UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CONFIABILIDAD OPERATIVA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, ANTE LA APARICIÓN DE SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFÉRICO

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Eléctrica para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Sistemas de Potencia

GUIDO GODÍNEZ ZAMORA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica
2020

Dedicatoria

"A Paula e Isaac."

Guido

Agradecimientos

Agradezco a mi profesor guía Gustavo Gómez Ramírez, por toda la orientación y apoyo brindado durante toda la maestría. Su vocación académica ha motivado que varias generaciones emprendan el camino de la investigación. A mis asesores, Jairo Quirós Tortós y Gustavo Valverde Mora, por sus colaboraciones durante el proyecto y por mostrarme estándares se trabajo de gran nivel. Las investigaciones de ambos tienen un impactos trascendental a nivel mundial y constituyen una fuente de inspiración

También agradezco al equipo de docentes de la maestría académica en ingeniería eléctrica, por compartir sus conocimientos y promover la investigación científica aplicada. De manera especial, doy gracias al profesor Jorge Blanco Roldán por su ayuda, recomendaciones y por compartir su visión empresarial.

Con gran aprecio agradezco al Director del Sistema de Distribución de la Energía de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), Luis Fernando André Jácome, por instruirme tanto en el ámbito académico como profesional y por brindarme la posibilidad de compartir en el "World Meeting on Lighning - 2016çon los máximos exponentes mundiales en el área de descargas atmosféricas. Esto en definitiva impulsó el desarrollo de este proyecto. También, agradezco a los equipos de planificación y control del sistema de distribución de la CNFL, por su gran compañerismo, colaboración durante el proyecto e información suministrada.

Finalmente, con mucho cariño agradezco mi familia por todo su apoyo. Todos han tenido contribuciones muy especiales en esta etapa de mi vida, que me han ayudad a mejorar y ser feliz.

"Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Ingeniería Eléctrica con énfasis en Sistemas de Potencia"

Dr. Óscar Nuñez Mata
Representante del Decano del Sistema de Estudios de Posgrado

M.Sc. Gustavo Gómez Ramírez
Director de Tesis

Dr. Jairo Quirós Tortós
Asesor

Dr. Gustavo Valverde Mora
Asesor

Dr. Mauricio Espinoza Bolaños
Representante del Director de Programa de Posgrado

Guido Godínez Zamora
Sustentante

Tabla de Contenido

Dedicatoria i

Agradecimientos ii

Hoja de Aprobación iii

Tabla de Contenido iv

Resumen vi

Índice de Tablas vii

Índice de Figuras viii

1. Introducción 1

1.1. Justificación . . . 2
1.2. Planteamiento del problema . . . 4
1.3. Hipótesis de solución . . . 5
1.4. Objetivos . . . 6
1.5. Metodología . . . 6
1.6. Contribuciones . . . 8
1.7. Estructura del trabajo y productos a desarrollar . . . 9

2. Antecedentes y estado del arte 11

2.1. Antecedentes . . . 11
2.2. Carga y descarga en nubes de tormenta eléctrica . . . 11
2.3. Modelos del retorno de corriente . . . 13
2.4. Sobretensiones en sistemas de distribución . . . 16
2.5. Confiabilidad en sistemas de distribución . . . 18

3. Fundamentos teóricos **22**
3.1. Sobretensiones de origen atmosférico . . . 22
3.2. Confiabilidad operativa de los sistemas de distribución . . . 27
3.3. Método de Monte Carlo y agrupamiento . . . 32
3.4. Marco normativo de la especialidad . . . 35

4. Estimación de sobretensiones en sistemas de distribución **36**
4.1. Estimador de sobretensiones y generador de funciones de probabilidad . . . 37
4.2. Implementación del algoritmo de sobretensiones en un sistema real . . . 41
4.2.1. Parámetros de las descargas atmosféricas . . . 41
4.2.2. Parámetrización de las sobretensiones de origen atmosférico . . . 45
4.3. Síntesis del módulo de sobretensiones . . . 47

5. Estimación de la confiabilidad operativa **48**
5.1. Estimador de indicadores de confiabilidad . . . 49
5.2. Implementación del algoritmo de confiabilidad en un sistema real . . . 53
5.2.1. Estimación de riesgo bajo el método tradicional . . . 54
5.2.2. Estimación de riesgo bajo el método alternativo . . . 55
5.3. Síntesis del módulo de confiabilidad . . . 59

6. Análisis de riesgo usando un modelo de Monte Carlo y técnicas de agrupamiento **60**
6.1. Análisis de riesgo: Sobretensiones, confiabilidad y nivel de impacto . . . 61
6.2. Implementación del análisis de riesgo en el sistema de prueba . . . 64
6.3. Síntesis del módulo de análisis de riesgo . . . 70

7. Estrategias para el mejoramiento de la confiabilidad operativa y discusión **71**
7.1. Análisis costo-beneficio en el sistema de prueba . . . 74
7.2. Discusión general del trabajo . . . 79
7.3. Síntesis del capítulo . . . 81

8. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros **82**
8.1. Conclusiones . . . 82
8.2. Recomendaciones . . . 83
8.3. Trabajos futuros . . . 84

Bibliografía **85**

A. Modelos de Markov **93**

B. Resultados adicionales: MonteCarlo **96**

Resumen

Las descargas atmosféricas son eventos fascinantes que surgen de manera periódica en todo el mundo y despiertan múltiples emociones en los seres humanos. Desde una perspectiva ingenieril, se define como pulso electromagnético que se produce entre las nueves y la superficie terrestre. Su acople con los sistemas de potencia es inherente y se cuantifica mediante la estimación de sobretensiones, las cuales pueden causar interrupciones en el suministro de energía. En general, los esquemas de protección para estos eventos se diseñan mediante una coordinación de aislamiento, que contempla la identifican de sobretensiones, la parametrización de los dispositivos de protección y la selección de la capacidad disruptiva del aislamiento.

En este trabajo, se presenta una metodología alternativa para vincular los tres procesos que conforman la coordinación de aislamiento e incluye una cuarta componente de valoración financiera. Particularmente, se enfoca en determinar el desempeño de redes de distribución mediante la incorporación del concepto de confiabilidad operativa. Para tal efecto, se desarrolla una estructura conceptual y una herramienta computacional que involucra tres etapas: *(i)* Un estimador de sobretensiones utilizando el modelo Rusck y redes de dos puertos, *(ii)* Un estimador de confiabilidad basado en cadenas de Markov y *(iii)* Un analizador probabilístico de riesgo que integra el método de Monte Carlo, agrupamiento con K-means y diagramas de Voronoi. Esta estructura combina datos de un sistema de detección de descargas atmosféricas, sistemas de información geográfico y registros de interrupciones gestionados en SCADA, para proporcionar una la clasificación de riesgo a nivel espacial y temporal.

Se realiza la primera implementación sobre un sistema real, el cual es administrado por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). Se determinó que en su área de concesión existe una densidad anual de descargas atmosféricas de 10 impactos/km^2 y una intensidad de corriente promedio de 15 kA. Se estimó que el 80 % de las sobretensiones generadas sobre el sistema es inferior a los 50 kV. También, se tiene que la disponibilidad del sistema es de 0.999 (tres nueves) considerando todos los modos de falla y de 0.99999 (cinco nueves) ante sobretensiones externas. Se estima que la tasa de fallas y restablecimiento ante sobretensiones es de 3.14 y 28 min, respectivamente, con impacto anual de 1.2 millones de colones. Mediante la aplicación de acciones de mejoras basadas en normalización de los parámetros del sistema de protección se estima un ahorro inmediato 28 millones de colones anuales.

