a 0.01s y entre 0.03 a 0.04s con un valor de corriente pico mayor a 3A



Figura 4.13 Señal filtrada (azul), señal creada (rojo), señal de DP (negro) a una tensión de 35kV Fuente: Los Autores

No se procedió a realizar mediciones con pruebas que superen los 35 kV rms, ya que los equipos de medición no soportan picos de corriente elevados.

4.1.3. Degradación del aislamiento

De forma paralela, mientras se realizaban las pruebas para la detección de DP, se realizó las mediciones de aislamiento para análisis de la degradación; las muestras se sometieron a

niveles de tensión entre 5 kV y 50 kV durante el periodo de prueba, finalizada la prueba mediante el equipo Fluke 1550C/1555 se realizó el ensayo de resistencia de aislamiento sobre la muestra de PRFV.



Figura 4.14 Fluke 1550C/1555 Insulation Tester Fuente: Fluke

La tensión de prueba seleccionada en el equipo Fluke 1550C/1555 fue de 10 kV DC con una duración de 2 min por muestra a cada nivel de tensión realizando una medición inicial y sometiendo a tensiones entre 5kV a 50 kV este último siendo la tensión promedio de ruptura, en la tabla 4.10 se muestra los valores promedios de los ensayos muestras obteniendo un medición inicial de 312.1 [G Ω] de resistencia de aislamiento, y un valor final de resistencia igual 1.39 [G Ω] después haber estado sometido a una tensión de 50kV durante 30 minutos.

Degradación de Aislamiento			
Tensión [kV]	Resistencia de Aislamiento Promedio [GΩ]		
0	312,1		
5	266		
10	235,8		
15	186,5		
20	137,1		
25	113,41		
30	95,38		
35	70,3		
40	45,26		
45	32,02		
50	1,3922		

Tabla 4.10 Valores de resistencia de aislamiento en muestras de poste (PRFV) de 0 a 50 kV rmsFuente: Los Autores

Con los datos obtenidos de la tabla 4.10, se procedió a realizar la respectiva curva de degradación del aislamiento, observando la pérdida del aislamiento a medida que aumenta el nivel de tensión.



Figura 4.15 Curva de degradación de aislamiento en muestras de poste PRFV Fuente: Los Autores

4.2. Pruebas de Rigidez Dieléctrica

Para realizar los ensayos se determinó número muestras, mediante un análisis se definió la cantidad de postes fabricados en 1 mes, registrando un total de 600 [UND], conociendo este valor aplicamos la ecuación 4.1.

$$n = \frac{z \cdot N \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N-1) + z^2 \cdot p \cdot q}$$
(4.1)

Donde:

- z =coeficiente de nivel de confianza
 - En el cual z tiene un nivel de confianza del 90%
- N = número de la población
- p = probabilidad a favor
- q =probabilidad en contra
- e = error de muestreo
- n = tamaño de la muestra

$$n = \frac{9 \cdot 600 \cdot 80 \cdot 20}{5^2 \cdot (600 - 1) + 9^2 \cdot 80 \cdot 20}$$
$$n = 69.8 \ [UND]$$

El cálculo indica que se realizar un total de 70 ensayos, sobre muestras con dimensiones de 4 cm x 4 cmy 7mm de espesor, tal como se muestra en la figura 4.16



Figura 4.16 Muestras de Postes PRFV de la Empresa Equisplast Fuente: Los Autores

Para la ejecución de las pruebas se empleó electrodos en configuración punta - plano, dicha configuración de electrodos asemeja la condición más crítica para ensayos a cortas distancias.



Figura 4.17 Configuración de electrodos Fuente: Los Autores

Para la realización de los ensayos se ejecutó el método A de la normativa ASTM D-149, En esta prueba se dará un valor de voltaje en forma ascendente hasta que se produzca la ruptura total de cada muestra.



Figura 4.18 Incremento del nivel de tensión, según método A del ASTM

Fuente: Los Autores

Una vez realizadas las pruebas en 70 muestras, se creó la tabla 4.11 para determinando el nivel de voltaje al cual se produce la rotura total.

Número de	Distancia entre	Voltaje de Ruptura	Logró ruptura
muestras	Electrodos [mm]	[kV]	Si/No
1	7	59.7	Si
2	7	65.2	Si
3	7	49.4	Si
4	7	54.8	Si
5	7	50.7	Si
6	7	56.06	Si
7	7	50.7	Si
8	7	35	Si
9	7	45.3	Si
10	7	44.9	Si
11	7	54.8	Si
12	7	54.8	Si
13	7	50.2	Si
14	7	50.29	Si
15	7	49.8	Si
16	7	59.7	Si
17	7	54.7	Si
18	7	54.8	Si
19	7	58.8	Si
20	7	53	Si
21	7	56	Si
22	7	55.2	Si
23	7	51.1	Si
23	7	58	Si
25	7	57	Si
26	7	38	Si
27	7	40	Si
28	7	55	Si
20	7	42	Si
30	7	61	Si
31	7	70	Si
32	7	33	Si
33	7	35	Si
34	7	68	Si
35	7	56	Si
36	7	71	Si
30	7	52	C:
38	7	55	C:
30	7	53.0	<u> </u>
	7	53.9	
40	7	72	
41	/ 7	13	<u> </u>
42	/ 7	52 5	<u> </u>
43	/ 7	55.5	<u> </u>
44	/ 7	52	51
45	/ 7	30	51
46	/	/3	51
47	/	45	<u>S1</u>
48	7	57	<u>Sı</u>
49	.7	58.4	Si
50	7	64	Si
51	7	40.5	Si

