UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS DE LA RUPTURA DIELÉCTRICA EN AISLADORES DE PORCELANA, POLÍMERO Y VIDRIO A NIVEL DE 13,8 kV

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:
Carlos Washington Segovia Segovia
Carlos Rodrigo Zambrano Segovia
Tutor:
Ing. Gabriel Napoleón Pesantes Palacios Msc.

LATACUNGA –ECUADOR
2021

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación "Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13,8 Kv." presentado por Segovia Segovia Carlos Washington y Zambrano Segovia Carlos Rodrigo, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, marzo 28 de 2021

.....

Msc. Gabriel Napoleón Pesantes Palacios

CC. 030189388-9

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: "Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13,8 Kv.", ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....

Carlos Ivan Quinatoa Caiza
050328786-4
Presidente del tribunal

.....

Marco Aníbal León Segovia
050230540-2
Lector 2

.....

Jimmy Xavier Toasa Iza
171762106-2
Lector 3

AGRADECIMIENTO

“Cuando la gratitud es absoluta las palabras sobran, el esfuerzo, la dedicación y constancia, entrelazados al cumplir un objetivo, mi sincero agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma hacen realidad este logro.”
Carlos Rodrigo Zambrano Segovia

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....
Ing. Carlos Washington Segovia Segovia
050313577-4

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....
Ing. Carlos Rodrigo Zambrano Segovia
050324491-5

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....
Ing. Carlos Washington Segovia Segovia
050313577-4

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....
Ing. Carlos Rodrigo Zambrano Segovia
050324491-5

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: "Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13,8 Kv.", contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, agosto, 16, 2021

.....

MSc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

050328786-4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Título: Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13,8 kv

Autores: Carlos Washington Segovia Segovia
Ing. Carlos Rodrigo Zambrano Segovia
Tutor: Msc. Gabriel Napoleón Pesantes Palacios.

RESUMEN

La poca accesibilidad a una herramienta que permita conocer el comportamiento de los aisladores bajo condiciones de extrema humedad y contaminación, motivó nuestro esfuerzo para desarrollar un modelo matemático en MATLAB que haga posible el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a 13.8 kV. La obtención del modelo partió de la investigación bibliográfica, y la posterior representación de los circuitos de los ensayos, se utilizó el Hipot Huzheng de 50 kV y 5 kVA. Con base a estas representaciones y las leyes físicas conocidas, se obtuvieron las ecuaciones y formaron los sistemas diferenciales que nos llevaron a concluir en la obtención del modelo matemático. Una vez estructurado el modelo matemático, este fue integrado a la interfaz gráfica de Usuario de MATLAB o GUI, a través de una aplicación que incluye las opciones para simular distintas condiciones ambientales y de contaminación tales como: temperatura, humedad, resistencia eléctrica, presión atmosférica, nivel de voltaje aplicado y longitud del arco eléctrico. El modelo nos posibilita observar cómo actúan los aisladores si son expuestos a impulsos de frecuencia industrial, determinar la corriente de fuga y la posible ruptura dieléctrica en función de los factores ya indicados, sino también da a conocer el modo en el que manejan los impulsos tipo rayo los aisladores usados en redes de distribución; finalmente la aplicación desarrollada también entrega el voltaje al cual se produce la ruptura dieléctrica. En el proceso de validación, el modelo matemático demostró tener buen nivel de exactitud.

PALABRAS CLAVE: Ruptura dieléctrica; contaminación ambiental; modelo matemático; corriente de fuga; aisladores; redes de distribución.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCION DE POSGRADO
MAESTRIA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Theme: Development of a mathematical model in MATLAB for the analysis of dielectric breakdown in porcelain, polymer and glass insulators at 13.8 kV.

Authors: Segovia Segovia Carlos Washington.
Zambrano Segovia Carlos Rodrigo.
Tutor: MSc. Gabriel Napoleón Pesantez Palacios.

ABSTRACT

The limited accessibility of a tool that allows knowing the behavior of insulators under conditions of extreme humidity and contamination, motivated our effort to develop a mathematical model in MATLAB that makes possible the analysis of dielectric breakdown in porcelain, polymer and glass insulators at 13.8 kV. Obtaining the model started from the bibliographic research, and the subsequent representation of the test circuits, the Hipot Huazheng of 50 kV and 5 kVA was used. Based on these representations and the known physical laws, the equations were obtained and the differential systems were formed that led us to conclude in obtaining the mathematical model. Once the mathematical model was structured, it was integrated into the graphical user interface of MATLAB or GUI, through an application that includes options to simulate different environmental and pollution conditions such as: temperature, humidity, electrical resistance, atmospheric pressure , applied voltage level and electric arc length. The model allows us to observe how the insulators act if they are exposed to industrial frequency impulses, determine the leakage current and the possible dielectric breakdown based on the factors already indicated, but also reveals the way in which they handle the type impulses lightning insulators used in distribution networks; finally, the developed application also provides the voltage at which dielectric breakdown occurs. In the validation process, the mathematical model proved to have a good level of accuracy.

KEYWORDS: Dielectric breakdown, environmental pollution, mathematical model, leakage current, insulators, distribution networks.

MSc. Estuardo Vladimir Sandoval Vizuete con cédula de identidad número: 050210421-9 Licenciado en: Ciencias De la Educación especialidad Inglés con número de registro de la SENESCYT:1010-04-477716; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **"Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a 13.8 kV."** de: Carlos Washington Segovia Segovia y Carlos Rodrigo Zambrano Segovia, aspirantes a magister en Electricidad mención en Sistemas Eléctricos de Potencia

Latacunga, Agosto, 02, 2021

Estuardo Vladimir Sandoval Vizuete
050210421-9

Firmado electrónicamente por:
MARCO PAUL BELTRAN SEMBLANTES

CENTRO DE IDIOMAS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN 14

Antecedentes: 15

Planteamiento del problema. 15

Formulación del problema. 16

Objetivo General 16

Objetivos Específicos 16

Justificación. 18

Hipótesis 18

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA 19

Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte. - 19

Fundamentación Teórica. 21

1.1 Aisladores 23

1.2 Material del aislador 24

1.2.2 Aisladores de porcelana 25

1.2.3 Aisladores de vidrio 25

1.2.4 Aisladores compuestos 25

1.3 Intercambiabilidad de Aisladores 25

1.4 Mantenimiento de Aisladores..... 26

1.5 Contaminación 26

1.6 Rigidez dieléctrica 27

1.7 Descargas Parciales 27

1.8 Comportamiento de un material aislante ante la incidencia de un campo eléctrico 29

1.8.2 Corriente de Fuga Superficial 29

1.8.3 Corriente de Absorción Dieléctrica 30

1.8.4 Corriente de Descarga Parcial 30

1.8.5 Corriente Capacitiva de Carga 30

1.8.6 Corriente de Fuga Volumétrica 31

1.9 Sobretensiones 32

1.9.2 Clases de sobretensiones: 32

1.10 Medios para limitar sobretensiones 34
1.11 Medios para evitar sobretensiones 35
1.12 Efectos que causan sobretensiones 36
1.12.2 Pérdidas de Carga. 36
1.12.3 Conexión y reenganche de líneas 36
La tensión en el en terminal del interruptor sigue a la tensión de la fuente, mientras que la tensión en el lado desconectado oscila a una frecuencia más elevada, los métodos usuales para controlar este tipo de efectos consisten en el uso de resistencias de preincersión o varistores que limiten los valores de sobretensión. 36
1.12.4 Superficies aislantes expuestas. 37
Común en aislantes sólidos, en donde el elemento queda expuesto a las condiciones ambientales que envejecen de manera progresiva el aislante. El efecto de la lluvia en los aislamientos externos es la reducción de la tensión de descarga, esto debido al mecanismo de descarga superficial. 37
Las superficies de aisladores en servicio se cubren de varias capas de materiales contaminantes, esta capa resulta conductora si contiene agua (condensación de la humedad ambiental) y sal o partículas provenientes de humos o polvos, el espesor de esta capa de polución determinará el nivel de recalentamiento del aislador pues a menor espesor mayor densidad de corriente y por ende temperatura, pudiendo producir bandas secas. 38
1.13 Hi-Pot 38
1.14 Prueba de Absorción Dieléctrica 39
1.15 Prueba de Voltaje por Pasos 39
1.16 Modelación matemática 40
1.17 Conclusiones Capítulo I 41
2 CAPÍTULO II. PROPUESTA. 42
2.1 Título del proyecto. 42
2.2 Objetivo del proyecto. 42
2.3 Descripción de la propuesta. 42
Prueba de contorneo a baja frecuencia en seco..... 42
Prueba de contorneo a baja frecuencia en húmedo. 42
Prueba de voltaje crítico tipo impulso positivo. 43
2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados 43
2.5 Métodos de prueba 44

2.5.2 Método Bibliográfico 44
2.5.3 Método Deductivo 44
2.6 Conclusiones Capítulo II 44
3 CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA 45
3.1 Análisis de los resultados 45
3.2 Modelación matemática 45
Fuente: [37] 53
3.3 Ensayos de laboratorio 53
3.4 Influencia de las condiciones atmosféricas 54
3.4.2 Determinación de la resistencia de aislamiento 55
3.4.3 Determinación del flashover 57
3.5 Validación técnica-económica de los resultados: 61
3.6 Conclusiones del III capitulo..... 61
Referencias bibliográficas. 63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de distribución MEER22
Figura 2. Aislador Hubbell [22]23
Figura 3. Descarga parcial: (a) Sin contaminantes y con una humedad relativa del 30 al 40 %, (b) Sin contaminantes y con una humedad relativa del 98 %.28
Figura 4. Patrón de descarga parcial con el 0.12 de ESDD y V = 11kVrms.28
Figura 5. Patron de descarga parcial con el 0.08 ESSD y (a) 60% HR, (b) 70% HR, (c) 80% HR, (d) 90% HR y V = 11kVrms.29
Figura 6. Corrientes en un Dieléctrico ante un Campo Eléctrico DC31
Figura 7. Corrientes de Fuga bajo un Campo Eléctrico DC32
Figura 8. Sobretensiones.33
Figura 9. Tipos de ondas normalizadas.34
Figura 10. Tipos de ondas normalizadas.35
Figura 11. Aplicación del modelo electrogeométrico.36
Figura 12. Sobretensión por perdida de carga.37
Figura 13. Proceso de descarga eléctrica en aisladores.37
Figura 14. Hi-Pot Huazheng38
Figura 15. Prueba de voltaje por pasos39
Figura 16. HI-POT Huazheng, de 50kV y 5kVA.45
Figura 17. Diagrama eléctrico HI-POT Huazheng.45
Figura 18. Diagrama eléctrico prueba del aislador.46
Figura 19. Circuito equivalente en el dominio de la frecuencia.50
Figura 20: Comprobador de aislamiento Metrel MI320153
Figura 21: Determinación de la resistencia de aislamiento.56
Figura 22: Flashover en aisladores.61

INTRODUCCIÓN

Si bien los aisladores deben cumplir con requisitos específicos para su comportamiento bajo polución [1], las condiciones de fallo dependen del nivel y tipo de contaminante presente.

Los materiales aislantes deben presentar una resistividad superior a $10^8 \Omega.cm$; además buenas propiedades mecánicas, ser rígidos, capaces de soportar condiciones climáticas adversas y descargas eléctricas [2]. Determinadas magnitudes caracterizan el ensuciamiento de los aisladores, efecto causado por la sedimentación de las partículas suspendidas en la atmósfera, que se depositan en la superficie de los componentes eléctricos de las redes de distribución, los contaminantes pueden ser elementos conductores que en dependencia de sus propiedades físico-químicas, humedad y temperatura, alteran la funcionalidad de los aisladores, el problema resulta ser complejo en dependencia de la concentración de contaminantes salinos, por ejemplo en ambientes marinos. Para evitar el fallo de aisladores es posible aplicar un método predictivo en función de datos medioambientales que puede proporcionar información sobre la contaminación [3].

Como respuesta a problemas de contaminación en líneas de alta tensión y sus componentes, se han desarrollado robots manipuladores (robodriel), capaces de lograr tareas de limpieza en elementos de porcelana y vidrio, la tarea debe ser llevada a cabo antes de que la polución y la humedad formen un electrolito conductor, y permita el fallo del sistema. El lavado se produce con un fluido dieléctrico a base de agua y silicón, que forma una película hidrofóbica en la superficie del aislador; en casos extremos, una limpieza profunda a base de ácidos puede realizarse, pero para ello el sistema debe estar desenergizado [4]. Los esfuerzos no sólo se han enfocado en tareas de mantenimiento, sino también en el diseño de los sistemas, aisladores y sobre todo el desarrollo de recubrimientos. Películas de dióxido de titanio han sido probadas y usadas, para evitar la acumulación de contaminantes en la superficie de los aisladores, la respuesta ha sido positiva, logrando una reducción en la adherencia, buen

desempeño eléctrico, gran resistencia a la erosión (50% mejor en relación a la taza normalmente vista en aisladores comunes), la presencia de propiedades hidrifóbicas, una reducida corriente de fuga y aumentada tensión de flameo [5]; finalmente el presente trabajo pretende ser soporte de diseño de sistemas eléctricos de potencia, además de una herramienta de apoyo en la planificación del mantenimiento.