Lista de Tablas

1.1. Actividades y productos a desarrollar durante la investigación 10

4.1. Resumen: Parámetros de descargas atmosféricas y sobretensiones para el sistema de prueba 47

5.1. Elementos del esquema de protección y principales parámetros, en CNFL 54
5.2. Probabilidad condicional de falla en CNFL, debido a los niveles de sobretensión 57
5.3. Resumen: Parámetros de descargas atmosféricas y sobretensiones para el sistema de prueba 59

6.1. Descripción del sistema de partición geográfico, usando digramas de Voronoi 69
6.2. Resumen: Análisis de riesgo del sobre el sistema de prueba (CNFL) 70

7.1. Análisis de costos para las acciones propuestas de mejoramiento de la confiabilidad . . 78
7.2. Resumen: Mejoras de corto plazo sobre la confiabiliad operativa del sistema de CNFL 81

Lista de Figuras

1.1. Representación de la interacción entre descargas atmosféricas y redes de distribución . 4
1.2. Modelo propuesto para analizar la confiabilidad operativa 7
1.3. Estructura actual y oportunidades de mejora de la coordinación de aislamiento y los análisis de confiabilidad 8

3.1. Histograma 3D para densidad de descargas atmosféricas (Izquierda) y función probabilidad Lognormal para intensidad y tiempo de cresta (derecha) 23
3.2. Función gaussiana mixta, con n=4, para modelar las intensidades. Evaluación previa . 24
3.3. Canal de retorno y las relaciones entre corriente, desplazamiento y tiempo 25
3.4. Modelos empleados en ATP-EMP y LIOV, para el cálculo de sobretensiones 27
3.5. Red eléctrica geoferenciada y montaje electromecánico de un seccionador 28
3.6. Función características de un aislamiento sólido y descargadores de sobretensiones . . 29
3.7. Red de distribución de tres alimentadores y el diagrama espacial de ocho estados posibles 30
3.8. Ejemplo de una prueba de Kolmogorov - Smirnov, para cien eventos aleatorios aplicada, a una función normal con $\mu = 0$ y $\sigma = 2$ 31
3.9. Estimación de falla en aislamiento sólido en una red de media tensión debido a sobretensiones de origen externo 33
3.10. Agrupamiento de descargas atmosféricas en CNFL, julio 2010 34

4.1. Esquema de interacción entre descargas atmosféricos y sistemas de distribución 40
4.2. Gráficas teóricas del módulo de sobretensiones y parametrización 40
4.3. Área y ubicación geográfica del sistema de de la CNFL 41
4.4. Matriz de correlación de descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017 42
4.5. Parametrización mensual de la actividad atmosférica: CNFL - 2010-2017 43
4.6. Parametrización espacial de las descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017 44
4.7. Parametrización de la intensidad de descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017 44
4.8. Proceso de filtrado de descargas atmosféricas, bajo el criterio de sobre tensión mínima: CNFL - 2011 - Julio 46

4.9. Parametrización de Sobretensiones de origen externos: CNFL - 2010-2017 46

5.1. Esquema conceptual operación en un sistema de distribución ante descargas atmosféricas 52
5.2. Gráficas teóricas (salidas esperadas) del módulo de confiabilidad 52
5.3. Red eléctrica georeferenciada y equipos de control de la de CNFL 53
5.4. Estimación de la probabilidad de fallas en el sistema de CNFL, método tradicional . . 55
5.5. Distribución de costos por segmento de control: CNFL 2017-2018 56
5.6. Disponibilidad de segmentos de control aplicando un modelo de Markov de cuatro estados: CNFL - 2010-2017 57
5.7. Disponibilidad frente a descargas atmosféricas de segmentos de control aplicando un modelo de Markov de dos estados: CNFL - 2010-2017 57
5.8. Probabilidad de falla condicionada al nivel de sobretensión: CNFL - 2010-2017 58

6.1. Salidas generadas mediante el proceso de Monte Carlo, para el sistema de CNFL . . . 65
6.2. Análisis del coeficiente de silueta y correlación de variables 66
6.3. Resultado del agrupamiento con K-means: Visualización 3D y proyecciones 2D 67
6.4. Resultado del agrupamiento con K-means y silueta 68
6.5. Resultado del agrupamiento utilizado diagramas de Voronoi 2D sobre el plano XY . . 69

7.1. Relación de costos y nivel de impulso crítico para aislamiento sólido 75
7.2. Relación de costos y tensión residual para descargadores de distribución 76
7.3. Propuesta para la descentralización de los equipos de atención de fallas 77
7.4. Análisis costo-beneficio para las acciones de mejora sobre el sistema de CNFL 79

A.1. Representación de sistemas de dos estados de Markov 93
A.2. Representación de sistemas de cuatro estados de Markov 95
A.3. Representación de sistemas de ocho estados de Markov 95

B.1. Generación de variables aleatorias: Descargas atmosféricas sobre el sistema de CNFL . 96
B.2. Resultado del agrupamiento con K-means 97

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

SEP Sistema de Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Guido Godínez Zamora, con cédula de identidad 1-1227-0802, en mi condición de autor del TFG titulado Confiabilidad operativa en sistemas de distribución de energía eléctrica, ante la aparición de sobretensiones de origen atmosférico

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. **SI** [X] **NO** *[ ]

***En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).**

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Guido Godínez Zamora.

Número de Carné: B08174 Número de cédula: 1-1227-0802.

Correo Electrónico: guido.godinezzamora@ucr.ac.cr.

Fecha: 03/11/2020 .Número de teléfono: 8706-3137.

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Gustavo Gómez Ramírez.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1

Introducción

El análisis de sobretensiones en sistemas de potencia, la selección de los dispositivos de protección para estos eventos y la parametrización de la rigidez dieléctrica del aislamiento constituyen los tres pasos tradicionales de la coordinación de aislamiento [1]. La interacción entre dichos procesos surge al aplicar el conocimiento científico a la búsqueda de soluciones técnicamente viables que ayuden a la operación económica, segura y confiable de las redes eléctricas. Para desarrollar esta labor, es estrictamente necesario evaluar las condiciones de operación de los sistemas y establecer la forma en que se modificará su desempeño ante estos eventos transitorios.

Este proceso es de relevancia para las empresas distribuidoras de electricidad, las cuales deben mejorar su funcionamiento utilizando redes que típicamente sobrepasan la vida útil de diseño y bajo consideraciones establecidas por los mercados, las políticas energéticas o el marco regulatorio. Para estos sistemas el principal problema en el ámbito de las sobretensiones consiste en mantener la continuidad del servicio en presencia de descargas atmosféricas, debido a que las sobretensiones que surgen de este fenómeno pueden sobrepasar en gran medida la rigidez dieléctrica del aislamiento. En términos socioeconómicos y financieros, los efectos corresponden al impacto sobre la producción de bienes y servicios, la reducción en margen de ganancia por ventas de energía, a los costos de restablecimiento del servicio y a la compensación por bajos índices de continuidad.

Desde la perspectiva ingenieril, el entendimiento de este proceso conduce a la implementación de estrategias que minimizan el riesgo asociados a estas fallas. Esto procesos incluyen: análisis de causa raíz y de ciclo de vida, acciones predictivas, preventivas, correctivas, rediseño, implementación de indicadores de desempeño, la reducción de costos (inversión, mantenimiento y operación) y la maximización de beneficios, ejecutadas mediante una fuerte sinergia entre los procesos productivos, el recurso humano y aspectos tecnológicos.

De esta manera, inicia la construcción de un modelo que contribuye a mejorar el desempeño de los sistemas de distribución ante descargas atmosféricas. Debido a la naturaleza aleatoria inherente al fenómeno y a la estimación de estados en los sistemas, se utiliza un enfoque probabilístico.

1.1. Justificación

Las investigaciones sobre descargas atmosféricas se desarrollan mediante la convergencia de múltiples áreas del conocimiento científico y técnico. De manera simplificada, es posible sintetizar los trabajos actuales en cuatro categorías, las cuales muestran diferentes grados de convergencia. Adicionalmente, algunas son altamente complejas (combinan requerimientos académicos en física, matemática e ingeniería), con requerimientos tecnológicos avanzados y presupuestos de investigación elevados. A continuación, se describen aspectos de importancia en el estudio de descargas atmosféricas.

- **Física y cambio climático:**

  Se trabaja en utilizar tecnologías como el mapeo de muy alta frecuencia para determinar la relación de la actividad intranube de las descargas atmosféricas con estructuras de gran tamaño y el impacto de los rayos en la industria aeronáutica. También, se desarrollan estudios con grandes series de tiempo de actividad atmosférica provenientes de satélites en órbitas geoestacionarias y mediciones en tierra utilizando el método de la resonancia de Schumann para determinar la dependencia de la actividad de rayos con el calentamiento global [2]. Adicionalmente, se desea que el modelo de líderes descententes bidireccionales sea mejorado, debido en gran medida a que la explicación de las intensas emisiones de rayos gama en la tierra (debido a las descargas) dependen del entendimiento de este fenómeno. Finalmente, un nuevo enfoque de investigación podría surgir, si se combinan las teorías de líderes descendentes con la influencia del calentamiento global en la creación de tormentas, incluso algunos investigadores trabajan sobre el proceso con el cual inicia la formación los líderes descendentes [3].