52	7	57.5	Si
53	7	38	Si
54	7	45	Si
55	7	53.7	Si
56	7	55	Si
57	7	56.5	Si
58	7	47	Si
59	7	32	Si
60	7	76	Si
61	7	64	Si
62	7	51.11	Si
63	7	55.6	Si
64	7	56.4	Si
65	7	58.5	Si
66	7	57.3	Si
67	7	55	Si
68	7	60	Si
69	7	63	Si
70	7	59	Si

Tabla 4.11 Datos de Ensayo de voltaje de ruptura de 70 muestras Fuente: Los Autores

Realizados los ensayos se notó que a más de 45kV se produce la ruptura del material



Figura 4.19 Muestras de Postes PRFV después de las pruebas Fuente: Los Autores

Con los valores de voltaje de ruptura de las muestras procederemos a calcular la media aritmética y desviación estándar para poder formar la distribución gaussiana, la cual nos indicara como se distribuyen los valores obtenidos en las pruebas.

Media Aritmética:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}$$

$$x = 53.558$$
(4.2)

Desviación Estándar:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (X_i - x)^2}$$

$$s = 9.706$$
(4.3)



Figura 4.20 Distribución Gaussiana de los 70 datos obtenidos de las pruebas de tensión de ruptura Fuente: Los Autores

En la parte cóncava de la campana de Guaus se encuentra la mayor distribución de datos, siendo un valor muy cercano a la media aritmética, por otro lado los valores que están hacia la izquierda de la media son los resultados más bajos de la distribución, siendo muestras que soportaron un menor valor de tensión de ruptura, debido la uniformidad y construcción del poste.

Los valores que se encuentran de la media hacia la derecha soportaron un nivel mayor de tensión, en estas muestras se notó que no tenían imperfecciones en cuanto se refiere a fabricación pero fueron en menor cantidad. El valor de la media aritmética 53.55kV es el valor de tensión de ruptura promedio.

Para determinar el valor de la rigidez dieléctrica, se utiliza el valor de voltaje de ruptura [kV] y la distancia a las que se encontraron los electrodos [mm].

$$E_r = \frac{Vr}{d}$$

$$E_r = 7.65 \ kV/mm$$
(4.4)

En la tabla 4.12 se realizó una comparación entre los valores de rigidez dieléctrica de distintos fabricantes de postes de PRFV a nivel de Sudamérica, notando que producto de

, , , ,	Ĩ		
Empresa	Tipo de Prueba	Rigidez Dieléctrica [kV/mm]	País
Fibratore		≥ a 8	Colombia
Dis. Products		8	Colombia
Equisplast	ASIMD - 149	7.65	Ecuador

la empresa Equisplast es superior al valor establecido para polímeros descrito en la norma ASTM 149 y equiparándose a valores de prestigiosa empresas internacionales.

 Tabla 4.12 Cuadro comparativo de rigidez dieléctrica de diversos postes de fibra de vidrio

 Fuente: Los Autores

≥ a 2

Normativa ASTM149

Entel

CAPÍTULO 5

5. Sobretensión de flameo U50%

Una sobretensión a corta distancia puede ocasionar una disrupción, afectando el sistema, esta disrupción se conoce como tensión de flameo o tensión de 50%, que es la tensión en el cual hay 50% de probabilidad que ocurra falla, Esta tensión obedece a parámetros aleatorios, lo que hace necesario utilizar métodos estadísticos para determinarla, entre los métodos comunes se destaca la prueba de niveles múltiples, Up and Down y pruebas de descargas sucesivas, además del método estadístico descrito en el estándar IEEE std 4 de 2001. ^{[27] [28]}

Para la realización de los ensayos se emplea una onda de impulso tipo rayo $(1,2/50 \ \mu S)$ de polaridad positiva además de una configuración de electrodos punta-placa. La descarga disruptiva se debe a la falla del aislamiento de una configuración de electrodos sometida a un esfuerzo dieléctrico, en el cual la descarga atraviesa el aislamiento generando un flujo de corriente entre estos que tiende a ser muy alto dañando el asilamiento ^[28]

5.1. Impulso tipo rayo.

Es un impulso de tensión con tiempos de frente que varían desde un microsegundo hasta unas décimas de microsegundos. La forma típica de este tipo de impulso se representa en la figura 5.1.^[28]



Fuente: Terco

Uno de las características de la forma de onda de tensión de impulso tipo rayo es un tiempo T1 es de 1,2 µs de frente, y el tiempo para el valor medio o tiempo de cola T2 es de 50 µs.

Según las especificaciones dadas por la norma IEEE, se permite una tolerancia de +-30% para T1 y de +-20% para T2 es decir: ^{[28] [30]}

$$T_1 = 1.2 \pm 30\%$$

 $T_2 = 50 + 20\%$

Los voltajes de impulso se generan en cualquiera de los dos circuitos básicos que se muestran en la figura 5.2. Las relaciones entre los valores de los elementos del circuito y características que describen la curva dependiente del tiempo están dadas por las constantes de tiempo ^[27]



Figura 5.2 Circuitos de tensión de impulso tipo rayo. Fuente: Terco

Donde

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

5.1.1.Electrodos

Las tensiones de descarga disruptiva U50% en configuraciones reales dentro de un SEP con campos no uniformes se representa por electrodos punta-punta y punta-placa.