Antecedentes:

El presente trabajo corresponde a la línea de investigación de: Procesos Industriales, debido a que la concentración de contaminantes ambientales en redes de distribución, así como también las condiciones climáticas, ocasionan una reducción en la resistencia de aisladores; por consiguiente también se produce un cambio en las propiedades dieléctricas del elemento hasta ocasionar fallos [6]. La sublínea se centra en la explotación y diseño de sistemas eléctricos de potencia, pues la selección de los aisladores y su comportamiento en condiciones medioambientales desfavorables, deben ser considerados en el proceso de diseño.

El modelo matemático para el análisis de la ruptura dieléctrica de los aisladores de distribución en 13.8 kV, será una herramienta útil para el análisis del comportamiento de los aisladores, en distintas condiciones medioambientales y de polución. Permitirá desarrollar un fuerte criterio de selección de aisladores, esto en dependencia del lugar geográfico de instalación. Generará un incremento en la calidad del servicio y asegurará la cobertura de los sistemas públicos [7].

Planteamiento del problema.

El problema del presente trabajo consiste en realizar un modelo matemático que permita verificar la ruptura dieléctrica de un aislador de distribución a nivel de 13800 Voltios, en diferentes entornos de salinidad, humedad y contaminación.

En el Ecuador las empresas eléctricas que prestan el servicio de distribución, tienen problemas con cortocircuitos directos a tierra, flameos causados por la excesiva humedad, temperatura y contaminación presente en los aisladores, provocando salidas de servicio de alimentadores trifásicos y monofásicos, causando una mala calidad de servicio y malestar en los usuarios finales, mediante este trabajo de investigación se

desea obtener un modelo matemático como un aplicativo de mantenimiento, para el mejoramiento de la calidad de servicio.

Los costos que arrojan los mantenimientos correctivos, causados por la salida de servicio de alimentadores de distribución por problemas en aisladores, son más elevados que los realizados en un mantenimiento preventivo, el modelo matemático busca convertirse en una herramienta versátil que ayude a prevenir daños, al realizar simulaciones de los aisladores en diferentes entornos de contaminación.

La escasa documentación sobre el tema, abre una brecha importante de desconocimiento por parte de los profesionales afín al área eléctrica, la presente investigación busca dejar un precedente investigativo y una herramienta útil que solvente requerimientos de diseño y mantenimiento en redes de distribución.

Formulación del problema.

¿El modelo matemático de la ruptura dieléctrica en aisladores de distribución para 13,8 kV, será una herramienta útil en el diseño y mantenimiento de redes de distribución y mejorará el índice de calidad de servicio en usuarios finales?

Objetivo General

Desarrollar un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica de aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13.8 kV, con la ayuda de pruebas en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Objetivos Específicos

Recopilar información bibliográfica para fundamentar teóricamente la modelación matemática de la rigidez dieléctrica de aisladores de porcelana polímero y vidrio.

Realizar pruebas en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con el equipo HI-POT 50 kV – KVA, para determinar la ruptura dieléctrica de los aisladores.

Diseñar el modelo matemático con la ayuda de los resultados de las pruebas de laboratorios.

Tabular y analizar los datos obtenidos tanto en las pruebas de laboratorio y los resultados arrojados por el modelo matemático.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Objetivos específicos	**Actividad (tareas)**	**Resultado de la actividad**	**Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)**
Recopilar información bibliográfica para fundamentar teóricamente la modelación matemática de la rigidez dieléctrica de aisladores de porcelana, polímero y vidrio	Recopilación bibliográfica sobre trabajos similares Compilación de información, sobre normativa legal aplicable	Adquisición de conocimiento relacionado a trabajos similares	Recolección de datos
Realizar pruebas en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con el equipo HI-POT 50 kV – KVA, para determinar la ruptura dieléctrica de los aisladores.	Adquisición de aisladores de porcelana, polímero y vidrio. Ejecución de pruebas de laboratorio sin presencia de contaminantes Ejecución de pruebas de laboratorio alterando los entornos de los aisladores	Resultado y recolección de datos obtenidos en las pruebas.	Observación – Fichas de registro
Diseñar el modelo matemático con la ayuda de los resultados de las pruebas de laboratorios.	Tabulación de datos. Determinación del modelo matematico.	Modelo matemático	Observación – Fichas de registro
Tabular y analizar los datos obtenidos tanto en las pruebas de laboratorio y los resultados arrojados	Organización de datos arrojados por las pruebas de laboratorio y el modelo matemático	Resultados de la investigación	Observación – Fichas de registro

por el modelo matemático.	Interpretación y análisis de los datos arrojos en las pruebas y el modelo		

Fuente: Los autores

Justificación.

El uso de la electricidad como principal fuente de energía en los centros poblados para bienestar y confort de los usuarios, exige una máxima calidad de servicio de las empresas eléctricas de distribución, mismas que acarrean problemas con la salida de servicio de alimentadores primarios y secundarios, ocasionados por la ruptura dieléctrica de aisladores a causa de ciertas condiciones climáticas del medio.

El presente proyecto de investigación busca realizar un modelo matemático aplicable como un método de mantenimiento preventivo en las empresas distribuidoras, realizando pruebas de aisladores en el laboratorio, con la ayuda de un HI-POT 50 kV – KVA simulando ciertas condiciones ambientales presentes en el medio como humedad, contaminación.

El modelo matemático se convertirá en una herramienta fundamental que ayudará a prever las salidas de servicio de alimentadores primarios y secundarios ocasionadas por la ruptura de la rigidez dieléctrica, el modelo será un instrumento versátil que permitirá cambiar las variables de contaminación para la simulación, ayudando en el procedo del mantenimiento preventivo mejorando la calidad del servicio del usuario y abaratando los costos de mantenimiento de las empresas distribuidoras.

Hipótesis

El modelo matemático puede predecir el comportamiento de los aisladores a nivel de 13,8 kV, en diferentes entornos de contaminación y convertirse en una herramienta versátil para el mantenimiento y diseño de redes de distribución.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA-METODOLÓGICA

Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte. -

Uno de los contaminantes que afectan el desempeño de los aisladores en sistemas eléctricos de potencia en la ceniza volcánica, en Quito, se desarrolló un análisis experimental de la afectación de la ceniza volcánica sobre los aisladores eléctricos ANSI 52-3, generalmente utilizados en líneas de transmisión de 138 kV y 230 kV. Para ello se utilizaron muestras de ceniza de los volcanes Cotopaxi y Tungurahua. Se determinó los niveles críticos de acumulación de ceniza volcánica sobre la superficie de los aisladores, con los cuales se tendría un alto riesgo de falla. Se planteó también una metodología para desarrollar pruebas experimentales en un laboratorio de alto voltaje, en base a normas y procedimientos para pruebas en aisladores externos con contaminación. Se implementó un sistema de medición y monitoreo de parámetros eléctricos, que juntamente con la metodología propuesta para el desarrollo experimental, permite llegar a obtener los resultados [8]

En Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador, se desarrolló una investigación con el fin de mejorar los parámetros de fábrica de los aisladores de porcelana, usando un recubrimiento superficial para proteger de la contaminación a los aisladores, para evitar las corrientes de fuga que pueden ocasionar fallas. Se utilizó pintura siliconada tipo RTV (Vulcanización a Temperatura Ambiente), para formar una capa de hule de silicón, de gran capacidad hidrofóbica, La investigación concluye en que la corriente de fuga en los aisladores pintados fue menor a la de los aisladores sin pintar [9].

En el Perú, la gran diversidad climática, obliga a que las compañías fabricantes de aisladores mejoren sus procesos, con este fin se han hecho una variedad de pruebas, logrando conocer que: la porosidad residual de los aisladores es proporcional al protocolo de formulación y elaboración, pudiéndose determinar los factores relevantes para mejorar los resultados; existen además diversidad de ventajas y desventajas proporcionadas por el material base de la construcción, por ejemplo: la resina (silicona), posee una alta resistencia a los rayos UV, de bajo peso y casi nula absorción de agua. La cerámica en cambio se comporta mejor ante variaciones fuertes

de condiciones climáticas, y una nueva tendencia es el material compuesto (cerámica - resina), que combina las ventajas de los dos materiales. Si bien es cierto se ha apuntado que las porosidades afectan las propiedades cerámicas de los materiales, la adición de ciertos óxidos (SiO2, MgO y Al2O3) ayudan a cubrir las porosidades, nuevas formulaciones (arcilla, cuarzo, feldespato y alúmina) y procesos (moldeo, secado, calcinación, esmaltado y tratamiento térmico final) mejoran el producto final [10].

En áreas tropicales de varios continentes, se ha reportado como problema de aisladores eléctricos la contaminación biológica, reduciendo notablemente la confiabilidad de sistemas eléctricos de potencia. En un estudio llevado a cabo en Colombia, se realizó la biocontaminación de aisladores durante 50 días en un ambiente controlado, para luego ser sometidos a pruebas de tensión de flameo y corrientes de fuga; viéndose una apreciable reducción en la tensión de flameo (del 21% al 8%) y un aumento en la corriente de fuga del 20% o superiores [11].

En Colombia se llevó a cabo una investigación, para determinar el nivel de afectación que sufren los aisladores en condiciones de alta humedad y radiación solar. Puntualmente se estudió como la Chlorella vulgaris (alga verde unicelular) afecta el desempeño del aislador en sistemas eléctricos de potencia. El crecimiento del alga sobre el aislador fue realizado en una cámara de ambiente controlado, para posteriormente evaluar su trabajo, mediante pruebas de tensión de flameo y medición de corrientes de fuga. Concluyendo en que los aisladores de porcelana sufrieron una reducción de hasta el 11% de la tensión de flameo, mientras que los de polímero tan solo un 3%; en todos los casos la corriente de fuga se incrementó más del 17% [12].

En Colombia se estudiaron las emisiones acústicas de los aisladores eléctricos, esto con el fin de determinar el nivel de contaminación; es decir que la investigación se basó en como aprovecha la emisión de ruido, que se produce en las emisiones de energía provocadas durante las descargas parciales sobre el aislador. El objetivo del trabajo fue caracterizar las emisiones acústicas y posteriormente desarrollar un breve sistema de pronóstico. El trabajo concluyó en que la corriente de fuga en un aislador

se halla directamente relacionada a la humedad y velocidad del viento; el pronóstico de la corriente de fuga se basó en un modelo de regresión [13].

En Bogotá, Colombia, se pretendió determinar el efecto sobre el desempeño de los aisladores dieléctricos, ocasionado por microorganismos (Aspergillus Niger, Phanerochaete Chrysosporium y Chlorella Vulgaris), partiendo de un análisis de propiedades eléctricas en aisladores nuevos y sin contaminantes, para posteriormente realizar pruebas en elementos biológicamente contaminados. Finalmente se determinó que los valores de voltaje de flameo a baja frecuencia se reducen aproximadamente un 5% en condiciones secas, y 8% en condiciones de humedad [14].

En Chile, considerando los efectos de la contaminación en los aisladores de la línea de 220kV Cóndores – Parinacota, se propone un plan de mantenimiento basado en inspección y lavado, el diseño del plan se realizó en función de los datos históricos de "Transelec" [15].

En Bucaramanga, Colombia, se planea combatir la contaminación de los aisladores eléctricos con una guía para la ejecución de limpiezas, el objetivo es realizar un trabajo seguro, a bajo costo, eficiente, con personal certificado. El método de limpieza varía de acuerdo al contaminante presente, nivel de tensión, tipo de aislamiento, fuerza y dirección del viento [16]

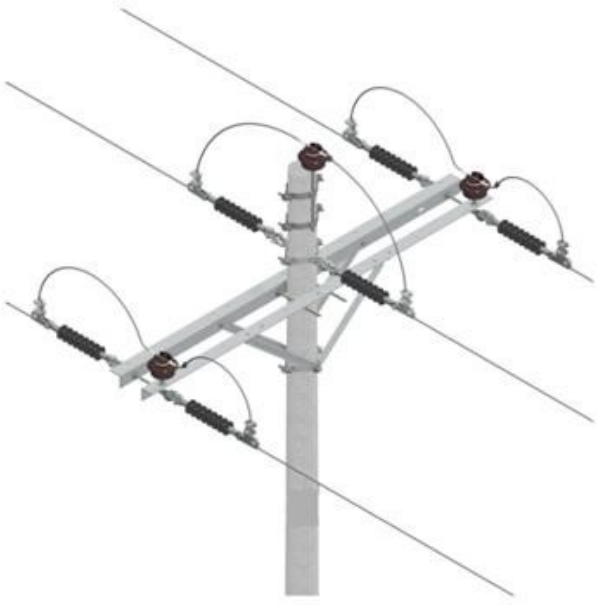
Fundamentación Teórica. – La presente investigación busca realizar un modelo matemático en MATLAB, para verificar la ruptura de la rigidez dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio, utilizados en redes de distribución de energía eléctrica, realizando pruebas en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, para determinar su comportamiento sometidos a diferentes entornos de contaminación, "Las redes de distribución eléctrica son una parte importante de los sistemas eléctricos de potencia, utilizadas para distribuir energía eléctrica a los usuarios finales " [17]

En la actualidad la electricidad es la principal fuente de energía utilizada por las personas, y para las empresas distribuidoras en el ecuador, mantener la calidad de servicio, en cuanto a cortes de energía se refiere, es un indicador importante ante los entes de regulación del país como así lo estipula la regulación CONELEC 004/01.

“Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos. Aproximadamente las 2/3 partes de la inversión total del sistema de potencia, están dedicados a la parte de distribución (Gigante Invisible), lo que implica necesariamente un trabajo cuidadoso en el planeamiento, diseño y construcción y en la operación del sistema de distribución, lo que requiere manejar una información voluminosa y tomar numerosas decisiones, lo cual es una tarea compleja pero de gran trascendencia.” [18]

“Las redes de distribución de energía eléctrica aéreas usan también estructuras para soportar los conductores, solo que por el nivel de tensión inferior al de transmisión, son de menor altura, usan claros más cortos y eventualmente se pueden usar también como soporte de otros sistemas, por ejemplo: internet , cable de televisión” [19].Como se puede observar en la figura 1, los postes, crucetas, aisladores y conductores son la parte estructural mecánica que conforma una red de distribución.

Figura 1. Estructura de distribución MEER



Fuente. [20]

"En una infraestructura eléctrica de alta tensión, los aisladores son los elementos que cumplen la función de sujetar mecánicamente a los conductores que forman parte de la línea, manteniéndolos aislados de tierra y de otros conductores. Los aisladores deben soportar la carga mecánica que el conductor transmite al apoyo a través de ellos. Estos deben aislar eléctricamente los conductores de los apoyos, soportando la tensión en condiciones normales y anormales y sobretensiones hasta las máximas previstas que los estudios de coordinación del aislamiento definen con cierta probabilidad de ocurrencia. La tensión debe ser soportada tanto por el material aislante propiamente dicho como por su superficie y por el aire que rodea al aislador." [21]

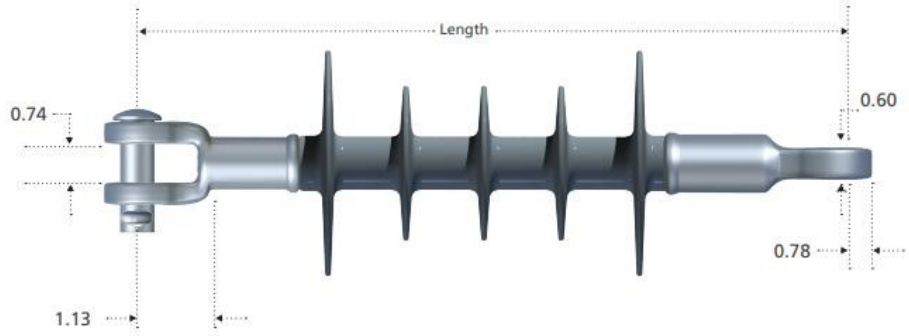
1.1 Aisladores

Poseen un núcleo generalmente de fibra de vidrio reforzado con resina, que soporta la carga mecánica, a este se conectan elementos de anclaje; además posee elementos aislantes para soportar la diferencia de potencial entre los extremos del aislador (weathersheds o campanas), y se fabrican para:

De postes. - Diseñado para soportar cargas de tensión, flexión y compresión, comúnmente usado en líneas horizontales de postes.

De suspensión. - Diseñado para soportar mayormente cargas de tensión en instalaciones tangenciales, finales de líneas, e instalación de cadena en V.

Figura 2. Aislador Hubbell *[22]*



Fuente. [22]

Partes del aislador

El aislador está formado por:

Núcleo. - Transmite los esfuerzos mecánicos y proporciona aislamiento dieléctrico, resistente al ataque acido e hidrolisis.

Recubrimiento del núcleo. - Una sola pieza de goma de silicona, de alta resistencia a factores ambientales, libre de imperfecciones.

Campanas aislantes. - Moldeadas bajo presión y firmemente unidas a la cubierta del núcleo, suaves y libres de imperfecciones, resistentes a la contaminación, con buena resistencia al tracking, la erosión, temperaturas extremas y radiación ultravioleta.

Acoples metálicos de los aisladores. - Transmiten los esfuerzos mecánicos del conductor de extremo a extremo, de acero forjado y galvanizado en caliente, conectados al núcleo por múltiple compresión radial o por un sistema de relleno o sección cónica.

Herrajes y grapas. - Provistos para la sujeción del cable conductor, generalmente de aluminio forjado [23]

1.2 Material del aislador

Es aquel material de la superficie expuesta de los aisladores, es un vitrificado de tipo compresión duro, liso, brillante e impermeable la humedad, que permite por medio de lavado natural (lluvia), mantenerse libre de contaminantes. La superficie total del aislador a excepción de la superficie de quema debe estar esmaltada y libre de imperfecciones; las características requeridas del material deben ser:

Alta resistencia dieléctrica.

Elevada resistencia mecánica.

Químicamente inerte.

De diseño aerodinámico para facilitar la limpieza.

Elevado punto de fusión.

Si se usa vidrio, el vidrio debe ser templado o recocido, de tipo Sodio - Calcio, homogéneo e incoloro. [23]

Históricamente, los materiales más utilizados han sido la porcelana y el vidrio. Sin embargo, en la década de los 80 comenzó la instalación en número significativo de aisladores compuestos. Las características básicas que ha de cumplir un material para poder ser empleado como aislador en infraestructuras de alta tensión son una resistividad alta y una gran resistencia mecánica. [21]

1.2.2 Aisladores de porcelana

La porcelana es un material especialmente resistente a compresión, por lo que a lo largo de los años de empleo de este se han desarrollado especialmente diseños que tienden a solicitarlo a compresión. En algunos países europeos como Alemania y Austria sigue siendo el material más empleado en la fabricación de aisladores para líneas eléctricas aéreas. [21]

1.2.3 Aisladores de vidrio

Se trata de un material de elevada dureza, resistencia mecánica y estabilidad antes cambios de temperatura. Su coste inferior a la porcelana, hace que se emplee de forma más habitual en países como España o Francia [21]

1.2.4 Aisladores compuestos

La sustitución de aisladores de vidrio y cerámicos en líneas por aisladores compuestos (de vidrio y cerámica), se ha mostrado como una solución eficaz técnica y económicamente para solucionar los problemas de disponibilidad ocasionados por la contaminación del aislamiento. [21]

Los aisladores son la única barrera que existe entre las líneas eléctricas y el contacto a tierra, por eso la calidad y la garantía en estos materiales es sustancial.

1.3 Intercambiabilidad de Aisladores

Cuando se decide reemplazar dos aisladores de materiales distintos, las características no serán las mismas, fundamentalmente cambiar el comportamiento del aislador ante ambientes húmedos y contaminados; los materiales compuestos destacan ante el resto de materiales [23]

1.4 Mantenimiento de Aisladores

Se recomienda una limpieza en seco (aire procesado) y algún material abrasivo, tal actividad puede ser realizada en sistemas energizados o desenergizados, se permite también la limpieza con pequeñas cantidades de agua a baja presión. La regla general es consultar al fabricante sobre los métodos óptimos de limpieza [23]

1.5 Contaminación

El nivel de desempeño de los aisladores ante contaminantes depende del material de construcción, y aunque los aisladores compuestos han demostrado tener un mejor comportamiento, este depende del tiempo y su nivel de degradación. Son nocivos depósitos de cementito, fosfatos, limo y además factores climáticos contribuyen con ´ fenómenos tales como [16]

Hielo. - Se conoce que una cantidad suficiente de aisladores puede prevenir cortocircuitos.

Temperaturas extremas. - Los elementos generalmente se fabrican para soportar un rango de temperatura que va desde -50 a 50 °C.

Daño por arco eléctrico. - Ocurre cuando una corriente de falla atraviesa el aislador, generando altas temperaturas y erosión.

Fracturas. - Ruptura de la capa superficial de profundidad mayor a 0.1mm.

Hidrolisis. - Reacción química entre iones de agua y material polímero, dando como resultado la degradación del material aislante.

Erosión. - Perdida de material efecto de corrientes de fuga.

Tracking. - Degradación irreversible de la superficie del aislador por la acumulación de partículas conductoras carbonizadas.

Treeing. - Degradación interna irreversible por la formación de filamentos generalmente conductivos.

Chalking. - Degradación de la superficie del aislador debido a la radiación ultravioleta. [16]

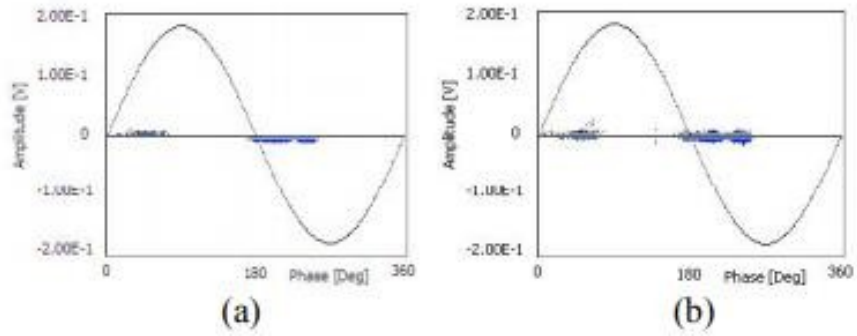
1.6 Rigidez dieléctrica

Los campos eléctricos de pequeño módulo polarizan los dieléctricos. O sea, orientan sus moléculas sin arrancar electrones de sus átomos. No producen, por tanto, corrientes de conducción en el dieléctrico, salvo las que puedan deberse a los pocos electrones libres que pueda haber. Pero, si aumenta el módulo del campo eléctrico, puede llegar a arrancar electrones ligados y, por tanto, a ionizar las moléculas del dieléctrico. Entonces el dieléctrico se hace conductor debido a los electrones que el campo ha arrancado, que pasan a ser libres, la corriente crece bruscamente y suele dañar al dieléctrico por elevación de su temperatura. Esa corriente se llama corriente disruptiva. El mayor valor del campo eléctrico que no produce este incremento brusco de corriente es la rigidez dieléctrica. Por eso una definición práctica de rigidez dieléctrica puede ser máximo campo eléctrico que puede soportar un dieléctrico sin perder sus propiedades aislantes. [24]

1.7 Descargas Parciales

Se conoce como descarga parcial al fenómeno físico de emisión de cargas eléctricas, conocidas como corrientes de fuga, sobre materiales aislantes sean estos sólidos, líquidos o gaseosos. Usualmente contribuye a la degradación del aislante (erosión y daño químico), en casos extremos pueden terminar en cortocircuitos, dependiendo de la resistencia de la superficie del aislador [25]. Actualmente se conoce que la corriente de fuga de un aislador para uso en exteriores, provee información sobre el nivel de contaminación del elemento, por ejemplo: en las gráficas se indica el comportamiento de una descarga parcial en un aislador de silicón probado con 11kVrms, cuya superficie no tiene contaminantes, el caso (a) tiene una humedad relativa del 30 al 40 %, mientras que en el caso (b), la humedad relativa es del 98% y no existen cambios significativos [26].

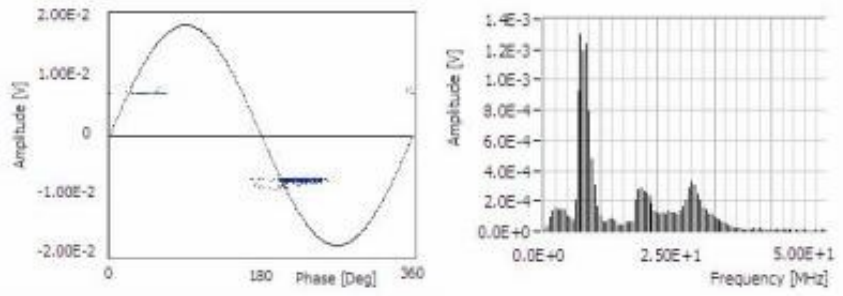
Figura 3. Descarga parcial: (a) Sin contaminantes y con una humedad relativa del 30 al 40 %, (b) Sin contaminantes y con una humedad relativa del 98 %.



Fuente: [26]

Posteriormente se han evaluado los niveles de descarga parcial, bajo distintos grados de concentración de contaminantes en ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) en mg/cm2. Si el nivel de contaminación sube a 0.12 ESDD, en la superficie seca del aislador el resultado obtenido es similar al anterior

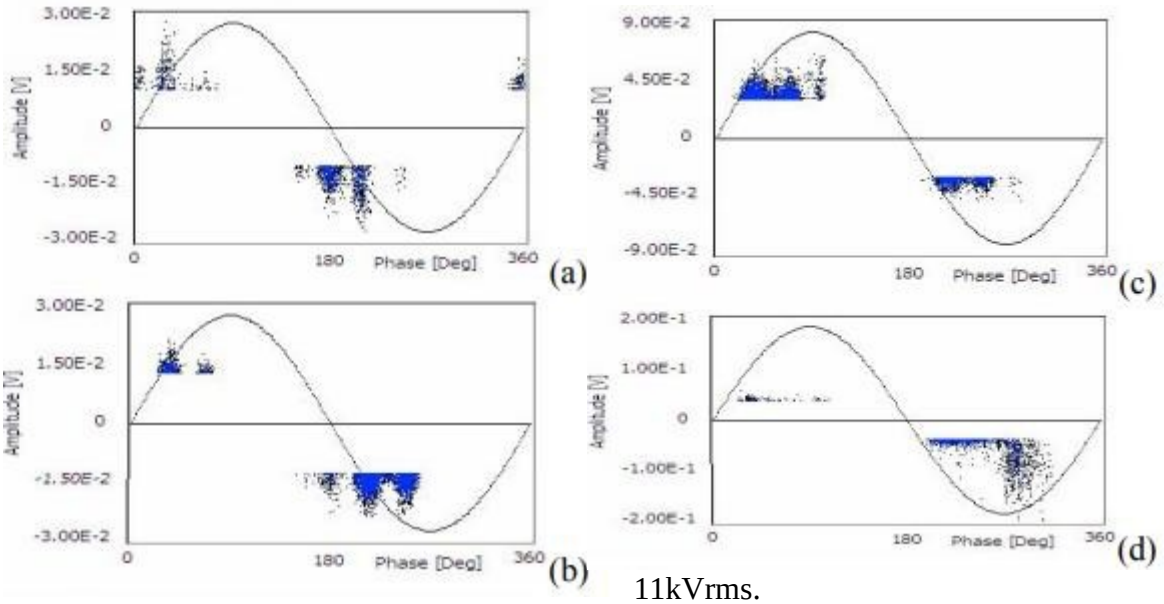
Figura 4. Patrón de descarga parcial con el 0.12 de ESDD y V = 11kVrms.