- **Parámetros característicos:**

  Continua el mejoramiento del modelo de pulsos electromagnéticos producidos por rayos y la discusión sobre los parámetros estandarizados [4]. En este apartado se trabaja en considerar las variaciones de velocidad que existen entre el primer retorno corriente y los golpes subsecuentes y sobre la amplitud de campos electromagnéticos irradiados por una descarga atmosféricas [5] . Por otra parte, se plantea la necesidad de establecer parámetros a nivel geográficas, debido a variación espacial y temporal registrada en diferentes puntos de medición y las desviaciones con parámetros estadísticos publicados. En este apartado se tiene el inconveniente de que la mayoría de impactos registrados por torres no registran los golpes subsecuentes al primer retorno, por lo que se requiere desarrollar instrumentos muy específicos para ser instalados en campo [6, 7]. También, se considera necesario extender la lista de parámetros estandarizado mediante la inclusión de la actividad intranube, debido a su importancia en los sistemas de detección. Adicionalmente, para el tema de parametrización se plantea la necesidad de implementar técnicas para optimizar y calibrar los sistemas de detección y medición con equipos y el surgimiento de programas muy especializados [8, 9].

- **Protección de sistemas eléctricos de potencia:**

  Se trabaja en mejorar el cálculo de sobretensiones utilizando técnicas numéricas avanzadas para el modelo electromagnético [10, 11]. También, se desea mejorar los modelos para sobretensiones inducidas para redes de distribución, principalmente por la dificultad de incorporar de manera eficiente las variaciones geográficas del terreno, la influencia de edificios o estructuras altas alrededor de líneas y el costo computacional que todo esto requiere. Además, se estudia el impacto de los rayos sobre sistemas de energía renovable y su influencia sobre equipos altamente sensibles a la compatibilidad electromagnética, así como, sobre el funcionamiento de las redes inteligentes [10, 12, 13]. Finalmente, se requiere desarrollar modelos que incluyan las tasas de fallas de líneas de distribución con descargadores de sobretensión y es recomendado que dichas tasas sean consideradas a diferentes niveles de tensión, localización geográfica y consideraciones operativas de la redes eléctricas [14, 15].

- **Efecto de rayos en personas e impacto social:**

  Se realizan esfuerzos para incorporar políticas de prevención para contrarrestar fatalidad generadas por rayos en personas, edificios o monumentos con carácter arquitectónicos o cultural. Se implementan nuevos tratamientos médicos para la atención de personas afectadas [16].

Un conocimiento integral de estas categorías es fundamental para desarrollar trabajos sobre el vínculo entre descargas atmosféricas y sistemas de potencias. Evidentemente, el grado de interacción entre grupos tienen diferentes niveles. En el caso se los sistemas de distribución de energía, esta interacción se relaciona con la posibilidad de proyectar niveles de actividad de descargas en diferentes regiones, estimar de sobretensiones, evaluar sistemas de protección y prevenir accidente, principalmente para el personal técnico. No obstante, existe un reto inherente de implementación, el cual debe buscar un balance entre la aplicación práctica y la profundidad académica, la cual termina siendo bastante amplia.

Actualmente, están surgiendo herramientas que de manera progresiva se están adaptando a condiciones realistas de las redes de distribución y se encuentran principalmente enfocadas a la estimación de sobretensiones. No obstante, no logran capturar condiciones de funcionamiento de los sistema. Este requerimiento ha crecido en interés debido a que los métodos tradicionales bajo los cuales trabajan las redes de distribución están siendo remplazados por el impulso de las redes inteligentes y transición tecnológica que enfrenta el sector eléctrico.

Por tanto se considera trascendental desarrollar una investigación sobre como mejorar el desempeño de sistemas de distribución ante estos eventos atmosféricos, considerando la importancia de incluir condiciones reales de operación. Lo anterior, debe conducir al desarrollo de una metodología que complemente las investigaciones vigentes y otras áreas del conocimiento científico. Este tipo de soluciones son innovadoras, aportan al estado del arte y deben ser construidas bajo un enfoque modular que promueva su expansión, mantenibilidad y robustez.

1.2. Planteamiento del problema

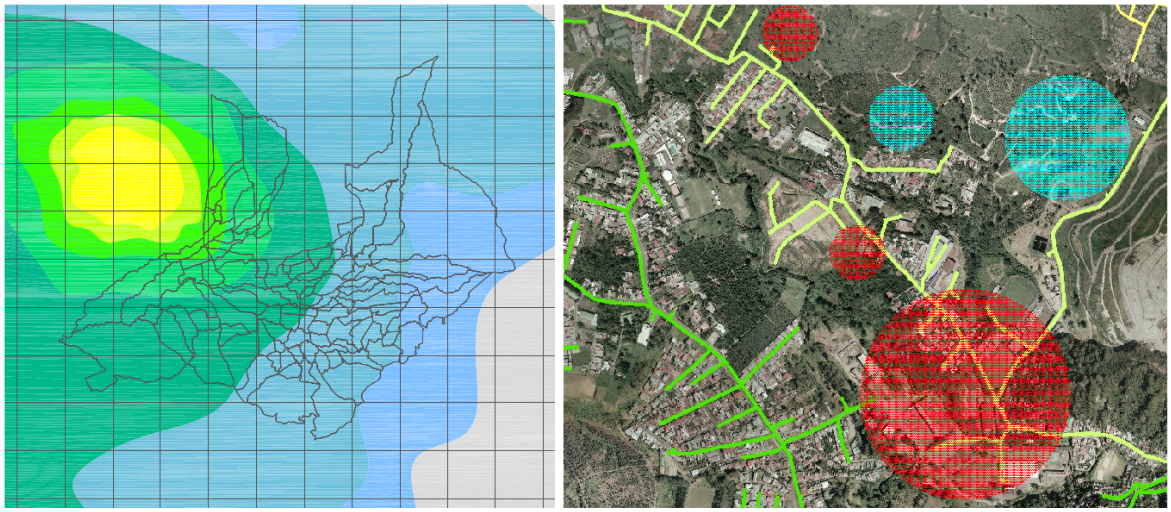


Figura 1.1: Representación de la interacción entre descargas atmosféricas y redes de distribución *(Elaboración propia)*

Basados en información expuesta en la sección anterior, se plantea que este trabajo se alinea con las investigaciones destinadas a la protección de sistemas de potencia considerando un nuevo enfoque. Para ilustrar el problema se utiliza la figura 1.1. A la izquierda se ubica un mapa de densidad de descargas atmosféricas particular, para una región geográfica del área metropolitana de Costa Rica, que ha sido dividida en cuadros mas pequeños de 5 x 5 km. Este tipo de mapas presentan variaciones espaciales y temporales, y contemplan una colección de datos vinculados a los parámetros de cada evento. A la derecha se muestra un acercamiento de una zona específica de la misma con dimensiones reales de 1,4 km x 1.7 km, en la que se muestran segmentos de dos alimentadores de media tensión, relieves en la superficie, obras civiles y vegetación entre otras. Sobre esta última imagen se han representado las zonas de influencia generadas por cinco impactos de rayos nube a tierra. De esta manera se tiene la siguiente premisa: Existe un nivel de actividad atmosférica en una región determinada que corresponde a una colección de eventos aleatorios, los cuales interactúan con sistemas eléctricos que están dispersos sobre dicha región bajo consideraciones topológicas variables y condiciones de operación particulares (también aleatorias). Ante este proceso se desea conocer a nivel sistémico: la magnitud de la sobretensiones que se generan sobre la red, la cantidad de fallas que surgen, la respuesta del aislamiento y dispositivos de protección, los tiempos de restablecimiento y el impacto respecto a costos. Con este panorama surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el riesgo que generan las sobretensiones de origen atmosférico sobre la operación de los sistema de distribución de energía eléctrica?

1.3. Hipótesis de solución

En general, el problema de coordinación de aislamiento y la evaluación del desempeño de los sistemas de potencia frente a sobretensiones se desarrolla considerando los datos que se tengan disponibles. Dicho el análisis puede ser ejecutado aplicando un modelo determinístico que toma como referencia los procedimientos de normas internacionales, o bien, mediante un método estadístico, en el cual se utiliza principalmente el método de Monte Carlo para determinar el riesgo de falla en un entorno de simulación.

El primer método brinda información general del funcionamiento de las redes eléctricas ante sobretensiones, considerando una tasa de falla predeterminada y partiendo de la capacidad de los dispositivos de protección seleccionados. El segundo método además de brindar resultados más precisos, permite incorporar una variable representativa de pérdidas económicas, con lo cual se puede generar una clasificación espacial para identificar las regiones o segmento de red con mayor impacto. Adicionalmente, este método tiene gran potencial para funcionar como herramienta de decisiones y acoplarlo a un modelo de optimización a largo plazo, en una solución que incluye expansión de la red y rediseño. No obstante, es un poco limitada para solucionar una componente de operación en tiempo real, la cual depende de un procesamiento de datos más detallado y se requieren tiempos de simulación muy bajos.