Este factor electrogeométrico Kg para la configuración punta-placa es igual a 1 mientras q para el resto de electrodos se puede estimar mediante la ecuación 5.1 ^{[28] [29]}

$$Kg = e^{\frac{0.5h}{h+d}} \tag{5.1}$$

Donde

- *h*: altura del electrodo aterrizado a tierra.
- *d*: distancia de separación interelectródica.

Para determinar la tensión de flameo de la configuración punta-punta se como muestra la ecuación 5.2

$$U_{50\%punta-punta} = Kg * U_{50\%punta-placa}$$
(5.2)

En la tabla 5.1 se indica el valor del factor electrogeométrico para su respectiva configuración de electrodos.

Configuración de Electrodos	Factor Electrogeométrico kg
Punta-Punta	1
Conductor -Placa	1,15
Conductor- Ventana	1,2
Punta -punta	$e^{\underline{0.5h}}{h+d}$
Conductor estructura	$1.1 + \frac{0.3}{1 + \frac{w}{d}}$

 Tabla 5.1 Factores electrogeometricos

 Fuente: Autores

5.2. Tensión de flameo

El estándar IEEE 4 y IEC 60071-2 define la Tensión Crítica de Flameo o tensión de flameo U50% como el voltaje de descarga disruptivo en el cual se presenta una probabilidad del 50% de producir una descarga a un aislamiento. A partir de este se determinan los niveles de aislamientos básicos BIL y BSL, tensión de flameo U50% es utilizada para determinar la tensión de descarga a cualquier probabilidad por medio de la ecuación 5.3^{[28][30]}

$$V = (1 + z\sigma_{p.u.})U_{50\%}$$
(5.3)

Donde

- V: Es la tensión en kV para cualquier probabilidad de descarga.
- $U_{50\%}$: Es la tensión de flameo en kV con 50% de probabilidad de descarga.
- z: Parámetro estadístico que varía según la probabilidad de descarga deseada
- $\sigma_{p.u}$: Desviación estándar en por unidad.

La desviación estándar $\sigma_{p.u.}$ según la normativa IEEE dictamina los valores de 3% para impulso tipo rayo BIL y 5% para impulsos tipo maniobra BSL^{[28] [30]}

$$\sigma_{p.u.} = \frac{\sigma}{U_{50\%}} \tag{5.4}$$

El nivel de aislamiento BIL y BSL en función de la tensión de flameo U50% se determina mediante la ecuación 5.5 y 5.6 respectivamente

$$BIL = 0.9616 * U_{50\%} \tag{5.5}$$

$$BSL = 0.936 * U_{50\%} \tag{5.6}$$

5.2.1. Método de ensayo niveles múltiples para determinar la tensión de flameo U50%

Este método se emplea en ensayos que se efectúan con ondas de impulso tipo rayo, permitiendo una estimación acertada de la tensión de flameo. Este método consiste en aplicar 15 impulsos de tensión a diferentes niveles, para realizar esta prueba es necesario definir un valor de tensión inicial (V_0) y el incremento de tensión (ΔV) del 3% de la tensión de chipa U50%, la precisión de los resultados en este ensayo aumenta con el número de muestras.^{[28] [30]}

5.2.2. Tensión U50%

Una manera de estimar la tensión de flameo U50% es por medio de configuraciones electródicas estandarizadas (punta- punta y punta-placa) a través de relaciones conocidas. La ecuación 5.7 determina la tensión de flameo al 50% de la configuración punta - plano^[25]

$$U_{50\%} = kg * 500 * d \tag{5.7}$$

Donde

- $U_{50\%}$: Tensión crítica de flameo por impulso de rayo (kV)
- kg: Factor de configuración electródica
- 500:Valor del campo eléctrico cuando se inicia el streamer (kV/m)
- d: Distancia crítica de flameo de fase a tierra (m) que debe garantizar estadísticamente una probabilidad de flameo.

$$U_{50\%} = 1 * 500 * 0.1$$

 $U_{50\%} = 50kV$

5.2.3. Tensión inicial.

Al no existir una base teórica, la tensión inicial debe ser estimada basado en experiencia previa mediante la configuración de electrodos. Se propone una expresión aproximada para establecer el valor inicial mediante la ecuación 5.8

$$V_0 = U_{50\%} - (1.5) * (0.03) * U_{50\%}$$
(5.8)

Donde

– $U_{50\%}$: Es la tensión de flameo esperada para la configuración electródica punta – plano

$$V_0 = 50kV - (1.5) * (0.03) * 50kV$$
$$V_0 = 51.49kV$$

5.2.4. Incremento de tensión (ΔV).

Del valor de incremento de tensión depende la valides de los resultados, la norma IEEE std 4 de 1995 recomienda que para impulsos atmosféricos este valor puede ser de 1,5% a 3% veces el valor de la tensión de chispa inicial estimada como muestra la ecuación 5.9^[19]

$$\Delta V = 3\% * U_{50\%}$$
 (5.9)
 $\Delta V = 3\% * 50kV$
 $\Delta V = 1.54kV$

5.2.5. Metodología de ensayo niveles múltiples.

Una vez determinado la tensión inicial (V_0) y el incremento de tensión (ΔV) se procede con los ensayos, se aplica el primer impulso de tensión con valor inicial V_0 verificando que a ese nivel no se produzca flameo incrementando el valore de ΔV , sucesivamente hasta completar el número de impulsos requeridos. El número de impulsos aplicados no debe ser menor a 15^{[19] [28]}



Figura 5.3 Procedimiento para ensayo niveles múltiples.