Fuente: [26]

Si el nivel de contaminación de 0.08ESSD se combina con elevados niveles de humedad se observan cambios en el patrón obtenido de descarga parcial [26] : Ahora se han modificado los niveles de contaminación en ESDD y la humedad relativa se mantiene constante y sobre el 98 % [26].

Figura 5. Patron de descarga parcial con el 0.08 ESSD y (a) 60% HR, (b) 70% HR, (c) 80% HR, (d) 90% HR y V =



11kVrms.

Fuente: [26]

1.8 Comportamiento de un material aislante ante la incidencia de un campo eléctrico

En teoría, un material aislante no debería dejar conducir la corriente eléctrica. En la práctica, existe una pequeña corriente que circula por el material aislante que posee los siguientes componentes:

Corriente de Fuga Superficial

Corriente de Absorción Dieléctrica

Corriente de Descarga Parcial

Corriente Capacitiva de Carga Corriente de Fuga Volumétrica

1.8.2 Corriente de Fuga Superficial

Es aquella que aparece como consecuencia de la conducción existente en la superficie del aislamiento. Esta corriente circula por varios factores entre los que podemos

mencionar: La contaminación y la humedad acumulada en la superficie del material a través del cual pasa el campo eléctrico.

1.8.3 Corriente de Absorción Dieléctrica

Corriente que aparece como consecuencia del proceso de polarización del material aislante (Orientación de cargas en el sentido del campo eléctrico), este fenómeno disminuye a medida que culmina el desplazamiento interno de cargas. La corriente de absorción dieléctrica viene dada por:

$$ia = VxCxDxT - n$$

Dónde:

ia: Corriente de Absorción dieléctrica

V: Voltaje de Prueba en Kilovoltios

C: Capacitancia del equipo bajo prueba, en microfaradios

D: Constante de Proporcionalidad

T: Tiempo en Segundos

n: Constante

1.8.4 Corriente de Descarga Parcial

También es conocida como la corriente por efecto corona o efecto punta. Estas típicamente se producen por tensiones eléctricas que aparecen alrededor de las puntas o esquinas del material conductor, sometido a un voltaje alto. También, pueden ser causadas por partículas conductoras/semiconductoras suspendidas en el dieléctrico que separan dos electrodos a diferentes potenciales.

1.8.5 Corriente Capacitiva de Carga

Corriente que aparece como consecuencia de la carga del capacitor que intrínsecamente se forma por el aislamiento que separa las partes energizadas entre si y entre las partes energizadas y la carcasa dentro del equipo eléctrico, esta corriente se incrementa a medida que se incrementa el voltaje DC y puede ser calculada según:

$$ig = \ Exe - \ t \ rc \quad R$$

Dónde:

ig: Corriente de Carga Capacitiva

E: Voltaje en Kilovoltios

R: Resistencia en Megaohmios

C: Capacitancia en microfaradios

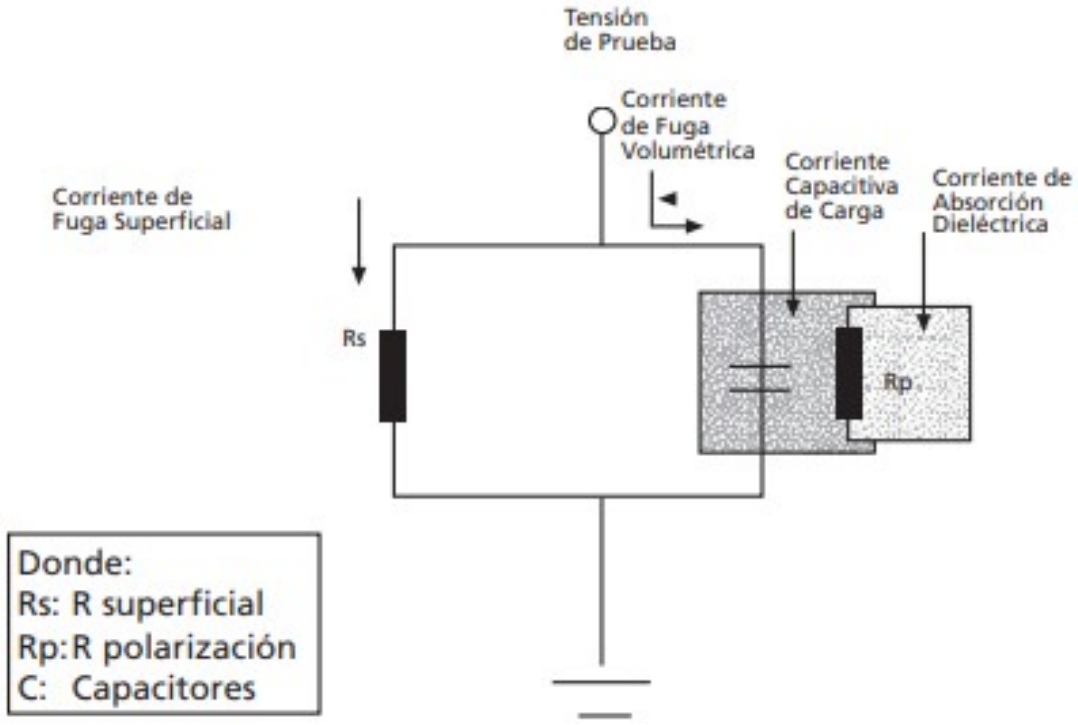
t: Tiempo en Segundos

La corriente de carga capacitiva es función del tiempo y decrece a medida que este transcurre, es decir, esta corriente posee valores iniciales muy altos que disminuyen a medida que transcurre el tiempo y el aislamiento se ha cargado al voltaje pleno.

1.8.6 Corriente de Fuga Volumétrica

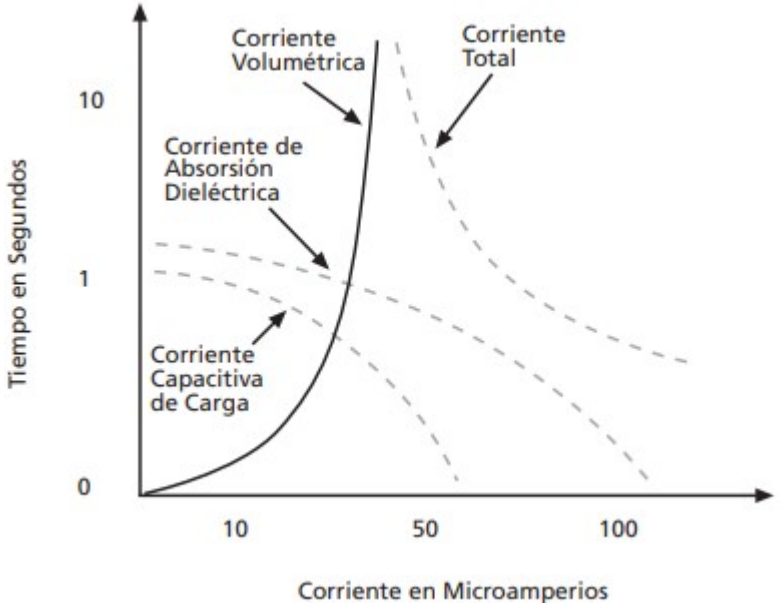
Es la corriente que fluye a través del volumen del material y es la corriente que se utiliza para evaluar las condiciones de aislamiento bajo prueba. Se requiere que la inyección de voltaje se realice por un tiempo determinado para poder medir el valor de esta corriente. [27]

Figura 6. Corrientes en un Dieléctrico ante un Campo Eléctrico DC



Fuente: [27]

Figura 7. Corrientes de Fuga bajo un Campo Eléctrico DC



Fuente: [27]

1.9 Sobretensiones

Una sobretensión es una situación en donde la tensión es superior a la tensión nominal del sistema, las sobretensiones afectan el aislamiento de equipos e instalaciones, provocando fallos inesperados, las sobretensiones se originan debido a fallas, maniobras o descargas atmosféricas, una conveniente selección de aisladores permite proteger los equipos eléctricos, e impide la avería de los dispositivos de protección. [28]

1.9.2 Clases de sobretensiones:

De acuerdo al origen:

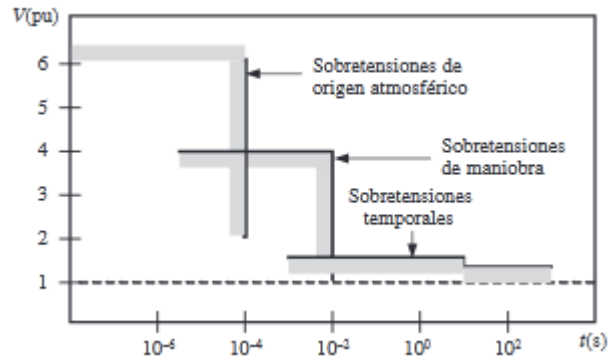
Atmosféricas (de frente rápido). - Son de origen externo a la red, y hacen referencia al impacto de un rayo, de duración muy corta y de amplitud muy superior a la tensión de cresta nominal [28].

Temporales. – De larga duración (desde milisegundos hasta segundos), cuya frecuencia es igual o próxima a la frecuencia de operación [28].

De maniobra (de frente lento). – Se originan al interior del sistema, ocasionadas por la apertura o cierre de interruptores o seccionadores, tiene un acorta duración y su frecuencia varía desde 2 a 20 kHz [28].

Sobretensiones de frente muy rápido. – Originadas en subestaciones de SF6, su duración es de microsegundos y su frecuencia superior a 1MHz [28].

Figura 8. Sobretensiones.

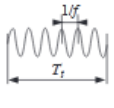
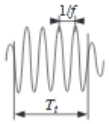
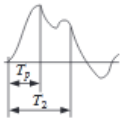
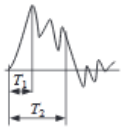
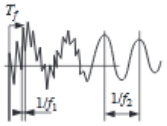
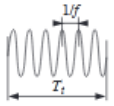
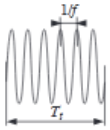
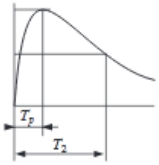
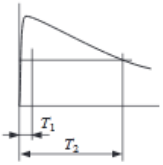


Fuente: [28].

Las sobretensiones también han sido clasificadas por la forma de la onda y la duración, y pueden ser:

1. Sobretensiones de baja frecuencia. – De larga duración y de frecuencia aproximada a la de operación [28]. se subdivide en:
    a. Tensión permanente a frecuencia industrial.
    b. Sobretensión temporal.
2. Sobretensión transitoria. – De corta duración (algunos milisegundos), puede ser oscilatoria o unidireccional [28].se subdividen en:
    a. Sobretensiones de frente lento. – Oscilatoria, con tiempo de subida entre 20 y 5000 µs, y tiempo de cola de 20 ms.
    b. Sobretensión de frente rápido. – Unidireccional, con tiempo de subida entre 0.1 y 20 µs y tiempo de cola inferior a 300 µs.
    c. Sobretensiones de frente muy rápido. – Oscilatoria, con un tiempo de subida inferior a 0.1 µs, una duración total inferior a 3 ms y oscilaciones comprendidas entre 30 kHz y 100MHz.

Figura 9. Tipos de ondas normalizadas.

TIPO	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gamas de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50$ Hz o 60 Hz $T_t \geq 3.600$ s	10 Hz $< f <$ 500 Hz 0,02 s $\leq T_t \leq$ 3.600 s	20 µs $< T_p \leq$ 5.000 µs $T_2 \leq$ 20 ms	0,1 µs $< T_1 \leq$ 20 µs $T_2 \leq$ 300 µs	$T_f \leq$ 100 ns 0,3 MHz $< f_1 <$ 100 MHz 30 kHz $< f_2 <$ 300 kHz
Formas de onda de tensión normalizada					*)
	$f = 50$ Hz o 60 Hz T_t *)	48 Hz $\leq f \leq$ 62 Hz $T_t = 60$ s	$T_p = 250$ µs $T_2 = 2.500$ µs	$T_1 = 1{,}2$ µs $T_2 = 50$ µs	
Ensayo de tensión soportada normalizada	*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	*)

*) A especificar por el comité de producto concerniente.