Otras alternativas para la evaluación del desempeño de sistemas de potencia ante descargas atmosféricas se han desarrollado empleando redes neuronales, con las cuales también se realizan análisis espaciales. Esta técnica muestra gran potencial para un procesamiento más rápido de datos, una vez ejecutado el trabajo previo de entrenamiento, el cual requiere una infraestructura adecuada para la adquisición y procesamiento de datos.

Actualmente, se considera que el enfoque estadístico y el uso de redes neuronales, constituyen la referencia moderna para este tipo de análisis, aunque se utilizan principalmente para la etapa de diseño. El procedimiento consiste en realizar el producto entre la función densidad de sobretensiones y una distribución del soporte de aislamiento, incluyendo valores promedio de pérdidas monetarias al resultado como complemento. En este punto se identificó un aspecto de mejora, el cual consiste en incorporar un modelo de confiabilidad operativa a dicho análisis para mejorar de manera sistemática el desempeño de los sistemas ante sobretensiones de origen externo, mediante el establecimiento de indicadores. De esta manera, se planeta la siguiente hipótesis:

"Mediante la construcción de un modelo probabilístico de confiabilidad operativa basado en análisis de riesgo, se podrá estimar de manera adecuada el desempeño de redes eléctricas ante sobretensiones de origen atmosférico y permitirá mejorar la toma de decisiones para minimizar el impacto de dichos eventos".

1.4. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es:

"Desarrollar una estructura conceptual y una herramienta tecnológica, mediante el análisis de procesos estocásticos y la implementación de algoritmos computacionales, que contribuya al mejoramiento de la confiabilidad operativa de redes de distribución frente a sobretensiones de origen atmosférico"

Para cumplir con el objetivo general se han planteado los siguientes cuatro objetivos específicos.

- Desarrollar un programa computacional para el cálculo de sobretensiones de origen externo en sistemas de distribución, utilizando datos de una red de detección de descargas atmosféricas, sistemas información geográfica y tomando como referencia programas de transitorios electromagnéticos y de sobretensiones inducidas.
- Desarrollar un modelo probabilístico y herramienta informática para la estimación de la confiabilidad, mantenibilidad e indisponibilidad que producen las descargas atmosféricas en los sistemas de distribución, así como, su impacto.
- Construir una herramienta computacional para la estimación y clasificación topológica los niveles de criticidad en sistemas de distribución eléctrica, basado en el riesgo inherente que producen las sobretensiones por descargas atmosféricas.
- Realizar una implementación de las herramientas desarrolladas en el sistema de distribución real, ubicado en el área metropolitana de Costa Rica y administrado por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, como primera aplicación a la industria.

1.5. Metodología

En la figura 1.2 se muestra de manera conceptual la propuesta a desarrollar. Ineludiblemente un análisis de este tipo también tiene consideraciones asociadas a los procesos productivos de los sistemas, el recurso humano y las aplicaciones tecnológicas disponibles.

Se parte de un procesamiento de datos históricos, proveniente de los sistemas de monitoreo de descargas atmosféricas, el sistema de información geográfica y los registros del SCADA. También, considera una análisis de las características dieléctricas del aislamiento instalado, el esquema de protección proporcionado por descargadores de sobretensión, costos operativos o de mantenimiento y el comportamiento de las ventas de energía. Con dicha información se procede a establecer probabilidades vinculadas a la confiabilidad operativa y los indicadores técnicos y económicos. Finalmente, un análisis de riesgo operativo. De esta manera, el modelo puede ser aplicado en labores de planeamiento operativo con información interanual o bien para labores de planificación de largo plazo.

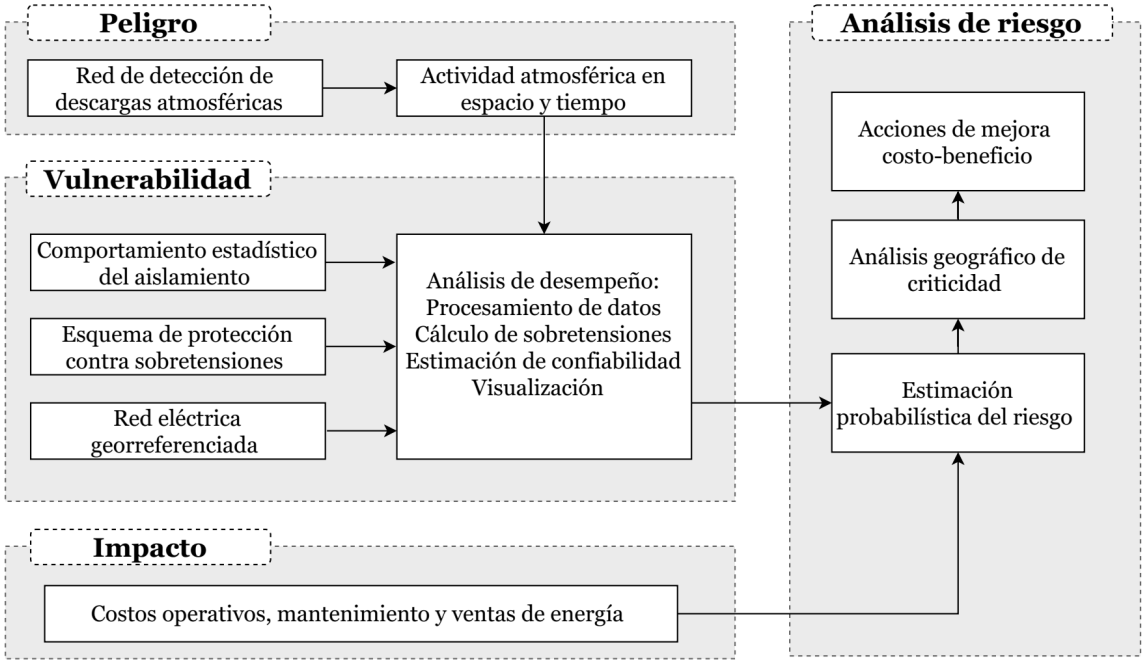


Figura 1.2: Modelo propuesto para analizar la confiabilidad operativa
(Elaboración propia)

Para desarrollar el trabajo se cuenta con información relacionada a descargas atmosféricas, modelos para estimar sobretensiones en redes de distribución, modelos de confiabilidad con variaciones estacionales, normas para caracterizar el aislamiento eléctrico y los esquemas de protección. También, existen metodologías comprobadas para desarrollar gestión en ingeniería considerando el concepto de confiabilidad operativa y diversas aplicaciones de este concepto en la industria eléctrica.

Para realizar las herramientas computacionales se han seleccionado el sistema de información geográfico QGIS y el lenguaje de programación Python. Ambos programas son de código abierto y han demostrado ser una combinación muy poderosa. Adicionalmente, para el cálculo de sobretensiones se tomarán como referencia los programas Alternative Transient Program (ATP) y Lightning Induced Overvoltage (LIOV), los cuales son programas de dominio público y ampliamente utilizados en este campo. Finalmente, se ha seleccionado el método de Monte Carlo para desarrollar el modelo, con el cual se podrán generar escenarios para la toma de decisiones, los cuales serán complementados con la técnica de agrupamiento K-means y visualizaciones con diagramas de Voronoi. Una etapa adicional, incluye la aplicaciones de análisis de costos y beneficios.

1.6. Contribuciones

Actualmente, el procedimiento de la coordinación de aislamiento tiene tres etapas claramente definidas y con muy buen desarrollo: estimación de sobretensiones, definición del sistema de protección y parametrización de aislamiento, las cuales se aplican principalmente en la etapa de diseño. No obstante, tiene un reto u oportunidad de mejora en cuanto a valorizaciones económicas o financieras y en la formulación de planes estratégicos para la gestión de fallas. Por otra, los análisis de confiabilidad permiten definir ese tipo de estrategías mediante el análisis de fallas y tiempos de restitución, la cuantificación de indicadores y cálculo de riesgo. Sin embargo, requieren una adecuada estimación de las causas de falla. La figura 1.3 muestra los procesos generales de cada área, sus retos y oportunidades.