Fuente: Autores

5.2.6. Implementación del Circuito para la realización de pruebas de impulso tipo rayo

En la tabla 5.2 indica cada uno de los elementos empleados en el circuito para la realización de pruebas de impulso tipo rayo.

	Componente	Cantidad
1	Transformador de alto voltaje	1
2	Tablero de control	1
3	Condensador de suavizado	1
4	Condensador de carga	1
5	Rectificador de silicio	2
6	Resistor de medición	1
7	Resistencia de carga	1
8	Resistor de frente de onda	1
10	Esfera	1
12	Varilla aislante	2
15	Pedestal de piso	6
16	Barra espaciadora	4
17	Electrodo	1
18	Seccionador de puesta a tierra	1
19	Varilla de puesta a tierra	1
20	Voltímetro dc	1
21	Voltímetro pico de impulso	1
22	Divisor de bajo voltaje	1

 Tabla 5.2 Lista de componentes empleados para el circuito de Impulso tipo Rayo

 Fuente: Terco

La figura 5.4 y 5.5 representa el circuito esquemático e implementado para las pruebas de impulso tipo rayo.



Figura 5.4 Circuito Esquemático implementado en el laboratorio de alta tensión Fuente: Terco



Figura 5.5 Circuito implementado en el laboratorio de alta tensión Fuente: Terco

5.2.6. Análisis estadístico de resultados según la metodología niveles múltiples.

La probabilidad de una descarga disruptiva depende del nivel de tensión sometido, los resultados obtenidos se pueden representar mediante una función de probabilidad P(V), esta función de descarga disruptiva es proporcional a la tensión de flameo U50% y la desviación convencional Z ^{[27] [28]}

Para una correcta valoración de P(V) la función de distribución gaussiana representa en gran medida los fenómenos físicos que dependen de parámetros aleatorios la cual se determina mediante la ecuación 5.10 y 5.11^[28]

$$P(V) = \frac{1}{Z\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{V} e^{-\frac{1}{2}*\left(\frac{x-U_{50\%}}{Z}\right)} dV$$
(5.10)

$$Z = U_{50\%} - U_{16\%} \tag{5.11}$$

El valor de U50% es aquel valor con la probabilidad de descarga del 50% o P(V) =0,5 mientras que la desviación convencional Z se determina mediante la ecuación 5.11 donde U16% es el valor de tensión con probabilidad de descarga del 16% o P(V) = 0,16.

En la figura 5.6 se indica la onda de impulso aplicada y la muestra de poste de PRFV sometido a un nivel de tensión de 120.7kV pico, en el anexo 9, se muestran las formas de onda a diferentes niveles de tensión capturadas mediante el osciloscopio.



Figura 5.6 Adquisición de datos y muestra de PRFV en ensayos de impulso tipo rayo a 120.7kV pico Fuente: Autores





En algunos de los ensayos se presentó valores de P= 0 o P=1 llamados valores extremos, cuando a un nivel de tensión en todos los impulsos aplicados se presentó chispa o flameo P=1 probabilidad del 100% de descarga, mientras que al no presentarse en ninguno de los impulsos P=0 probabilidad del 0% de descarga, estos resultados generan pérdida de información y un mayor porcentaje de error en la estimación de U50% y de Z.^[28]

Numero de prueba	Numero de impulsos por cada nivel de tensión	Tensión Secundaria Vrms	Tensión de BIL	Presencia de flameo Fase-Tierra	Presencia de flameo Fase- Tierra	Probabilidad de descarga (%)	Frecuencia de descarga
1	15	33,2	32,6	0	0,00	0,00	0,00
2	15	35,4	35,9	0	0,00	0,00	0,00
3	15	38	40,8	0	0,00	0,00	0,00
4	15	40,1	41,1	0	0,00	0,00	0,00
5	15	43,4	46,7	0	0,00	0,00	0,00
6	15	44,9	47,8	0	0,00	0,00	0,00
7	15	48,1	52,0	0	0,00	0,00	0,00
8	15	50,5	55,2	0	0,00	0,00	0,00
9	15	55,2	60,8	0	0,00	0,00	0,00
10	15	58,3	65,9	1	0,67	6,67	0,07
11	15	61,4	69, 0	1	0,67	6,67	0,07
12	15	62,7	71,5	3	2,00	20,00	0,20
13	15	66,1	73,8	3	2,00	20,00	0,20
14	15	70,6	80,5	3	2,00	20,00	0,20
15	15	73,4	84,4	4	2,67	26,67	0,27
16	15	75,9	85,5	5	3,33	33,33	0,33
17	15	80,1	91,8	5	3,33	33,33	0,33
18	15	84,5	92,5	7	4,67	46,67	0,47
19	15	88,9	96,8	7	4,67	46,67	0,47
20	15	93,7	100,4	8	5,33	53,33	0,53
21	15	96,6	102,2	9	6,00	60,00	0,60
22	15	100,6	105,1	9	6,00	60,00	0,60
23	15	109,6	108,1	10	6,67	66,67	0,67
24	15	112,4	113,3	11	7,33	73,33	0,73
25	15	117,9	120,7	11	7,33	73,33	0,73

ola 5.3 Resultados prueba niveles múltiple	S
Fuente: Autores	

Los resultados y datos obtenidos en base a la metodología de niveles múltiples se muestra en tabla 5.3, además de ser interpretados mediante un proceso estadístico para valorar la tensión de flameo U50%.