Fuente: [28].

1.10 Medios para limitar sobretensiones

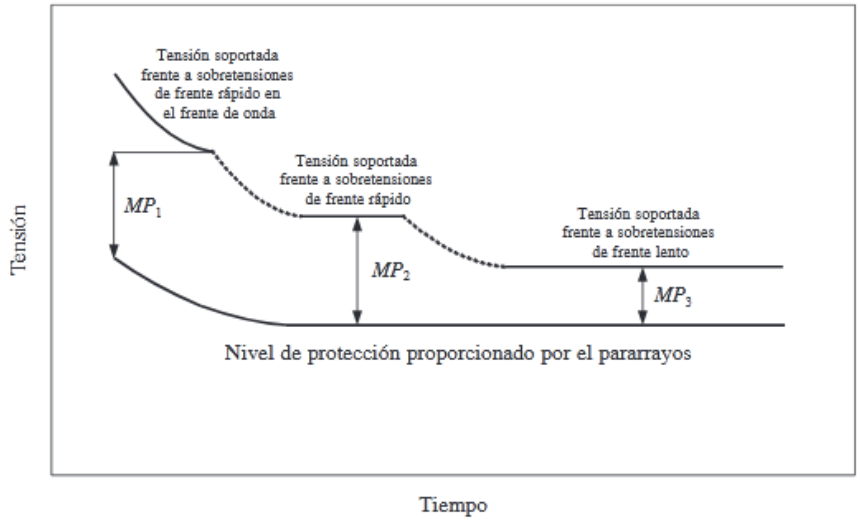
El dispositivo usual para limitar sobretensiones de cualquier origen (interno, externo) es el pararrayos de óxido metálico, este se comporta como una resistencia no lineal, cuyo valor entre bornes tiende a ser infinito cuando el valor de tensión en la red es menor al valor residual, pero disminuye drásticamente si el valor de sobretensión en la red supera el valor residual. Los pararrayos se instalan entonces para limitar sobretensiones de frente lento o rápido, y su selección se realiza en función del nivel máximo de tensión en régimen permanente y la sobretensión temporal representativa, caracterizada por su valor máximo y tiempo de duración; para la selección se toma en cuenta el margen de protección [28]:

$$MP = \frac{U_w - U_p}{U_p} \times 100$$

De tal manera que el Mp es el margen de seguridad, Up tensión soportada por el pararrayos, y Uw, la tensión soportada por el aislamiento, como regla cada MP será distinto para cada sobretensión: Mp para sobretensiones de frente lento mayor que

15%, Mp para sobretensiones de maniobra mayor que 20%, y superior el Mp para sobretensiones de rápido [28].

Figura 10. Tipos de ondas normalizadas.



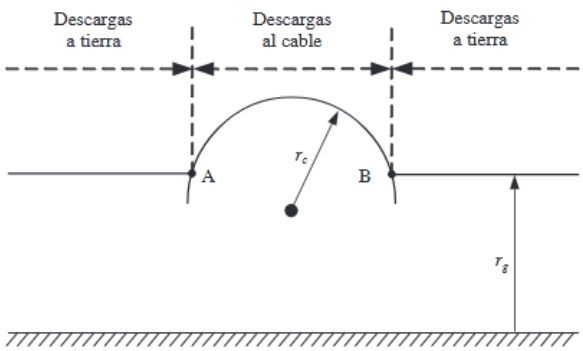
Fuente: [28].

1.11 Medios para evitar sobretensiones

Los medios dependen del tipo de sobretensión:

1. Sobretensiones de maniobra pueden ser evitadas con interruptores de cierre sincronizado, el objetivo es producir el cierre cuando la tensión de la fuente es nula o cercana a cero.
2. Sobretensiones de origen atmosférico pueden ser evitadas con apantallamientos diseñadas con modelos electrogeométricos (asociación de sistemas con un radio de atracción para descargas atmosféricas, y este valor depende del valor máximo de corriente de la cresta de descarga).
3. Puesta a tierra limitan sobretensiones, además de cumplir con otras funciones importantes.

Figura 11. Aplicación del modelo electrogeométrico.



Fuente: [28].

1.12 Efectos que causan sobretensiones

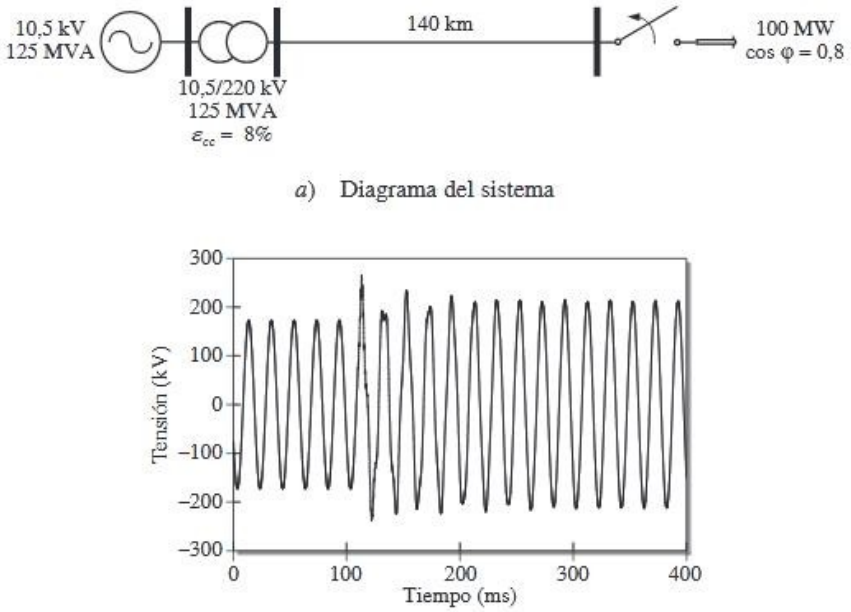
1.12.2 Pérdidas de Carga.

Se produce por el disparo de interruptores y causa un aumento en la tensión de las líneas debido a la disminución de la impedancia de las cargas retiradas, estas sobretensiones son especialmente importantes en líneas largas, esto debido al efecto Ferranti.

1.12.3 Conexión y reenganche de líneas

La tensión en el en terminal del interruptor sigue a la tensión de la fuente, mientras que la tensión en el lado desconectado oscila a una frecuencia más elevada, los métodos usuales para controlar este tipo de efectos consisten en el uso de resistencias de preincersión o varistores que limiten los valores de sobretensión.

Figura 12. Sobretensión por pérdida de carga.

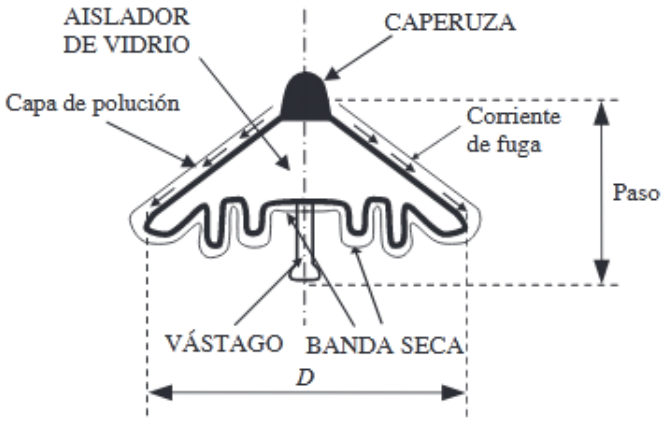


Fuente: [28].

1.12.4 Superficies aislantes expuestas.

Común en aislantes sólidos, en donde el elemento queda expuesto a las condiciones ambientales que envejecen de manera progresiva el aislante. El efecto de la lluvia en los aislamientos externos es la reducción de la tensión de descarga, esto debido al mecanismo de descarga superficial.

Figura 13. Proceso de descarga eléctrica en aisladores.



Fuente: [28].

Las superficies de aisladores en servicio se cubren de varias capas de materiales contaminantes, esta capa resulta conductora si contiene agua (condensación de la humedad ambiental) y sal o partículas provenientes de humos o polvos, el espesor de esta capa de polución determinará el nivel de recalentamiento del aislador pues a menor espesor mayor densidad de corriente y por ende temperatura, pudiendo producir bandas secas.

1.13 Hi-Pot

La prueba de Hi-Pot DC tiene como objeto verificar la rigidez dieléctrica de un material aislante. La rigidez dieléctrica de un material aislante se define como el máximo gradiente de potencial que un material puede soportar sin que exista perforación o canales de conducción en el mismo. Esta es calculada a partir de los voltajes de ruptura y del espesor del aislante en el punto de ruptura o en un punto cercano a él.

La rigidez dieléctrica se expresa normalmente en términos de gradiente de voltaje en unidades tales como voltios por milímetros o Kilovoltios por centímetros. La rigidez dieléctrica de un sistema aislante determina el nivel de voltaje al cual el equipo puede operar. También determina cuanto sobrevoltaje continuo o instantáneo puede soportar. [27]

Figura 14. Hi-Pot Huazheng

Fuente. [29]

Los equipos para ejecutar la prueba de Hi-Pot DC deben tener la capacidad de variar el voltaje continuamente, desde cero hasta el valor requerido, midiendo la corriente que circula por el aislamiento. El micro amperímetro debe tener el número suficiente de rangos y la sensibilidad que permita tomar lecturas desde varios microamperios hasta algunos miliamperios. Dos tipos de pruebas son posibles de implantar utilizando Alto potencial en DC; (Hi-Pot DC).

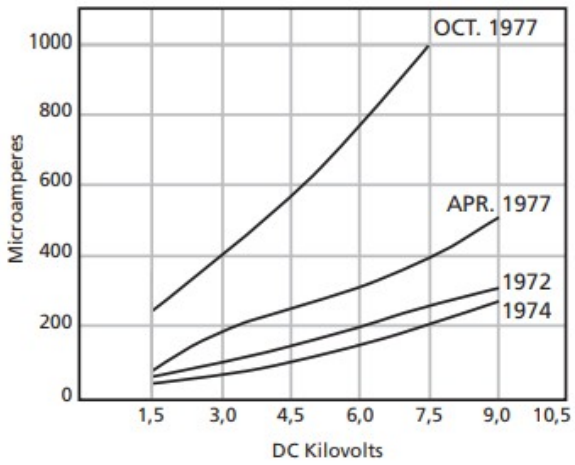
1.14 Prueba de Absorción Dieléctrica

Se incrementa gradualmente el valor de voltaje hasta alcanzar el valor deseado en un período que puede estar entre 60 y 90 segundos. Una vez alcanzado el nivel requerido, debe mantenerse por 5 minutos, tomando lecturas de corriente cada minuto.

1.15 Prueba de Voltaje por Pasos

En este caso, el máximo voltaje se alcanza incrementando el mismo en varias etapas (Usualmente no menos de ocho), en cada etapa el voltaje debe mantenerse por un tiempo determinado, el mismo para todas las etapas, este tiempo debe estar comprendido entre 5 y 15 minutos. Al final de cada etapa o al alcanzar la corriente un valor estable, se registra el valor de la corriente. Cada vez que se alcanza una nueva etapa de voltaje, el valor de la corriente de fuga se incrementará temporalmente.

Figura 15. Prueba de voltaje por pasos



Fuente: [27]

En caso de percibir un incremento súbito de la corriente, transitorio, la prueba deberá ser abortada para evitar daños en el equipo. El resultado de la prueba es una curva Voltaje vs Corriente se debe comparar con otros registros tomados previamente, tal y como se observa

Es importante tomar la temperatura ambiente en el momento de efectuar la prueba, de igual forma se recomienda hacer la prueba de lectura puntual y la de absorción dieléctrica antes de la prueba de voltaje por pasos. Al culminar la prueba, el equipo bajo prueba debe ser descargado utilizando una pértiga aislante cuyo terminal posee una conexión a una tierra efectiva [27]

1.16 Modelación matemática

La modelación es un proceso que establece una relación entre una idea matemática y una situación real [29]. Existen tres tipos de modelos:

Modelo fenomenológico. - Obtenido mediante un estudio teórico del proceso, cuyos principios de formulación son leyes generales, el nivel de complejidad depende del nivel de detalle [30].

Modelo empírico. - Construido mediante experimentación y observación [30].

Modelo semifísico. - Resulta de la combinación de los modelos anteriores, y se usa cuando el conocimiento del fenómeno modelado es insuficiente para describir la situación física [30].

Fundamentación metodológica

Enfoque.- El presente trabajo tiene un enfoque cualitativo, pues trata de desarrollar un modelo matemático que exprese el comportamiento de un aislador en función del tipo de contaminante y nivel de contaminación.

Tipo de investigación.- Es una investigación de tipo analítica que busca la asociación o correlación entre variables y establecer relaciones causales.

Técnica de recolección de información.- Mediciones a partir de pruebas de campo

1.17 Conclusiones Capítulo I

Se estudiaron un gran número de trabajos similares, que demuestran la relación entre el nivel de contaminación y aparición de fallas en aisladores en los sistemas de distribución.

Se pudo adquirir un número sustentable de artículos y libros que abarcan el problema en los aisladores en redes de distribución.

2 CAPÍTULO II. PROPUESTA.

2.1 Título del proyecto.

Desarrollo de un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica en aisladores de porcelana, polímero y vidrio a un nivel de 13.8 kV.