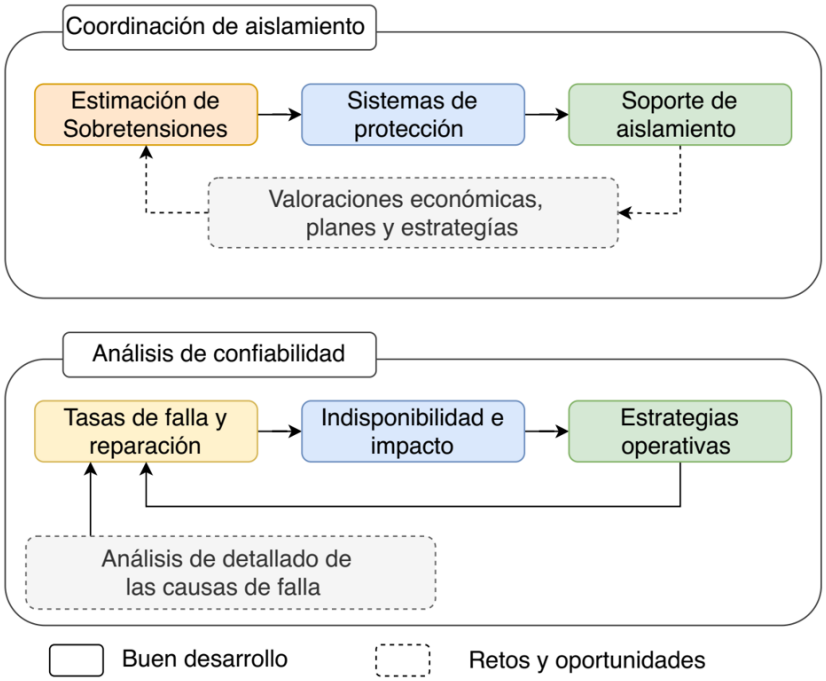


Figura 1.3: Estructura actual y oportunidades de mejora de la coordinación de aislamiento y los análisis de confiabilidad

(Elaboración propia)

En este trabajo se realiza un aporte metodológico, en el cual se proporciona una nueva alternativa para cerrar el ciclo de coordinación de aislamiento, mediante la incorporación del concepto de confiabilidad operativa. El mismo, surge de la naturaleza complementaria de ambos procesos y ha sido diseñada para favorecer la administración del funcionamiento de sistema de distribución. Su desarrollo contempla una base conceptual y una herramientas computacional de código abierto que permitirá realizar este tipo de análisis en empresas de distribución. Adicionalmente, se proporciona una primera implementación industrial, que proporciona evidencia y permitirá guiar futuras aplicaciones.

La estructura generada impulsarán proyectos futuros, como el análisis de riesgo de sistemas de generación distribuida frente a descargas atmosféricas y la evaluación del funcionamiento de redes inteligentes en épocas de tormenta eléctricas, entre otros. Estudios complementarios sobre otros modos de fallas (en especial, los relacionados a eventos climáticos) podrán ser analizados mediante una metodología similar.

1.7. Estructura del trabajo y productos a desarrollar

- El **capítulo 2** sintetiza investigaciones previas, la cual parte de una perspectiva histórica y culmina con el estado del arte de los estudios actuales que vinculan la confiabilidad de los sistemas de distribución con las sobretensiones de origen atmosférico.
- En el **capítulo 3** se presentan los fundamentos teóricos del trabajo. Incluye los modelos y conceptos particulares que serán empleados en los algoritmos a desarrollar. Adicionalmente, incluye el marco normativo utilizado en la tesis. Información específica se brinda en cada uno de los capítulos posteriores.
- En el **capítulo 4** se desarrollará el programa para estimar sobretensiones máximas inducidas y por impacto directo en sistemas de distribución, utilizando el modelo de Rusk y tomando como referencia simulaciones en el dominio del tiempo realizadas ATP y LIOV. Este capitulo incluye la explicación del algoritmo y la implementación en el sistema de prueba.
- Para el **capítulo 5** contempla el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema. La componente base es la aplicación de cadenas de Markov para estimar las probabilidades de que los elementos de control y el concepto de probabilidad condicional. En este apartado también se incluye la aplicación del módulo sobre el sistema de prueba
- El **capítulo 6** será destinado al desarrollo del modelo para evaluar el riesgo y clasificar segmentos de redes de acuerdo al nivel de criticidad. Este módulo combina los resultados de los dos capítulos anteriores y se basa en la utilización de un Monte Carlo, técnicas de agrupamiento K-means y visualizaciones con diagramas de Voronoi. Finalmente, el módulo también se aplica al sistema de prueba.
- En el **capítulo 7** se presenta un análisis complementario de costos-beneficio, en el cual se utiliza la evidencia obtenida en el proceso de implementación con el fin de establecer un panorama actual y futuro, en el que se plantean acciones de mejora.
- En el **capítulo 8** se presentarán una discusión de resultados, las conclusiones, contribuciones y trabajos futuros que surjan de esta tesis.
- Una sección de **Anexos** brindará información complementaria a cada uno de los módulos.

Para la ejecución del trabajo se propusieron actividades y productos. La tabla 1.1 presenta una síntesis de este proceso, el cual conduce a la elaboración de programas específicos enlazados a los objetivos del apartado 1.4. Al final, todas las herramientas son integradas en una solo plataforma y un repositorio, con el fin de que sean transferidas.

Tabla 1.1: Actividades y productos a desarrollar durante la investigación

Síntesis Objetivos	**Actividades**	**Productos**
Caracterización de descargas atmosféricas y sobretensiones	Se desarrolla el algoritmo para procesar los datos provenientes de la red de descarga atmosféricas y la un sistema georeferenciado. Se parametriza de manera probabilística las descargas atmosféricas y las sobretensiones del sistema	Programa en Python: Módulo de sobretensiones
Estimador de confiabilidad	Se desarrolla el algoritmo para procesar datos provenientes de un sistema SCADA y calcular la confiabilidad, mantenibilidad, tasas de falla e impacto de las salidas por sobretensiones externas al sistema	Programa en Python: Módulo de confiabilidad
Análisis de riesgo probabilistico	Se desarrolla el algoritmo para desarrollar un análisis de riesgo probabilístico combinando los módulos de sobretensiones y confiabilidad	Programa de Python: Moduló de Análisis de riesgo
Caso de estudio: Sistema CNFL	Aplicar las herramientas desarrolladas en un sistema real, brindar un análisis de resultados y proponer acciones para mejorar la relación costo-riesgo-beneficio del sistema.	Documentación del caso bajo estudio

Capítulo 2

Antecedentes y estado del arte

2.1. Antecedentes

A mediados del siglo XVI, Benjamín Franklin desarrolló el primer estudio sistemático sobre descargas atmosféricas. La aplicación de su conocimiento lo condujo a la invención del pararrayos, demostrando que una interpretación práctica de la ciencia podía conducir al dominio de las grandes fuerzas de la naturaleza. Los principios conceptuales de la electricidad surgieron como parte de este proceso y desarrollos subsecuentes permitieron el uso de esta manifestación de energía, la cual se consolidó a finales del siglo XIX, cuando la corriente alterna impulsó el desarrollo de la industria moderna. Es en este punto de la historia, cuando existe un incentivo real para obtener conocimiento adicional sobre las descargas atmosféricas, debido a la necesidad de proteger el sistema eléctrico en expansión de la capacidad destructiva de los rayos y garantizar la continuidad del suministro de la energía eléctrica [17, 18].

2.2. Carga y descarga en nubes de tormenta eléctrica

Con respecto al mecanismo de carga en las nubes, las teorías planteadas por Simpson en 1927 y de Wilson en 1929 siguen siendo las de mayor consideración. Ambas teorías, incluyeron la presencia de columnas ascendentes de aire que redistribuyen la carga dentro de la nube y fueron confirmadas por Simpson y Scrase en 1937, cuyos experimentos con globos atmosféricos y medidores de campo eléctrico revelaron cúmulos de carga concentrada en zonas de convergencia con el aire y tres distintas zonas de distribución vinculadas fuertemente con el punto de congelación del agua. [19–22].

La teoría de Simpson, parte de dos demostraciones experimentales; la primera implica que una gota de agua con un radio mayor a 2,5 mm es muy inestable cuando cae a través de una columna de aire ascendente de 8 m/s y la segunda indica que la separación de una gota debido a su impacto contra el aire produce gotas de menor tamaño con carga positiva y una región de aire circundante con carga

negativa. La teoría de Wilson, también sustentada mediante experimentación, considera la existencia de una atmósfera cargada con iones de diferentes cargas y de un campo eléctrico de baja intensidad con dirección positiva hacia la tierra, ante el cual las gotas de agua con tamaños aproximadas a 1 mm son polarizadas. Debido a que el movimiento descendente de estas gotas por efecto de la gravedad, es mayor al de los iones sometidos al campo eléctrico, la gota realiza una acción selectiva en su parte inferior, atrayendo y llevando consigo iones negativos en la caída.