Figura 5.8 Resultados prueba niveles múltiples Fuente: Autores

En la figura 5.8 se presenta la curva de los valores del BIL obtenidos mediante la prueba de niveles múltiples, donde se indica el máximo valor que puede soportar la muestra de poste PRFV ante un impulso de tipo rayo.

$$Z = 0.9649 V - 46.483$$

Por lo tanto

$$U_{50\%} = \frac{50 + 46.483}{0.9649}$$
$$U_{50\%} = 105.2302 \, kV$$

Aplicando la ecuación 5.5 se determina el nivel de aislamiento BIL en función de la tensión de flameo U50% [28]

BIL = 0.9616 * 105.2302 $BIL = 100.968 \, kV$

Factor de corrección atmosférico según la normativa IEC 60071-2

La determinación del factor de corrección de altitud *Ka* se determina mediante la ecuación 3.30 y considera la presión atmosférica; durante los ensayos el laboratorio de alta tensión de la Universidad politécnica salesiana presento un valor promedio de temperatura de 20.9 grados centígrados, humedad absoluta $H_{ab} = 8.93 \frac{g}{m^3}$

Obteniendo un factor Ka para frecuencia industrial de fase-tierra y fase-fase de 1.1758, mientras que para impulso tipo rayo de 1.3825 tal como de muestra en la tabla 3.23

Factor de corrección atmosférica ka	Tipo de sobretensión	Valor determinado por coordinación de aislamiento	Valor determinado mediante ensayos	Corrección atmosférica	
1,1758	Frecuencia industrial	48,06	53,55	45,5434598	kV
1,3825	Impulso tipo rayo	110,45	100,96	73,0271248	kV pico

Tabla 5.4 Corrección atmosférica Fuente: Autores

En la tabla 5.4 se nota que los valores determinados en la corrección atmosférica son menores a los obtenidos mediante ensayos esto se debe a que la normativa se establece en torno a una temperatura de 20 °C Presión 1013 mbar y Humedad absoluta de 11 g/m^3 "a nivel del mar". Mediante las condiciones ambientales de la provincia del Azuay de determino un valor de 48.06kV para frecuencia industrial y 110.45 kVpico para impulso tipo rayo, resaltando que estos valores de sobretensión son de mayor magnitud debido a la altura sobre el nivel del mar, polución entre otros.

Análisis de resultados

Mediante el proceso de coordinación de aislamiento se determinó que bajo condiciones como: altura sobre el nivel del mar de 3640m.s.n.m, nivel de contaminación y características técnicas semejantes a las que dispone la Empresa Eléctrica Centro Sur se obtiene un valor de tensión Fase-Fase de 48.07 kV para frecuencia industrial de corta duración y de impulso tipo rayo un valor de tensión Fase-Fase de 110.45 kVpico, tal como se muestra en la tabla 3.27.

Mediante los resultados de ensayos, realizados en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, se determinó que el voltaje de ruptura del poste de PRFV es de 53.33kVcon un valor de rigidez dieléctrica de 7.65 kV/mm; y por medio el método de la U50% se obtuvo un valor de BIL 100.968 kVpico. Llegando a la conclusión que en cuanto al ensayo de frecuencia industrial cumple con las exigencias técnicas descritas propuestas en este proyecto; pero en cuanto al Nivel básico de aislamiento el valor obtenido en los ensayos no concuerda con los resultados de coordinación de aislamiento por lo cual se plantea que la empresa deba mejorar implementado procesos de

fabricación automatizados y control en la elaboración de productos compuestos por PRFV [19] [25]

En la tabla 5.5, se muestra las características predominantes de un poste PRFV, utilizado como un medio aislante para los Sistemas Eléctricos de Distribución

CARACTERÍSTICAS PREDOMINANTES DE AISLAMIENTO POSTES DE PRFV				
ÍТЕМ	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	OFRECIDO	
1	Fabricante		Equisplast	
2	País		Ecuador - Azuay	
3	Referencia y Tipo		Poste de PRFV	
4	Instalación		Externa	
5	Tensión nominal del sistema fase-fase	kV	24	
6	Tensión de servicio continuo Urp Fase-fase	kV	19,39	
7	Tensión de servicio continuo Urp Fase-tierra	kV	33,6	
8	Frecuencia Hz	Hz	60	
9	Nivel en clase de polución		Medio	
10	Nivel Básico de Aislamiento (BIL)	kV pico	100.968	
11	Rigidez dieléctrica	kV/mm	7,65	
12	Voltaje de ruptura	kV	53,55	
13	Factor de corrección atmosférica ka para frecuencia Industrial		1.1758	
14	Factor de corrección atmosférica ka para impulso tipo rayo		1.3825	
15	Corrección atmosférica frecuencia Industria "Nivel del mar"	kV	45.5434	
16	Corrección atmosférica para impulso tipo rayo "Nivel del mar"	kV pico	73.0271	
15	Detección de Descargas Parciales desde	kV	35	
16	Resistencia a la rotura por	kg/m	500	
17	Dimensiones del contorno del equipo			
18	Altura	m	12	
19	Diámetro superior	m	0,3	
20	Diámetro inferior	m	1	
21	Peso de la estructura	lb		