2.2 Objetivo del proyecto.

Desarrollar un modelo matemático en MATLAB para el análisis de la ruptura dieléctrica de aisladores de porcelana, polímero y vidrio a nivel de 13.8 kV, con base en las pruebas de laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.3 Descripción de la propuesta.

Conociendo que la combinación de la contaminación atmosférica y la humedad, son la causa del mayor problema en las líneas de transmisión y distribución, ya que desencadenan en la disrupción dieléctrica de los aisladores [31]. Se pretende desarrollar un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de un aislador en distintas condiciones de contaminación ambiental, para el desarrollo de las pruebas en los aisladores, se tomaran en cuenta la recomendación para Prueba de contorneo a baja frecuencia en seco de la norma ANSI.

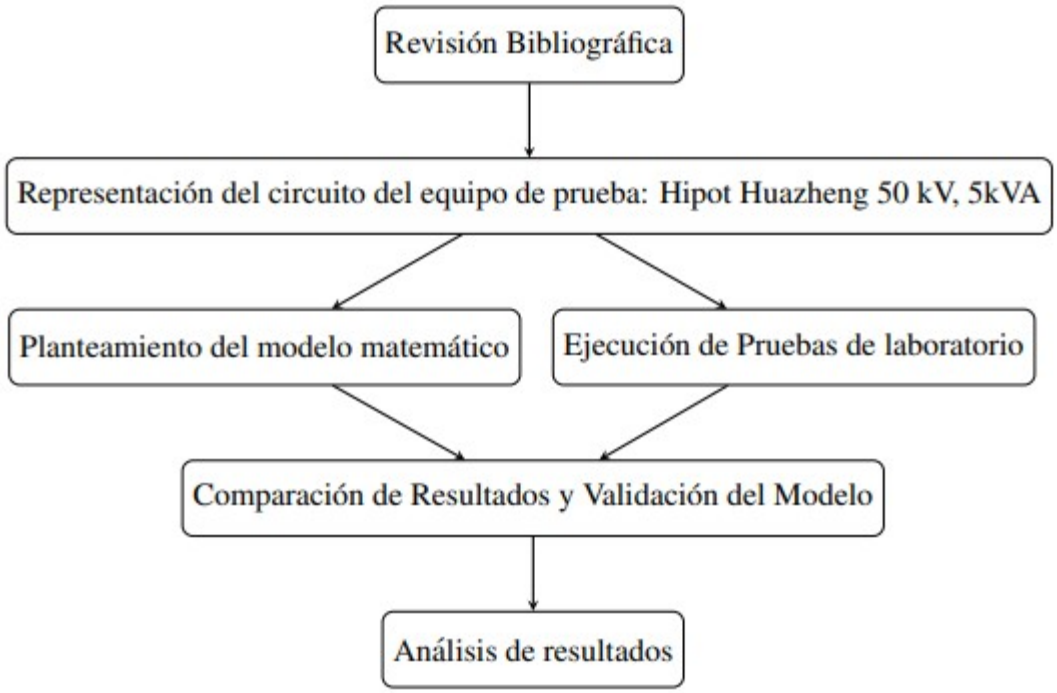
Prueba de contorneo a baja frecuencia en seco. Tres aisladores deben ser seleccionados al azar, los aisladores deben soportar al menos el 95% en promedio, del voltaje indicado en el Anexo 1 (Dimensiones y Características de los Aisladores). Los aisladores deben estar completamente limpios y secos, además con sus herrajes. La tensión aplicada inicialmente se incrementará rápidamente al 75% de la tensión de flameo, y paulatinamente en lo posterior. El flameo no debe ser menor a 5 segundos, ni mayor a 30 segundos [32].

Prueba de contorneo a baja frecuencia en húmedo. Tres aisladores deben ser seleccionados al azar, los aisladores deben soportar al menos el 90% en promedio, del voltaje indicado en el Anexo 1 (Dimensiones y Características de los Aisladores). El aislador debe bañarse con gotas de agua de resistividad y temperatura establecida (ANSI/IEEE4-1978). La tensión aplicada inicialmente se incrementará rápidamente al

75% de la tensión de flameo, y paulatinamente en lo posterior. El flameo no debe ser menor a 5 segundos, ni mayor a 30 segundos [32].

Prueba de voltaje crítico tipo impulso positivo. Tres aisladores deben ser seleccionados al azar, los aislador deben soportar al menos el 92% en promedio, del voltaje indicado en el Anexo 1 (Dimensiones y Características de los Aisladores) [32].

2.4 Metodología o procedimientos empleados para el cumplimiento de los objetivos planteados



En la figura se detalla la metodología utilizada para desarrollar el modelo matemático que servirá para describir el proceso de ruptura dieléctrica en aisladores de 13.8kV.

En un principio se contempla la revisión bibliográfica relacionada a la ruptura dieléctrica, con esta antesala se busca la representación del equipo de prueba utilizado a través de un diagrama eléctrico, para plantear las ecuaciones diferenciales que representan el modelo matemático y que posteriormente será validado con los resultados de las pruebas de laboratorio.

2.5 Métodos de prueba

2.5.2 Método Bibliográfico

El trabajo inicia con la recolección de información. Para determinar el impacto que generan los contaminantes y ambientes en la ruptura dieléctricas y las corrientes de fuga, que se producen y forman un flashover.

2.5.3 Método Deductivo

Con este método se pretende diseñar el modelo matemático computacional, con ayuda del software MATLAB, así también se busca verificar las principales variables que afectan al aislador en distintas condiciones de contaminación.

2.6 Conclusiones Capítulo II

A través de este capítulo se ha logrado determinar el modo para hallar el modelo matemático que describa la ruptura dieléctrica en aisladores de 13.8kV. La investigación inicia con la revisión bibliográfica, continua con la representación del diagrama eléctrico de la prueba de laboratorio, la determinación de las ecuaciones diferenciales y la resolución de las mismas por medios computacionales, para la posterior validación del modelo con los resultados de las pruebas de laboratorio.

3 CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

3.1 Análisis de los resultados

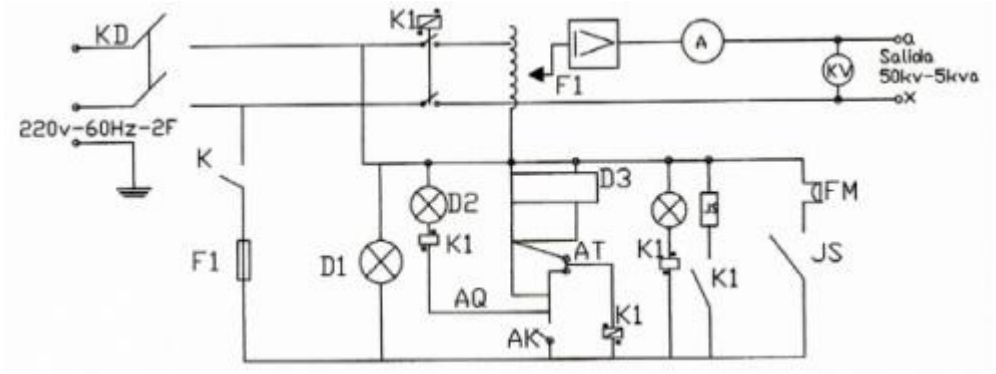
El equipo de prueba que se utilizó, es el HI-POT, de marca Huazheng, de 50kV y 5kVA.

Figura 16. HI-POT Huazheng, de 50kV y 5kVA.

Fuente: Los autores

El diagrama eléctrico del equipo es el siguiente:

Figura 17. Diagrama eléctrico HI-POT Huazheng (Otorgado por el proveedor).



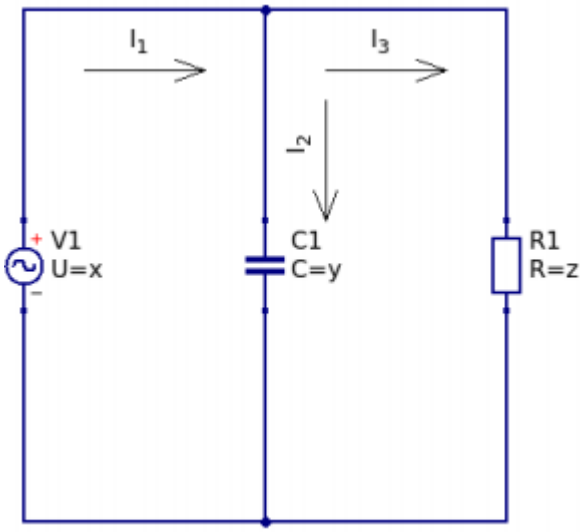
Fuente: [33]

3.2 Modelación matemática

A continuación, se presenta el diagrama eléctrico de la prueba del aislador, en donde el Hi-Pot Huazheng ha sido reemplazado por la fuente de voltaje V, mientras que el

aislador: por la resistencia R que representa la contaminación en función de la condición medioambiental, y finalmente un capacitor C, como el efecto capacitivo del aislador:

Figura 18. Diagrama eléctrico prueba del aislador.



Fuente: Los autores

Si aplicamos las leyes de Kirchhoff:

> Si en un nudo concurren dos o más intensidades, la suma de todas ellas en cualquier instante es nula [34].
>
> En un circuito cerrado, la suma de las caídas de tensión de todos los elementos ´ que forman el circuito es cero [34].

Además, se sabe que las caídas de tensión en un inductor, un resistor y un capacitor ´ son, respectivamente [35]:

$$L\frac{di}{dt}, Ri\ t\ , \frac{1}{C}\int_0^t idt$$

Aplicando la primera ley de Kirchhoff en el circuito de interés:

$$i_1 = i_2 + i_3 \qquad (1)$$

Ahora con la segunda ley de Kirchhoff. En la primera malla se tiene:

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 - i_3 \; dt \tag{2}$$

Mientras que en la segunda malla:

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 - i_3 \; dt + Ri_3 = 0 \tag{3}$$

El sistema de ecuaciones se presenta a continuación:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 - i_3 \; dt$$

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t i_1 - i_3 \; dt + Ri_3 = 0$$

Ahora derivamos con respecto al tiempo, eliminando las integrales y presentando las ecuaciones de forma diferencial:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \; i_1 - i_3 \tag{4}$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{-1}{RC} \; i_1 - i_3 \tag{5}$$

Despejando i_1 de la ecuación 6 y ordenando la ecuación 7, para introducir el sistema en simulink.

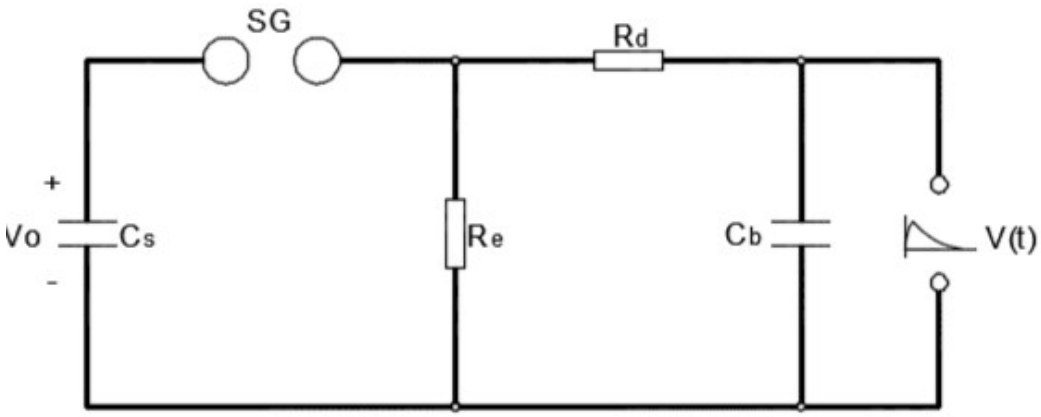
$$i_1 = C\frac{dU}{dt} + i_3 \tag{6}$$

$$\frac{di_3}{dt} = \frac{-1}{RC} \; i_3 - i_1 \tag{7}$$

Modelo Matemático del Impulso Tipo Rayo

A continuación se presenta el circuito de un espirómetro, generador de impulsos:

Figura 19. Circuito del equipo generador de impulsos.



Fuente: [37]

En donde:

$V_0 = Voltajeinicialdecarga$

$V_0 = Voltajeinicialdecarga$

$SG = Esp.deesferas$

$C_s = Capacitordeimpulso$

$R_f = Resistenciadefrentedeonda$

$C_s = Capacitordeimpulso$

$C_s = Capacitordeimpulso$

Para que el circuito funciene, el capacitor de impulso debe ser cargado por una fuente de voltaje continuo hasta alcanzar la tensión V_0, el nivel de tensión de descarga C_s, se controla por la distancia de separación de las esferas del espirómetro, el cual mediante un arco eléctrico permite que la corriente fluyaa través de la resistencia de frente de onda R_d (controla el tiempo de frente de onda del impulso), en ese mismo instante inicia la carga del capacitor C_b; cuando los dos capacitores C_s y C_b alcanzan el mismo

nivel de energía se descargarán a través de la resistencia de cola R_e, R_e es generalmente mucho mayor que R_d, esto permite que el tiempo de descarga sea también mayor. Para poder analizar el circuito y aplicar las leyes de Kirchhoff, se aplica la transformada de laplace de cada elemento:

Transformada de Laplace de la Resistencia Eléctrica

Considerando que el voltaje y la intensidad son funciones del tiempo:

$$V(t) = Ri(t)$$

si a la ecuación anterior se le aplica la transformada de laplace, el resultado sería:

$$V\ s\ = R_i\ s$$

En donde:

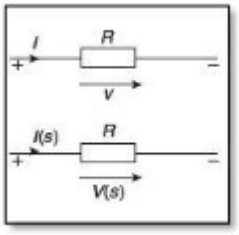
$$V\ s\ = R_i\ s$$

$$V\ s\ = R_i\ s$$

Despejando R de la ecuación inicial:

$$R = \frac{V\ s}{i\ s}$$

Figura 20. *Resistencia en el dominio del tiempo y s*.