Posteriormente, Simpson y Robinson, en 1941, establecieron que la separación de las cargas positivas y las negativas del cuerpo principal de la nube, toma lugar a temperaturas cercanas a los cero grado centígrados. Lo anterior, indica que el conjunto de las pequeñas gotas de agua, que fueron impulsadas hacia la parte superior de la nube, sufren una cristalización y debido a las múltiples colisiones entre ellas, se presenta un proceso de carga por fricción, en el cual los cristales adquieren carga negativa y ceden su equivalente positivo al aire circundante. Finalmente, las cargas negativas en los cristales de hielo flotan despacio hacia abajo para fundirse y caer como lluvia. Debido a la condición de carga en las nubes, la superficie terrestre y todo lo que esté sobre ella experimenta un proceso de inducción eléctrica. En cuanto a los conocimientos actuales del mecanismo de propagación del rayo, la visión actual es el producto de las investigaciones de Schonland y sus compañeros entre 1934 y 1938 [19–22]. La evidencia experimental reveló que el proceso de ruptura en el campo eléctrico comienza a desarrollarse con un serpentín piloto de baja intensidad, el cual es impulsado desde la nube hacia la tierra ionizando el aire. El avance aleatorio de este canal es acompañado por puntos de luminiscencia, que viajan de manera secuencial y es denominado "líder escalonado", cuya propagación es aproximadamente una veinteava parte del 1 % de la velocidad de la luz y cada desplazamiento tiene una longitud promedio de 50 metros. Una vez que las líneas de fuerza electrostática trazadas por el líder escalonado alcanzan la tierra, gran cantidad de energía eléctrica es liberada súbitamente, causando resplandor en la atmósfera. En este punto, las cargas eléctricas retornan desde la tierra hacia las nubes de tormenta por medio del canal ionizado, hasta su neutralización.

El proceso descrito se conoce como "retorno de corriente" y es caracterizado por intensidades que pueden superar los 100 kA en menos de 10 ms, velocidades cercanas al 10 % con respecto a la luz y temperaturas aproximadas de 3000 K. A su vez, este primer evento promueve descargas internas en la nube y precipitaciones de más golpes hacia tierra, a través del canal original. En el último caso, la velocidad de propagación de los líderes es mayor, con un valor aproximado del 3 % en relación con la luz. Por su difícil detección, se conocen como "líderes de movimiento rápido". Por tanto, está bien establecido que el destello de un rayo es frecuentemente la integración de varios golpes de retorno [23] . Aunque las corrientes involucradas en las descargas atmosféricas difieren en amplitud y forma, siempre se reconoce un impulso inicial y una etapa de amortiguamiento.

Para la parametrización de este evento, las variables más utilizadas son: el pico de corriente, el tiempo de frente de la onda, la duración total del evento, la tasa de levantamiento y la carga

transferida [23,24]. El más completo y extensivo análisis de datos fue realizado por Berger, desde 1936 hasta 1975. Posteriormente, Anderson y Eriksson, en 1979, publicaron nuevos datos basados en las mediciones de Berger y recomendaron su uso para aplicaciones ingenieriles, los cuales siguen teniendo relevancia en la actualidad. Datos adicionales para regiones particulares también han surgido como parte del proceso de investigación; tal es el caso de los publicados en 2004 por Visacro en Brasil o en 2007 por Takami y Okabe en Japón. Estudios con objetivos más amplios se desarrollan mediante el disparo de cohetes a la atmósfera. En 2009, Schoene y compañeros presentan datos de los parámetros característicos del rayo para tres campos de lanzamiento en Estados Unidos y Francia [25].

2.3. Modelos del retorno de corriente

De acuerdo con Cooray, Rakov y Uman, existen cuatro grupos de modelos [25–27]

- **Modelos electrotermodinámicos:**

  Introducidos por Drabkina en 1951 y complementado por Braginski en 1958, como parte de los estudios sobre explosiones repentinas de carga, tales como: chispas, proyectiles supersónicos y rayos. Posteriormente, fue mejorada por Plooster en 1970 y Hill en 1971, dando su estructura tradicional de cinco ecuaciones de conservación de la energía [26]. Su principal desventaja es la incapacidad de adaptarse a la variación espacial y temporal de la corriente del rayo, impidiendo predecir campos electromagnéticos y una corriente base para el canal del rayo, los cuales son parámetros primarios para las aplicaciones ingenieriles.

- **Modelos de circuitos distribuidos:**

  En 1951, Bewley realizó un aporte conceptual al plantear que las nubes de tormenta y la superficie de la tierra formaban un gran capacitor que descargaba de golpe, en el cual el retorno del circuito era completado por el desplazamiento de la carga en el campo eléctrico [21]. Griscom, en 1958, incluyó en el modelo la forma física de la descarga y la fracción de carga transportada por el líder escalonado. Oetzel, en 1968, introdujo un modelo asumiendo elementos agrupados en serie y una corriente constante con una doble función exponencial y considerando un canal cilíndrico de plasma con conductividad finita [21]. Posteriormente, utilizaría una analogía con parámetros distribuidos de una línea de transmisión para ajustar las velocidades de propagación y calcular las diferentes corrientes a lo largo del canal, lo cual es un requisito indispensable para obtener los valores de los campos electromagnéticos.

  Price y Pierce estudiaron el caso en 1977, asumiendo un conductor infinito, pérdidas, uniformidad de la línea y una carga inicial equivalente a la impedancia característica de la línea, mejoraron el realismo de la propuesta anterior [21, 26]. Un modelo más general fue presentado por Little en 1978, al asumir valores de inductancia, capacitancia y resistencia, variando en función de

la longitud; sin embargo, no se incluyeron estudios de campos electromagnéticos [21, 26]. Otra adaptación fue presentada por Amoruso y Lattarulo en 1993, considerando la no uniformidad de una línea de transmisión y una variación exponencial de los parámetros en función de la longitud. Beker en 1990, basado en estudios anteriores, brindó un modelo geométrico del canal de plasma, incluyendo el efecto corona y presentando el golpe de retorno como una onda, propagándose a los largo de una línea transmisión [21, 26].

En 2008, Cooray y Thetethayi publicaron un artículo donde utilizan circuitos distribuidos para examinar la influencia de las constantes de conducción sobre las características de la onda de propagación; para tal efecto, modificaron las ecuaciones telegráficas incluyendo los efectos externos del campo electromagnético. Este se considera el modelo más avanzado en está categoría [27].

- **Modelos de ingeniería:**

  Se dividen en dos tipos: el primero corresponde a los modelos de corriente de propagación, que utilizan la luminosidad del rayo en función del tiempo y el espacio como medida proporcional de la corriente. Norinder en 1939, fue el primero en introducir un modelo asumiendo que la corriente ascendía instantáneamente, conservando la misma amplitud en todo canal, pero solo tuvo éxitos para distancias verticales cercanas a los 20 m [21]. En 1941, Bruce y Golde, integraron observaciones experimentales para calcular campos electromagnéticos a distancia, considerando que la velocidad del golpe en el instante inicial era finita e inferior a la luz y que la amplitud de corriente constante [21]. En 1964, Dennis y Pierce modificaron el modelo anterior al tomar en cuenta dos velocidades de propagación diferentes en función de la longitud del canal; la primera se asocia al instante en el que se establece al canal de plasma y la segunda relacionada con los pulsos de corriente inyectada [25].

  Uman y McLain, en 1969, asumirían que el golpe de retorno podía ser simulado por una serie de pulsos de corriente, propagándose a lo largo de una línea de transmisión uniforme, con una velocidad constante y sin distorsiones; demostrando coherencia con valores medidos estableciendo, la concepción que aún prevalece [23]. Dos modificaciones del modelo surgieron: la primera en 1987 por Rakov y Dulzon y la segunda en 1988 por un grupo encabezado por Nucci. Ambos introdujeron un coeficiente de atenuación que permitía a la amplitud de la corriente variar en función de la altura [23, 26].

  El segundo tipo se denomina generadores de corriente, cuyo postulado principal toma en cuenta la neutralización de la corriente del rayo, adaptando el modelo de línea de transmisión mediante la inclusión de las funciones delta de Dirac y escalón de Heaviside, considerando velocidades de propagación de la luz y la impedancia característica del canal.