Tabla 5.5 Características predominantes de aislamiento postes de PRFV

Fuente: Autores

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La metodología de coordinación de aislamiento propuesta por la normativa IEC 60071 tiene la finalidad de determinar el nivel óptimo de aislamiento aumentando la confiabilidad del sistema y reduciendo costos referentes a la construcción de los sistemas eléctricos de potencia.
- Para la coordinación de aislamiento existen factores relevantes que influyen en la magnitud de los tipos de sobretensiones, dichos factores son: la altitud a nivel del mar, los niveles de contaminación de las instalaciones, las ubicaciones de pararrayos entre otros. Dentro de un sistema de distribución el nivel de aislamiento viene dado específicamente para sobretensiones temporales e impulsos tipo rayo (origen atmosférico), por lo tanto el diseño debe dimensionarse en torno a estos fenómenos para conseguir mayor exactitud en la selección del nivel de aislamiento.
- El valor de rigidez dieléctrica obtenido mediante las pruebas está por encima del valor propuesto por la norma ASTM para polímeros, cabe mencionar que este valor fue obtenido de una manera probabilística, debido a la aleatoriedad de los niveles de tensión de ruptura.
- Las muestras que mayor tensión de ruptura soportaron fueron las que no presentaban imperfecciones referentes a su fabricación, llegando a soportar tensiones a los 75kV. Las muestras que no eran homogéneas, debido a imperfecciones en su acabado soportaron niveles cercanos a los 55kV.
- La tensión de Flameo U50% es un parámetro necesario en la coordinación de aislamiento, partiendo de este valor se determinan los niveles de aislamientos básicos BIL y BSL, mismo que se obtuvo aplicando el método multiniveles con impulsos de polaridad positiva, en condiciones secas al nivel de la ciudad de Cuenca con una forma de onda normalizada 1.2/50, documentando y basado en el procedimiento estadístico propuestos por la norma IEEE Std 4 para la determinación de la tensión U50% y desviación estándar.
- El valor de BIL determinado estadísticamente es de 100.968 kV pico, pero existieron ensayos en el cual el valor fue superior estando alrededor de 120.7 kV

pico debido la constitución del poste de PRFV. Este valor contrastando con los resultados obtenidos mediante coordinación de aislamiento se asemejan, se sugiere que la empresa debe implementar proceso de control en la construcción.

- De acuerdo al trabajo realizado se determina que los postes de PRFV debido a las propiedades de la materia prima y combinación cumplen con estándares internacionales en cuanto a rigidez dieléctrica desempeñando las mismas funciones que los de hormigón armado.
- Las apariciones relevantes de Descargas Parciales Superficiales en las muestras de poste PRFV se dieron a partir de los 25 kV rms, en niveles de tensión inferiores a este valor, se notaron magnitudes de corrientes pequeñas casi imperceptibles con alta presencia de ruido. No se pudo realizar la adquisición de datos de descargas parciales superiores a 35 kV, debido a la existencia de arco eléctrico, por lo cual equipos de medición no podían estimar corrientes de fuga.
- A medida que aumentaba la presencia de Descargas Parciales Superficiales, se notaba una pronta degradación del aislamiento de la muestra de poste PRFV, llegando a niveles de aislamiento muy bajos, tal como se lo indica la curva " Aislamiento – Voltaje" Anexo 7
- Con el Megger, se realizó la medición del aislamiento de la muestra de poste PRFV después de cada nivel de tensión aplicado en la prueba de Descargas Parciales, empezando con un valor de aislamiento superior a los 300 G Ω , notando que el nivel de aislamiento bajaba a medida que se aumentaba el nivel de tensión de la prueba, se llegó a realizar la medición hasta los 50 kV donde el nivel de aislamiento era de 1 G Ω , una vez que se supera ese nivel de tensión se produce la ruptura de la muestra.

Recomendaciones

- Se recomienda el desarrollo de un estudio sobre la densidad de descargas atmosféricas y nivel isoceraunico en nuestro país ya que es importante para diseños de instalaciones de alto voltaje
- Se debe analizar las condiciones atmosféricas del lugar de estudio, para estimar valores adecuados que compensen los efectos sobre el SEP, obteniendo mayor exactitud en la selección de los niveles aislamiento.
- Se recomienda a la empresa Equisplast implementar procesos automatizados de control en el laminado, notando en diferentes muestras que la uniformidad es un factos relevante para la rigidez dieléctrica con la finalidad de ofrecer a sus clientes productos de alta calidad.
- El laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca cuenta con la tecnología necesaria para realizar ensayos en nuevos productos como crucetas de PRFV y cubiertas de pisos de Subestaciones Eléctricas aportando y contribuyendo al desarrollo industrial del país.