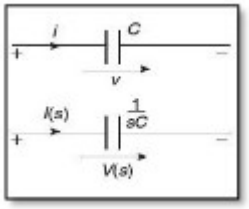
Fuente: [37]

Transformada de laplace del capacitor

La impedancia de un capacitor expresada por la transformada de Laplace, está dada por:

$$Z\ s\ = \frac{V\ s}{sCV\ s} = \frac{1}{sC}$$

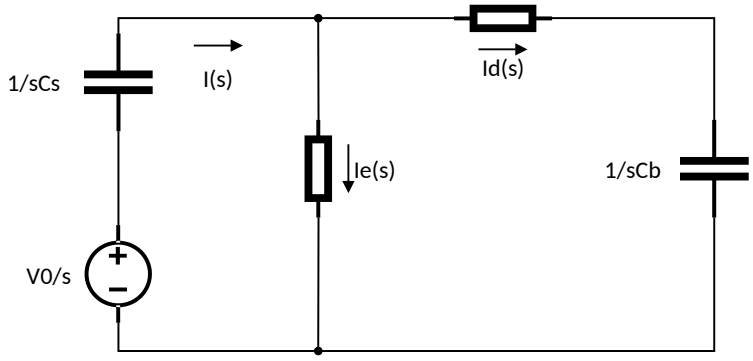
Figura 20. C en el dominio del tiempo y s.



Fuente: [37]

Ahora, con el objetivo de analizar el circuito generador de impulsos, y obtener el voltaje de salida en Cb, se aplica la transformada de Laplace de todos los elementos:

Figura 21. Circuito equivalente en el dominio de la frecuencia.



Fuente: [37]

Aplicamos las leyes de Kirchhoff y Ley de Ohm.

$$\frac{V0}{s} = i\ s\ \frac{1}{s.Cs} + i_e\ s\ R_e \qquad (8)$$

$$i_e\ s\ R_e = id\ s\ Rd + V\ s \qquad (9)$$

$$i\ s\ = i_e\ s\ + id\ s \qquad (10)$$

$$V\ s\ = id\ s\ \frac{1}{s.Cb} \quad (11)$$

Los valores de corrientes no son conocidos, por lo tanto, se debe tratar de simplificarlos, remplazándolos o eliminándolos.

Despejamos la corriente $id\ s$ de la ecuación 11.

$$id\ s\ = V\ s\ s.Cb \quad (12)$$

Reemplazamos $i\ s$ en la ecuación 8 pos su equivalente en la ecuación 10

$$\frac{V0}{s} = ie\ s\ + id\ s\ \frac{1}{s.Cs} + i_e\ s\ R_e \quad (13)$$

Reemplazamos $id\ s$ por su equivalente obtenido anteriormente.

$$\frac{V0}{s} = ie\ s\ + V\ s\ s.Cb\ \frac{1}{s.Cs} + i_e\ s\ R_e \quad (14)$$

Despejamos $ie\ s$ y tenemos

$$ie\ s\ = \frac{Cs * V0 - s * Cb * V\ s}{1 + s * \Re * Cs} \quad (15)$$

En la ecuación 9 remplazamos $id\ s$ por lo obtenido anteriormente y tenemos

$$ie\ s\ = \frac{V\ s}{\Re}\ s * Cb * Rd + 1 \quad (16)$$

Igualamos la ecuación 15 y 16, despejamos el voltaje de salida $V\ s$

$$\frac{Cs * V0 - s * Cb * V\ s}{1 + s * \Re * Cs} = \frac{V\ s}{\Re}\ s * Cb * Rd + 1$$

$$V\ s\ = \frac{\frac{V0}{Rd * Cb}}{s^2 + \ \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{Rd * Cs}\ \ * s + \frac{1}{\Re * Rd * Cs * Cb}} \qquad (17)$$

Este es el voltaje de salida $V\ s$ sobre el capacitor Cb expresado en dominio de la frecuencia, ahora se debe aplicar la anti-transformada de Laplace para obtener el resultado en dominio del tiempo, pero antes debemos obtener las raíces de la ecuación cuadrática del denominador.

$$s^2 + \ \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{Rd * Cs}\ \ * s + \frac{1}{\Re * Rd * Cs * Cb} = 0$$

Con la ecuación general obtenemos las raíces.

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \ \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Donde:

$a = 1$

$b = \ \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{Rd * Cs}$

$c = \frac{1}{\Re * Rd * Cs * Cb}$

Resolvemos y encontramos $\alpha y \beta$:

$$\alpha = \frac{\frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{Rd * Cs}\ \ \frac{V0}{Rd * Cb}}{2} * \qquad (18)$$

$$\beta = \frac{\frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{\Re * Cs} + \frac{1}{Rd * Cs}\ \ \frac{V0}{Rd * Cb}}{2} * \qquad (19)$$

Escribimos en la ecuación 17

$$V\ s\ = \frac{\frac{V0}{Rd * Cb} * 1}{s + \alpha\ \ s + \beta}$$

Aplicamos fracciones parciales

$$V\ s\ = \frac{\frac{V0}{Rd * Cb} * 1}{s+\alpha\ \ s+\beta} = \frac{A}{s+\alpha} + \frac{A}{s+\beta}$$

Obteniendo valores de A y B, reemplazamos

$$V\ s\ = \frac{\frac{-V0}{Rd * Cb *\ \ \alpha-\beta}}{s+\alpha} + \frac{\frac{V0}{Rd * Cb *\ \ \alpha-\beta}}{s+\beta}$$

Aplicamos la anti-transformada de Laplace y tenemos

$$V\ s\ = \frac{\frac{V0}{Rd * Cb} * 1}{\alpha-\beta} *\ \ e^{-\beta t} - e^{-\alpha t} \qquad (20)$$

Fuente: [37]

3.3 Ensayos de laboratorio

Las pruebas se realizan en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con la ayuda del equipo HI-POT Huazheng, de 50kV y 5kVA y se determinó el momento exacto en el que se produce el flashover en los aisladores, al estar sometidos a diferentes tipos de contaminación. La resistencia de aislamiento de cada uno de los aisladores fue determinada con la ayuda del quipo Metrel MI3201.

Figura 22: Comprobador de aislamiento Metrel MI3201

Fuente: Los Autores

Los ensayos desarrollados en el laboratorio se efectúan con niebla salina (gramo de sal / litro de agua), o capas pre depositadas con posterior humectación, cuya severidad depende de la densidad de sal equivalente de la capa depositada o ESDD (mg/cm²).

Tabla 1. Niveles de contaminación

Niveles de contaminación natural	**Ensayo de niebla salina (g/l)**	**Ensayo de capa pre depositada (mg / cm² ESDD)**
Ligera (áreas con escasa contaminación).	2.4 -14	0.02 – 0.06
Media (áreas agrícolas, urbanas e industriales).	14 – 40	0.1 – 0.2
Fuerte (áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras).	40 -113	0.3 – 0.6
Extrema (refinerías, zonas de carbón, y zonas de tormenta de mar).	>160	>0.8

Fuente: [28].

3.4 Influencia de las condiciones atmosféricas

Las tensiones disruptivas dependen de las condiciones de temperatura, presión y humedad absoluta, la presión y temperatura afectan la densidad del aire (a mayor densidad mayor rigidez dieléctrica), este efecto se tiene en cuenta mediante el factor de corrección Ka.

$$k_a = \ \delta_{20}{}^{\ m}\ k^{\ w},$$

Donde:

$k = 1 + 0.012\ \frac{H}{\delta_{20}} - 11$, Para ondas de tensión alterna;

$k = 1 + 0.010\ \frac{H}{\delta_{20}} - 11$, Para ondas de impulso,

Entonces:

$H\ es\ la\ humedad\ absoluta\ en\ \frac{g}{m^3}$,

$\delta_{20}\ es\ la\ densidad\ relativa\ del\ aire$,

Mientras que:

$$\delta_{20} = \frac{293}{273 + \theta} e^{\frac{-h}{8150}}$$

Si:

$h\ es\ la\ altura\ sobre\ el\ nivel\ del\ mar\ en\ m,$

$$\theta es la temperatura en ℃.$$

Finalmente, m y w se seleccionan en función del parámetro g:

$g = \frac{U_{50}}{500\delta_{20}kd}$,

Donde:

$d\ es\ la\ distancia\ del\ trayecto\ más\ corto\ en\ aire\ entre\ ambos\ electrodos\ en\ m,$

$U_{50}\ es\ la\ tensión\ de\ descarga\ disruptiva\ de\ probabilidad\ de\ descarga\ del\ 50\%,$

$En\ caso\ de\ desconocimiento\ se\ asume\ U_{50=1.1}$

SI:

$$0.2 < g \leq 1 \rightarrow m = w,$$

$$1g \leq 1.2 \rightarrow m = 1,$$

$$1.2 < g \leq 2 \rightarrow m = \ 2.2 - g \quad 2 - g \quad 0.8,$$

$$2 < g \rightarrow m = 0,$$

$$w = g \ \ g - 2 \quad 0.8$$

3.4.2 Determinación de la resistencia de aislamiento

Con la ayuda del comprobador de aislamiento, se procede a realizar las pruebas en cada uno de los aisladores realizando los pasos de contaminación expresados en la tabla 1.

Figura 23: Determinación de la resistencia de aislamiento.

Fuente: Los autores

Los datos obtenidos en la determinación de la resistencia de aislamiento serán utilizados para la validación del modelo matemático en el software MATLAB.

En la tabla 2 se puede observar los valores obtenidos.

Tabla 2: Resistencia de aislamiento

RESISTENCIA DE LOS AISLADORES					
PORCELANA					
NIVEL DE CONTAMINACIÓN					
	Ambiente	Ligera(Áreas con escasa contaminación)	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)
Resistencia	**1,90 GΩ**	**3,23 MΩ**	**1,47 MΩ**	**615 KΩ**	**364 KΩ**
Capacitancia	**2.20nf**	**2.82nf**	**6.89nf**	**11.7nf**	**20.1nf**
POLÍMERO					
NIVEL DE CONTAMINACIÓN					
	Ambiente	Ligera(Áreas con escasa contaminación)	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)

Resistencia	**94,4 GΩ**	**18,5 GΩ**	**1,18 GΩ**	**1,10 GΩ**	**443 MΩ**
Capacitancia	**0.35nf**	**0.4nf**	**0.4nf**	**0.4nf**	**0.4nf**
VIDRIO					
NIVEL DE CONTAMINACIÓN					
	Ambiente	Ligera(Áreas con escasa contaminación)	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)
Resistencia	**118 MΩ**	**60 MΩ**	**11,4 MΩ**	**5,13 MΩ**	**268 KΩ**
Capacitancia	**0.4nf**	**0.4nf**	**0.44nf**	**1.5nf**	**1.8nf**

Fuente: Los autores

3.4.3 Determinación del flashover

Con la ayuda del equipo HI-POT Huazheng, de 50kV y 5kVA, se procede a realizar las pruebas de alto potencial en los aisladores, cabe recalcar que el equipo funciona a frecuencia fundamental, las pruebas se realizan con incremento de voltajes en cinco pasos manteniendo cada uno de los incrementos durante 10 minutos, y verificando así el comportamiento de cada uno de los aisladores, al igual que la determinación de la resistencia de aislamiento, en esta prueba también se realiza contaminación salina de acuerdo a las cantidades expresadas en la tabla 1

Tabla 3: Resistencia de aislamiento

PRUEBA DE HI-POT					
AISLADOR	POLÍMERO				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ambiente				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,8kV	29,6kV	41,5kV	59,2kV
HVC calculada	0,0001029	0,0003052	0,0005075	0,0007115	0,001015
HVC (A)	0,0001	0,0003	0,0005	0,0007	0,001
Error Porcentual	-2,90%	-1,73%	-1,50%	-1,64%	-1,50%
COMPORTAMIENTO	La prueba es satisfactoria existe una ligera fuga de corriente				

NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ligera(Áreas con escasa contaminación)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,8kV	29,9kV	41,3kV	58,2kV
HVC calculada	0,0001176	0,0003489	0,0005861	0,0008095	
HVC (A)	0,0001	0,0003	0,0005	0,0008	ruptura
Error Porcentual					
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 58,2kV en un tiempo de 30s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,7kV	29,7kV	34,3kV	
HVC calculada	0,0001182	0,0003488	0,0005853	0,0006759	
HVC (A)	0,0001	0,0003	0,0005	ruptura	
Error Porcentual					
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 34,3kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,7kV	29kV	30,4kV	
HVC calculada	0,0001183	0,0003489	0,0005717		
HVC (A)	variación	variación	variación	ruptura	
Error Porcentual					
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 30,4kV en un tiempo de 45s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,7kV	28,4kV		
HVC calculada	0,0001194	0,0003521			
HVC (A)	variación	variación	ruptura		
Error Porcentual					
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 24,4kV en un tiempo de 45s				