  El primer modelo de este tipo fue introducido por Warner en 1956, asumiendo una variación exponencial inversa de la carga eléctrica transferida en función del desplazamiento vertical [21]

y una variación temporal de la corriente por efecto corona Las predicciones permiten describir la disminución de corriente con la altura, pero incluye un tiempo de levantamiento, en el cual la corriente permanece constante en todo el canal. Posteriormente, en 1980, Lin y compañeros introdujeron un modelo que también permitía describir la variación temporal y espacial de la corriente; sin embargo, este no permitía describir el tiempo de levantamiento de la corriente con la altura [21, 23].

En 1985, Heidler publica un modelo llamado "fuente de corriente viajera" el cual, considera el efecto de la corriente de corona por unidad de longitud utilizando la función de Dirac [25–27]. En 1997, el mismo autor incorporó un coeficiente de correlación para modelar el primer golpe de retorno, lo cual ha hecho de este modelo uno de los más utilizados aún en la actualidad. Cooray y compañeros, en 1989, introducen otro modelo de este tipo, tomando en cuenta aspectos físicos de la descarga, permitiendo hacer valoraciones de velocidades de propagación y vínculos de corrientes con radiación electromagnética [26, 27]. Adicionalmente, se aplican las ecuaciones publicadas por Nucci, Diendorfer, Uman y Delfino entre 1990 y 2007, que incluyen los efectos de golpes subsecuentes y expresiones propuestas por Cooray, Montano y Rakov en 2004 que permiten modelar ondas con frentes lentos seguidos de transiciones rápidas [25–27].

- **Modelos electromagnéticos:**

  Basados en las ecuaciones de Maxwell y permiten una solución para la distribución de corrientes y los campos electromagnéticos. Se clasifican en dos técnicas numéricas.

  La primera es conocida como Método de Momentos (MoM) y fue introducida por Van Baricum y Miller entre 1972 y 1973, para analizar en el dominio del tiempo la respuesta de estructuras metálicas delgadas ante campos electromagnéticos [25]. Podgorski y Landt, en 1987, incorporaron avances importantes a este modelo, al tomar en cuenta la no linealidad del proceso en su teoría denominada de antena. Harrintong, en 1968, plantea una solución en el dominio de la frecuencia para analizar la dispersión del campo electromagnético en antenas y otras estructuras metálicas utilizando transformadas de Fourier. De este último método, se comercializan códigos numéricos como NEC-4 [25, 26].

  El segundo método corresponde al de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD). Yee, en 1966, empleó una forma sencilla de discretizar las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial por medio de un sistema de coordenadas cartesianas. El modelo tiene la ventaja de ser fácilmente implementado en computadora para el cálculo de sobrevoltajes inducidos en líneas de transmisión, análisis de campos electromagnéticos del golpe de retorno, el mecanismo de propagación de corriente en conductores verticales y enlaces de campos en la parte alta de edificios [25,26]. En 2008, Rakov y Baba publicaron este modelo en forma de circuitos, incluyendo escalares eléctricos y vectores magnéticos para tomar en cuenta el acoplamiento magnético [27].

2.4. Sobretensiones en sistemas de distribución

Las descargas atmosféricas producen cambios excesivamente rápidos en las condiciones de operación de los sistemas de distribución de electricidad [21, 22]. Dichos eventos se producen por impacto directo a las redes eléctricas o mediante inducción, dependiendo de la forma de las estructuras de soporte mecánico, el conjunto de elementos que las rodean, la geografía del terreno y la intensidad de corriente proporcionada por cada rayo, entre otros.

El modelo electrogeométrico es la herramienta que prevalece para determinar esta interacción. Este supone que existe una distancia crítica entre el extremo de un líder descendente y un objeto a tierra donde el promedio del gradiente de potencial eléctrico iguala al del canal, estableciendo el camino para el retorno. Los primeros modelos fueron introducidos por Golde, Armstrong, Whitehead y Love entre 1945 a 1973. Otros modelos con mayor orientación física fueron propuestos por Rizk, Eriksson, Dellera y Garbagnati entre 1987 y 1996, los cuales constituyen la referencia actual para determinar el nivel de incidencia de los rayos sobre las estructuras y el nivel de apantallamiento que proporciona el medio circundante a las líneas.

La estimación de sobretensiones y el proceso de propagación de energía en una red eléctrica, debido a un impacto directo de un rayo, es modelado por las ecuaciones de onda viajera formuladas por Heaviside (1850-1925), cuya solución típica en el dominio del tiempo se basa en los principios establecidos de D'Alembert (1717-1783) [21, 22]. Una alternativa con mayor orientación práctica consiste en utilizar los modelos de circuitos distribuidos o de ingeniería para la descarga atmosférica, impedancias características del sistema, coeficientes de reflexión y refracción para discontinuidades y factores de acoplamiento magnético entre fases.

Autores como Peterson y Greenwood, en 1958 y 1971, presentaron los primeros textos especializados del tema. En esa misma época inicia el camino para la utilización de computadoras para resolver los problemas de transitorios en sistemas de potencia. Los principios fueron introducidos por Dommel, en su tesis doctoral del Instituto Tecnológico de Munich y en su artículo clásico de IEEE "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks" de 1969, el cual incorpora la regla trapezoidal y el método de Bergeron. La primera versión del Electromagnetic Transients Program. (EMTP) fue desarrollada a inicios de los años ochenta en Bonneville Power Administration (BPA), por Dommel y Meyer.

En 1984, Meyer hizo de dominio público al código fuente del programa bajo la versión Alternative Transients Program (ATP) [28, 29]. Desde entonces, una comunidad científica trabaja en el constante mejoramiento de estas herramientas a nivel matemático y probabilístico, interfaz gráfica e incorporación y parametrización de modelos. Debido a que la probabilidad de impactos directos a estructura se incrementa de manera exponencial con la altura, el uso de este tipo de programas ha cobrado mayor importancia para sistemas de transmisión, orientado al estudio de casos específicos. En sistemas de distribución, no han sido tan populares debido a la inherente complejidad en las topologías

y configuraciones de las redes. Lo anterior se hace evidente al imaginar pulsos electromagnéticos de rayos (LEMP), acoplados a conductores, con una propagación constantemente modificada, debido a múltiples cambios en la impedancia. Ante este panorama, los EMTP son más utilizados para evaluar sobretensiones máximas en puntos específicos y analizar dispositivos de protección. Para la evaluación de sobrevoltajes inducidos, se requiere conocimiento del cambio en los campos electromagnéticos, lo cual se obtiene a partir del modelo del golpe de retorno y su vínculo con el sistema de potencia. Algunos de los aspectos a tomar en cuenta son: la conductividad del terreno, la presencia del hilo guarda, los golpes subsecuentes al primer retorno y el efecto corona. La solución total del acoplamiento electromagnético se obtiene al utilizar las ecuaciones de Maxwell; sin embargo, esto requiere grandes tiempos de computación; por tanto, se utiliza la aproximación con parámetros distribuidos.

El modelo general incluye fuentes externas de campos electromagnéticos correspondientes a la suma de los campos aportados por el canal de retorno y las reflexiones desde el suelo. Los primeros modelos desarrollados para impactos indirectos fueron formulados por Rusck, en 1958, y Chowdhuri, en 1967 [30, 31]. Aunque omiten términos para las fuentes de excitación y consideran el golpe de retorno como un canal vertical, producen resultados válidos y están vigentes en la actualidad.

En el caso de las ecuaciones de Rusk, se describe el potencial máximo al considerar un conductor simple con longitud infinita, extendiéndose sobre un suelo perfectamente conductor, excitado por un escalón de corriente, cuya propagación, a través del canal, se realiza mediante un modelo de línea de transmisión.

El modelo de Chowdhuri utiliza los conceptos descritos por Schonland y modelos de parámetros distribuidos para estimar los campos electromagnéticos del rayo, el acoplamiento entre redes polifásicas y los campos inducidos. En 1965, Taylor, Satterwhite y Harrison presentan un modelo de acoplamiento expresado en términos de corrientes y voltajes inducidos.

Posteriormente, en 1980, Agrawal, Price y Gurbaxani plantearon una solución equivalente en el dominio de la frecuencia. Otra forma de las ecuaciones de acoplamiento equivalente a las de Agrawal y Taylor, es presentada por Rachidi, en 1995, en este modelo las fuentes de excitación son expresadas únicamente por las componentes del campo magnético.