REFERENCIAS

- [1] T. S. Guamán Espinoza and J. C. Velecela Chichay, "ANÁLISIS TÉCNICO DE LA INTERCONEXIÓN ENTRE EL ALIMENTADOR 124 DE LA S/E AZOGUES 1 Y EL ALIMENTADOR 221 DE LA S/E AZOGUES 2 PERTENECIENTES A LA EMPRESA ELÉCTRICA AZOGUES C.A.," Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [2] MEER, "HOMOLOGACIÓN DE LAS UNIDADES DE PROPIEDAD (UP) Y UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN (UC) DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION ELÉCTRICA," 2011.
- [3] MEER, "ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES Y EQUIPOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN REVISIÓN: 04 POSTE CIRCULAR DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO," 2011.
- [4] International Electrotechnical Commission, "IEC 60071.1 Insulation Coordination: Part 1 Definitions, Principles and Rules," p. 47, 2012.
- [5] International Electrotechnical Commission, "IEC 60270: High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements," *Indian Stand.*, p. 46, 2011.
- [6] American Society for Testing and Materials, "ASTM D-149 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power," *ASTM Stand.*, vol. 9, no. Reapproved, pp. 1–13, 2013.
- [7] American Society for Testing and Materials, "ASTM D-3426 Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials Using Impulse Waves 1," *Test*, vol. 97, no. Reapproved 2012, pp. 2–5, 2015.
- [8] Equisplast, "Equisplast, Sinónimo de Desempeño, Calidad y Garantía," 2008.
 [Online]. Available: http://www.equisplast.com/acerca-de-equisplast. [Accessed: 29-Mar-2018].
- [9] A. M. Fabela Reyes, *El Diseñador Industrial Emprendedor: Profesionalismo En La 4Ri*, 1st ed. México, 2018.
- [10] M. P. Groover, C. M. de la Peña Gómez, M. A. Martínez Sarmiento, and F. J.

Sandoval Palafox, *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas*. Prentice-Hall, 1997.

- [11] Equisplast, "Postes y estructuras de PRFV." [Online]. Available: http://www.equisplast.com/tecnologia/filament-winding/3/. [Accessed: 26-Feb-2018].
- [12] Equisplast, "Postes de Distribución de PRFV," 2008. [Online]. Available: http://www.equisplast.com/productos/postes-prfv-postes-de-distribucion/2/.
 [Accessed: 15-Mar-2018].
- [13] H. S. E. Bastidas, "DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN REDES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN," Universidad Nacional de Loja, 2016.
- [14] Q. Cuesta, F. Mateo, G. Juca, and F. Xavier, "Determinación de las Condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores mediante el análisis de corriente," Universidad Politécnica Salesiana, 2017.
- [15] D. M. Villalba Noriega, "Comparación entre normas IEEE e IEC sobre coordinación de aislamiento (en sistemas de distribución hasta 69kV)," Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [16] International Electrotechnical Commission, IEC 60060-1 High- voltage test techniques part 1 General definitions test requirements.
- [17] M. F. Saguay Tacuri and R. A. Torres Cuenca, "ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE MEDIOS DIELÉCTRICOS ANTE LAS ALTAS TENSIONES ELÉCTRICAS," Universidad de Cuenca, 2011.
- [18] D. G. MONTALUISA MONTALUISA, "ANÁLISIS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA PRIMARIOS DE DISTRIBUCIÓN," ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2008.
- [19] International Electrotechnical Commission, "IEC 60071.2 Insulation Coordination: Part 2 Application Guide," 1996.
- [20] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE 1313.2 Guide for the Application of Insulation Coordination*. 1999.
- [21] International Electrotechnical Commission, IEC 60060 2 HIGH VOLTAGE

TEST TECHNIQUES Part 2 Measuring systems, vol. 2. 2010.

- [22] Amperis, "Tipos de descargas parciales," 2007. [Online]. Available: https://www.amperis.com/content/tipos-de-descargas-parciales/. [Accessed: 13-Mar-2018].
- [23] S. Chakravorti, D. Dey, and B. Chatterjee, *Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers*. 2013.
- [24] Hubbell Power Systems, "Surge Arresters IEC Line Discharge classes 2, 3, 4 & 5," 2015.
- [25] S. Cuenca, C. D. E. I. Eléctrica, J. Fernando, L. Cardenas, N. Alonso, and V. Tenemaza, "Estudio para la implementación de pararrayos en sistemas de distribución de media tensión," Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [26] Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE 1410-2010 Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, vol. 2010, no. January. 2011.
- [27] Instituto Politecnico Nacional Unidad Zacateco, Determinación de la u50 al impulso por frente rápido paara la configuración punta plano a distancias cortas. January. 2015.
- [28] Universidad Industrial de Santander Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, *Tensión de Chispa. Determinación y Tratamiento Estadístico de Resultados*. Bucaramanga 2014.
- [29] Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Investigación de los Parámetros Característicos del Comportamiento de Medios Dieléctricos Frente a Sobretensiones Tipo Rayo no Normalizadas en Alta Tensión. Madrid. 2004.
- [30] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Nacional de Educación a Distancia, Determinación de la Función de la tension de ensayo para impulsos tipo Rayo con Oscilaciones Superpuestas en Espacios de Aire Sometidos a Campos Eléctricos no Homogéneos. Madrid 2015.