Tabla 4: Resistencia de aislamiento

PRUEBA DE HI-POT					
AISLADOR	PORCELANA				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ambiente				
VOLTAJE APLICADO	6kV	18,4kV	29,9kV	42,2kV	58,4kV

HCV Calculado	0,0001003	0,0003077	0,0005001	0,0007058	
HVC (A)	0,0001	0,0003	0,0005	0,0007	0,0007
Error Porcentual	-0,30%	-2,57%	-0,02%	-0,83%	100,00 %
COMPORTAMIENTO	La prueba es satisfactoria existe una ligera fuga de corriente				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ligera(Áreas con escasa contaminación)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	18,1kV	30kV	39,7kV	
HVC Calculadp	0,0001016	0,0001446	0,000582		
HVC (A)	0,0001	0,0001	0,0005	ruptura	
Error Porcentual	-1,60%	-44,60%	-16,40%		
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 39,7kV en un tiempo de 20s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)				
VOLTAJE APLICADO	6,2kV	18,1kV	30,7kV	37,8kV	
HVC calculado	0,0001183	0,00132	0,007758	0,01205	
HVC (A)	0,0001	0,0012	0,007	ruptura	
Error Porcentual	-18,30%	-10,00%	-10,83%		
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 37,8kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)				
VOLTAJE APLICADO	6,1kV	18,2kV	30,2kV	36,3kV	
HVC calculado	0,000106	0,009916	0,002865		
HVC (A)	0,0001	0,01	0,003	ruptura	
Error Porcentual	-6,00%	0,84%	4,50%		
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 36,3kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)				
VOLTAJE APLICADO	6,2kV	18,1kV	35,3kV		
HVC calculado	0,0001103	0,0007869			
HVC (A)	0,0001	0,0007	ruptura		
Error Porcentual	-10,30%	-12,41%			
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 35,3kV en un tiempo de 1s				

Tabla 5: Resistencia de aislamiento

PRUEBA DE HI-POT	
AISLADOR	VIDRIO
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ambiente

VOLTAJE APLICADO	6kV	17,8kV	30kV	41,8kV	52,1kV
HVC calculado	0,0001243	0,0004419	0,0006236	0,0007089	0,001
HVC (A)	0,0001	0,0004	0,0006	0,0007	0,001
Error Porcentual	-24,30%	-10,48%	-3,93%	-1,27%	0,00%
COMPORTAMIENTO	La prueba es satisfactoria existe una ligera fuga de corriente				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Ligera(Áreas con escasa contaminación)				
VOLTAJE APLICADO	6,1kV	18,1kV	30kV	34kV	
HVC calculado	0,000133	0,000447	0,0006112		
HVC (A)	0,0001	0,0004	0,0006	ruptura	
Error Porcentual	-33,00%	-11,75%	-1,87%		
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 34kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Media(Áreas agrícolas, urbanas e industriales)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	17,8kV	30kV	32,5kV	
HVC calculado	0,0001305	0,0003636	0,000382		
HVC (A)	0,0001	0,0003	0,0003	ruptura	
Error Porcentual	-30,50%	-21,20%	-27,33%		
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 32,5kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Fuerte(Áreas fuertemente industrializadas, áreas costeras)				
VOLTAJE APLICADO	6,1kV	17,8kV	30,8kV		
HVC calculado	0,000136	0,0004605			
HVC (A)	0,0001	0,0004	ruptura		
Error Porcentual	-36,00%	-15,13%			
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 30,8kV en un tiempo de 1s				
NIVEL DE CONTAMINACIÓN	Extrema(Refinería, zonas de carbón y zonas de tormenta de mar)				
VOLTAJE APLICADO	6kV	20,1kV			
HVC calculado	0,008075				
HVC (A)	0,008	ruptura			
Error Porcentual	-0,94%				
COMPORTAMIENTO	Se provoca un flashover a los 20,1kV en un tiempo de 1s				

Figura 24: Flashover en aisladores.

Fuente: Los autores

3.5 Validación técnica-económica de los resultados:

En base a las pruebas realizadas en el laboratorio de alto voltaje de la Universidad Técnica de Cotopaxi, y con los datos recabados, se realizó el modelo matemático en el software MATLAB, el programa arroja resultados del flashover de los aisladores cuando están sometidos algún tipo de contaminación, entonces se puede decir que es una herramienta útil para predecir posibles fallos en líneas de distribución en media tensión, a causa de contorneos por la continuación ambiental en los aisladores ya sean estos de porcelana, polímero o vidrio.

3.6 Conclusiones del III capitulo.

Se logró determinar el modelo matemático de la ruptura dieléctrica, de aisladores de porcelana, polímero y vidrio.

Conclusiones generales

Las fuentes bibliográficas del tema de investigación son escasas, ya que la mayor parte de trabajos se enfocan a sistemas de transmisión y subtransmisión.

El modelo matemático desarrollado en esta investigación es una herramienta versátil, que permite determinar el comportamiento de los aisladores de distribución en distintos tipos de ambiente, permitiendo determinar el nivel de voltaje con el que los aisladores sufren una disrupción eléctrica.

Las pruebas de laboratorio realizadas, son concluyentes con los resultados arrojados por el modelo matemático, en cuanto a la prueba de voltaje aplicado, en lo referente a las pruebas de impulso se pudo verificar los resultados del modelo, en base a las normas internacionales (IEC 60815, IEC 60507, IEC 60587), comparando los tiempos de frente y cola de la onda.

Recomendaciones

Se recomienda realizar las pruebas de impulso, incluyendo onda completa y recortada, en un laboratorio eléctrico, para verificar la veracidad de los resultados.

Es recomendable que la presente investigación sea ampliada a aisladores usados para líneas de transmisión y subtransmision (cadenas de aisladores). investigación.

Referencias bibliográficas.

[1] Moreno, Garnaacho y R. Simón, Reglaento de línea de alta tensión, Fenosa, 2008.

[2] E. A. Mari, Los materiales cerámicos, Buenos Aires: ALSINA, 2001.

[3] J. C. Q. Suárez, M. M. Melgarejo, J. R. Mayoral, M. A. Q. Suárez, F. D. Reyes y J. C. Norro, «Modelo predictivo para la determinación de contaminación salina en aisladores eléctricos.,» *UNELCO*, p. 5.

[4] V. E., R. G., R. J. Villarreal L. y M.-M. R., «Diseño de un Manipulador Industrial para Aplicaciones de Limpieza en Subestaciones Eléctricas,» *Centro Metropolitano de Investigación en Mecatrónica*, p. 6.

[5] E. V. M. G. F. E. Lorena E. Correa*1, «Evaluación del desempeño de aisladores de porcelana recubiertos con películas de dióxido de titanio para disminuir el ensuciamiento,» *Codensa*, p. 10, 2013.

[6] E. Garcés y D. Rodriguez, Análisis matemático de aislamiento aplicado a aisladores de porcelana, polímero y vidrio, a nivel de 13.8kV, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana, 2015.

[7] Consejo Nacional de Planificación, Plan nacional de desarrollo 2017 - 2021, Quito: CNP, 2017.

[8] L. Chachalo y A. Julián, Evaluación del impacto de ceniza volcánica en la rigidez dieléctrica de aisladores de suspensión en líneas de alto voltaje mediante análisis del factor de pérdida dieléctrica, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2018.

[9] M. R. C. Villao, EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL RECUBRIMIENTO DE AISLADORES CON PINTURA SILICONADA RTV EN LAZONA DE, Santo Domingo de los Tsáchilas: Universidad Tecnológica Equinoccial, 2017.

[10] V. Tejada y D. Plée, «Estudio de formulaciones cerámicas para aisladores eléctricos,» *scielo*, p. 15, 2016.

[11] H. Rojas y H. Rojas, «Evaluación del desempeño de aisladores eléctricos de distribución cer´´amicos y poliméricos bajo biocontaminación por hongos,» *scielo*, p. 12, 2017.

[12] C. Pérez, H. Rojas, A. León y L. Cantor, «Crecimiento de algas sobre aisladores de media tensión y su impacto sobre el desempeño eléctrico,» *udistrital*, p. 9, 2015.

[13] J. Pombo y O. Díaz, «Sistema de detección y pronóstico de la contaminación presente en aisladores de alta tensión de la subestación Nueva Barranquilla,» *aciem*, p. 8, 2019.

[14] A. León, C. Pérez y L. Cantor, «Desempeño eléctrico de aisladores cerámicos y

polímericos ante el crecimiento de microorganismos en su suoerficie: caso de estudio,» *udistrital*, p. 185, 2015.

[15]C. Pacheco, «MODELO DE MANTENIMIENTO PARAAISLADORES CONTAMINADOS ENLA LÍNEA 220 KV CÓNDORES - PARINACOTA,» *USM*, p. 93, 2018.

[16]W. Abaunza y E. Gualdron, Procedimientos para la limpieza de aisladores contaminados, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016, p. 153.

[17]J. D. J. Cervantes, Sistemas de Distribucion de Energía Eléctrica, Mexico: Universodad Autonoma Metropolitana, 1995.

[18]S. R. Castaño, Redes de distribución de energía, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2004.

[19]E. Harper, Sistemas de transmision y distribucion de potencia eléctrica, Mexico: Limusa, 2005.

[20]MEER, «Unidades de propiedad,» MEER, 04 Enero 2013. [En línea]. Available: http://www.unidadesdepropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=182&Itemid=207. [Último acceso: 26 Enero 2020].

[21]Structuralia, «Structuralia,» Structuralia, 12 Abril 2018. [En línea]. Available: https://blog.structuralia.com/aisladores-en-lineas-electricas-materiales-tipos-y-caracteristicas-principales. [Último acceso: 26 Enero 2020].

[22]Hubbell, «Veri*Lite™ Deadend & Suspension Insulators,» Copyright 2019 Hubbell Incorporated, USA, 2019.

[23]Enersis, «ESPECIFICACIÓN TÉCNICA: AISLADORES DE PORCELANA, VIDRIO Y POLIMÉRICOS PARA REDES DE MEDIA TENSIÓN,» Enersis endesa, Enersis endesa, 2008.

[24]F. R. Quintela y R. C. Redondo Melchor, «electricidad.usal.es,» Universidad de Salamanca, 13 Noviembre 2019. [En línea]. Available: https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:154. [Último acceso: 26 Enero 2020].

[25]L. J. Y. Z. Z. T. C. P. Jianyong Ai, «Detecting Partial Discharge of Polluted Insulators Based on Ultraviolet Imaging,» de *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Sydney, NSW, Australia, 2015.

[26]C. K. G. C. M. a. A. C. S. Chandrasekar, «Partial discharge detection as a tool to infer pollution severity of polymeric insulator,» de *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Bolognia, Italia, 2010.

[27]Megger, «www.artec-ingenieria.com,» 11 11 2006. [En línea]. Available: http://www.artec-

ingenieria.com/pdf/Guias_Tecnicas_Megger/Castellano/Equipos%20de%20subestaciones.pdf. [Último acceso: 10 06 2020].

[28]J. A. M. Velasco, COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN REDES ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN, Aravaca Madrid: McGraw-Hill, 2007.

[29]es.electric-test, «es.electric-test.com,» es.electric-test.com, [En línea]. Available: http://es.electric-test.com/info/advantages-and-disadvantages-of-dc-and-ac-with-19265382.html. [Último acceso: 10 07 2020].

[30]M. Blonhoj, «Modelizacion matemática-una teoría para la práctica,» *Revista de educacion matemática*, vol. 23, n° 2, 2008.

[31]«Fermentacion alcohólica,» *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 45, n° 1, pp. 37-47, 2011.

[32]M. P. J. R. a. V. C. ˜. n. J. Ramirez-Nino, «Design and construction of a pollution monitor for power line insulators,» *Measurement Science and Technology*, vol. 7, n° 6, p. 876, 1996.

[33]I. A. N. S. Institute, «Ansi/nema c29.9-(r2020, r2012),» *Ansi/nema* , vol. 1, n° 1, p. 18, 1983.

[34]I. F. Camacho, «Manual de uso HIPOT,» INEDIC, Quito, 2018.

[35]X. A. M. Antonio Garc´ıa Pascual, «Instalaciones electricas,» *Biblioteca Mutimedia de la Industria*, vol. 1, n° 62, p. 119, 2005.

[36]M. R. C. D. G. Zill, « Matematicas avanzadas para ingenieros ecuaciones diferenciales,» *Biblioteca Multimedia de la Industria*, vol. 1, n° 62, p. 704, 2006.

[37]J. V. Andres Aguirre, «dspace,» 01 03 2015. [En línea]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10252/1/UPS-GT001342.pdf. [Último acceso: 23 03 2021].

[38]V. Myguel y C. Yilmer, RECONOCIMIENTO DE IMPUREZAS DE AISLADORES ELÉCTRICOS EN IMÁGENES DIGITALES, Pimentel: Universidad Señor de Sipán, 2018.

[39]J. A. M. Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Catalunya: Mc Graw Hill Education, 2013.