Anexos



Anexo 1: Descarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 5 kV rms



Anexo 2: Descarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 10 kVrms







Anexo 4: Descarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 20 kVrms





Anexo 6: Descarga parciales producidas sobre 10 muestras a un nivel de tensión de 30 kVrms








Aislamianta											
AIStatilie nuo											
Voltaje	Prueba 1 [GΩ]	Prueba 2 [GΩ]	Prueba 3 [GΩ]	Prueba 4 [GΩ]	Prueba 5 [GΩ]	Prueba 6 [GΩ]	Prueba 7 [GΩ]	Prueba 8 [GΩ]	Prueba 9 [GΩ]	Prueba 10 [GΩ]	Aislamiento [GΩ]
0	255	355	201	300	290	280	400	400	320	320	312,1
5	200	295	170	280	280	230	380	360	280	185	266
10	185	264	150	250	264	180	300	325	260	180	235,8
15	152	198	140	200	180	150	250	280	165	150	186,5
20	105	153	104	160	150	104	230	130	120	115	137,1
25	76	132	96,1	95	135	90	200	115	95	100	113,41
30	39	115	85,8	80	110	80	190	90	74	90	95,38
35	29	103	80	30	105	60	100	86	50	60	70,3
40	19	80	75	15	70	55	55	43,6	10	30	45,26
45	17	65	64,2	10	50	42,5	20	25	0,5	26	32,02
50	0,40	0,5	0,7	0,3	0,8	0,9	0,02	0,3	0,002	10	1,3922

Anexo 7: Tabulaciones ensayos Aislamiento-Voltaje



Temperatúra											
Voltaje	Prueba 1 [°C]	Prueba 2 [°C]	Prueba 3 [°C]	Prueba 4 [°C]	Prueba 5 [°C]	Prueba 6 [°C]	Prueba 7 [°C]	Prueba 8 [°C]	Prueba 9 [°C]	Prueba 10 [°C]	Temperatúra [°C]
0	19,1	19,3	19	18	19,2	18,3	18	17,9	18,1	17,2	18,41
5	19	20	19	19,1	20	19	19	17,9	18,6	17	18,86
10	19,8	19,7	19,02	19,02	19,5	19,02	19,02	18	18,5	18,1	18,968
15	20,3	19,4	19,5	19,5	19,4	19,1	19,5	18,2	18,9	18,3	19,21
20	20	19	19,6	20	20	19,6	20	18,5	19,3	18,7	19,47
25	21	19,3	19,9	20,1	20,3	19,5	20,5	19,2	19,5	19	19,83
30	21	18,2	20,1	20,5	20,3	20,1	20,6	19,3	20,1	20,2	20,04
35	22,17	21,5	21	21	21,5	20	21	19,5	20,3	21,2	20,917
40	23	22,5	23,1	22	22	20	20,9	19,9	21	21	21,54
45	24	23	23,6	23,6	23,2	21,5	21,5	20,3	21,5	21,6	22,38
50	24,00	23,2	24	23,9	23,5	22	21,8	21	21,8	22	22,72

Anexo 8: Tabulaciones ensayos Temperatura-Voltaje







Anexo 10: Muestras de postes PRFV, sometidas al ensayo de impulso tipo rayo



Muestra 1





Anexo 11: Datos ensayos de impulso tipo rayo BIL

		1	1 ,					
kV	kV rms	kVDC	Prueba	Prueba	Prueba	Promedio	Formo onda	DISTRI.

	nominal	prom.	prom.	1	2	3		SI/NO	NORM
1	30	30,1	29,9	26,6	29,3	32,9	29,6	SI	0,003768352
2	33	33,2	35,0	31,3	30,8	35,8	32,6	SI	0,00454524
3	35	35,4	35,9	31,4	37,3	39,1	35,9	SI	0,005495904
4	38	38	39,7	39	40,0	43,5	40,8	SI	0,0070708
5	40	40,1	41,2	40,4	41,5	41,5	41,1	SI	0,007168451
6	43	43,4	44,5	46,1	45,9	48,1	46,7	SI	0,009111657
7	45	44,9	45,7	47,7	46,1	49,6	47,8	SI	0,009515351
8	48	48,1	51,0	55,1	46,7	54,3	52,0	SI	0,010998586
9	50	50,5	50,0	57,1	53,2	55,1	55,2	SI	0,012033693
10	55	55,2	57,3	64,1	58,7	59,6	60,8	SI	0,013666112
11	58	58,3	61,4	66,2	64,4	67,1	65,9	SI	0,014714958
12	61	61,4	64,3	70,5	68,5	68,1	69,0	SI	0,015109005
13	63	62,7	65,8	74,6	69,1	70,7	71,5	SI	0,015272552
14	66	66,1	70,4	75,2	71,9	74,3	73,8	SI	0,015304477
15	70	70,6	75,4	86,4	72,8	82,2	80,5	SI	0,014729789
16	73	73,4	77,5	92,7	75,7	84,7	84,4	SI	0,013975939
17	76	75,9	81,8	94,9	76,3	85,4	85,5	SI	0,01369504
18	80	80,1	86,9	104,1	79,2	92,2	91,8	SI	0,011870456
19	84	84,5	91,7	104,4	79,9	93,1	92,5	SI	0,011659386
20	89	88,9	96,6	106,5	86,9	97,0	96,8	SI	0,010163701
21	93	93,7	102,3	111,6	89,4	100,1	100,4	SI	0,00890783
22	96	96,6	105,8	112,3	90,2	104,2	102,2	SI	0,00823903
23	100	100,6	110,5	114,9	93,4	106,9	105,1	SI	0,007253179
24	109	109,6	114,7	117,1	98,2	109,1	108,1	SI	0,006245356
25	112	112,4	115,5	123,8	104,3	111,7	113,3	SI	0,004705285
26	117	117,9	120,7	129,1	110,9	122,2	120,7	NO	0,002908306