Basados en los conceptos anteriores, se ha impulsado el desarrollado de herramientas de simulación. El programa numérico de mayor éxito es el desarrollado en conjunto por la Universidad de Bologna, Escuela Politécnica Federal de Lausana en Suiza y La Sapienza de Roma, denominado Lightning Induced Overvoltage (LIOV) [30,31], en el cual participaron: Rachidi, Nucci, Ianoz, Mazzetti, Paolone y Petrache. El mismo es de código abierto, ha sido mejorado desde 1996 hasta incluir métodos como los FDTD. No obstante, el programa base se enfoca a evaluar casos específicos de líneas. Con el fin de mejorar el análisis de sistemas reales LIOV, ha sido incorporado a versiones comerciales de programas de transitorios electromagnéticos, con el concepto de conectar eléctricamente un grupo de líneas por medio circuitos de n-puertos. La interfaz más eficiente es la propuesta para el EMTP-RV.

Otras alternativas como el programa YALUK-ATP creado en la Universidad Nacional de Colombia ha mostrado mucho potencial [32].

Para validar los resultados obtenidos en simulaciones digitales de sobretensiones producidas por impactos directos o cercanos a las líneas de distribución, se ha recurrido a la experimentación mediante el lanzamiento de cohetes hacia la atmósfera, con el fin de establecer retorno de corriente y realizar mediciones en redes construidas en los campos de ensayos. Investigadores como Agrawal, Rubinstein y Rachidi, entre otros, encontraron concordancia entre sus modelos y los resultados de las experimentaciones reportados por Barker, entre 1994 y 1997, del Camp Blanding, en Florida [33]. Los ensayos realizados entre el 2000 y el 2003, también permitieron evaluar el funcionamiento de los dispositivos de protección y el comportamiento de redes con distintas configuraciones utilizadas por la industria eléctrica.

El esfuerzo en esta dirección ha permitido mejorar en gran medida los estudios de coordinación de aislamiento, cuyo método estadístico se orienta a la estimación de la probabilidad de fallas, en relación con el valor del sistema a proteger o los costos que generan dichos eventos. En la actualidad, el método de Monte Carlo constituye el medio más utilizado para calcular dicha probabilidad, en programas como LIOV y los EMTP o bien mediante algoritmos implementados por diferentes investigadores. Para la valoración de las pérdidas producidas por dichas fallas, es usual utilizar el concepto de riesgo e incorporar, según se requiera, los daños a seres vivos, los daños a estructuras y la pérdida de servicio entre otros [34]. De los tres grupos mencionados, el tercero es el que presenta mayor incertidumbre y se relaciona con la confiabilidad de los sistemas de potencia.

2.5. Confiabilidad en sistemas de distribución

La confiabilidad expresa la probabilidad de supervivencia de un elemento o sistema en un tiempo finito, bajo condiciones de operación normales. En el caso de un sistema de distribución de electricidad, los criterios de falla se relacionan con la calidad del servicio. Los problemas vinculados son: interrupción del suministro de energía eléctrica, problemas de regulación de tensión, desbalance de tensión, sobrecarga de conductores y distorsión armónica entre otros.

Los primeros avances notables en el área fueron aportados por Billinton y compañeros, en las décadas de los 80's y 90's [35, 36]. Sus aportes incluyen aplicación de métodos analíticos basados en cadenas de Markov y técnicas de simulación utilizando el método de Monte Carlo, los cuales constituyen el punto de partida para este tipo de análisis y siguen teniendo vigencia [37].

En el ámbito de la continuidad del servicio y bajo el concepto convencional de confiabilidad, dicha probabilidad se calcula para el límite estable del proceso de fallas y reparaciones, sobre el periodo de vida útil de los sistemas, considerando dicho proceso como estacionario. Lo anterior, constituye una herramienta muy útil para el proceso de planificación de sistemas eléctricos. Desde la perspectiva

operativa, el enfoque es más dinámico, ya que toma en cuenta una componente transitoria en las tasas de falla y reparación, la condición del sistema en cuanto a configuración, niveles de carga, elementos interconectados, efectos ambientales, el ciclo de vida de los componentes, aspectos económicos y técnicas para minimizar el riesgos específicos, entre otros.

Diferentes estudios se han desarrollado en esta dirección como los publicados entre 2010 y 2017 por Sun, Qin, Liang, Thapa, Billinton y otros investigadores [38–41] en los cuales se presentan un modelo para estimar la tasas de fallas en sistemas de potencia condicionado a la cargabilidad de equipos, la estabilidad de tensión, el control de frecuencia y la penetración de sistemas eólicos en sistemas de transmisión.

Para sistemas de distribución, los estudios actuales se enfocan en analizar la confiabiliad operativa considerando generación distribuida. Por ejemplo, en 2014, Xu, Mitra y compañeros [42], presentaron un estudio para evaluar microredes con un modelo de fallas de corto plazo. Comprobaron la influencia de las condiciones operativas en la frecuencia y duración de fallas y mediante el modelo propuesto se podía evaluar el efecto de acciones incorrectas del sistema de protección. Sin embargo, el trabajo no contemplaba los efectos de fallas causadas por múltiples efectos, consideraba un tiempo de reparación específico y no profundizaba en los modelos de mantenibilidad.Para este último apartado, el trabajo publicado por Crespo y Parra, constituye una excelente referencia [43]. Dicha publicación contempla una metodología general con múltiples técnicas de mantenimiento y confiabilidad, como la jerarquización por criticidad y optimización costo beneficio, enfocada en la gestión de activos.

Un desafío adicional en el ámbito de la confiabilidad, nace cuando se requiere valorar el impacto de causas específicas sobre la frecuencia y duración de fallas y su consecuente impacto financiero para las empresas distribuidoras. Lo anterior ocurre, por la dificultad que representa establecer con certeza dichas causas, principalmente si estas son exógenas. Dentro del ámbito de acción mencionado, destaca la necesidad de evaluar el comportamiento de sistemas de distribución ante la presencia de tormentas eléctricas.

En general, los estudios que han abordado este tema se enfocan en el modelado y correlación de condiciones ambientales y parámetros de las descargas atmosféricas con la respuesta y la condición del sistema. A continuación, se muestran de manera cronológica una síntesis de algunos estudios desarrollados en los últimos años, considerando además los aplicados a redes de trasmisión.

Se iniciará haciendo referencia al estudio de Diendorfer publicado en 2001 [44], en el cual correlacionan salidas de líneas de transmisión con datos capturados con un sistema de localización de descargas atmosféricas, considerando un espaciamiento de 5 km, un modelo electrogeométrico y una función log-normal para intensidades de corriente. Aunque la idea inicialmente parecía prometedora, no consiguió grandes coincidencias entre datos.

Entre 2001 y 2002, Martínez, Castro y González [45,46] presentaron investigaciones para evaluar el desempeño de líneas de transmisión y distribución ante sobretensiones de origen externo, basados en

el método de Monte Carlo, considerando parámetros de líneas, resistencias del suelo, distribuciones de probabilidad para la corriente, el tiempo de cresta de las descargas y modelos como el de Chowdhuri y Rusk. En uno de los estudios se desarrolló un procesamiento adicional con redes neuronales para mejorar la velocidad de las simulaciones y el cual es sugerido en casos donde los modelos desarrollados son muy sofisticados; no obstante, dicho concepto no ha sido utilizado de manera masiva.

En 2003, Lambert y compañeros [47] formalizaron un método para predecir la tasa de fallas en líneas de transmisión protegidas con descargadores de sobretensiones externas, mediante la ampliación de un análisis de riesgo, el cual consistía en estimar el número de impactos capturadas por una línea aérea y evaluar las sobretensiones originadas sobre aparatos, empleando un modelo electrogeométrico tridimensional, probabilidades de intensidades de corriente, valores de densidad de corriente y un método de confiabilidad de primer orden. En ese mismo año, Williams [48] presenta un estudio basado en un análisis de Máximo Verosimilitud, para normalizar los índices de confiabilidad, considerando las variaciones del clima en periodos mensuales y anuales, ligando salidas con causas desconocidas de sistemas con descargas atmosféricas y velocidades de vientos.

Entre 2004 y 2005, Balijepall y compañeros [49–51] publicaron tres estudios basados en el método de Monte Carlo para modelar y analizar la confiabilidad en sistemas de distribución, considerando niveles mínimos de continuidad impuestos por los entes reguladores y la influencia de las tormentas eléctricas. Para estas últimas, se establecieron funciones de distribución empíricas para las densidades de descargas y mediante ecuaciones proporcionadas por IEEE una década anterior, estimaron la cantidad anual de fallas en un sistema con un nivel de aislamiento específico. Los resultados se compararon con los índices de confiabilidad del sistema y de esta manera se estableció el aporte que generaban las tormentas eléctricas a dichos indicadores.

En 2005 y 2006, Billinton y Achara [52,53] presentaron un modelo estimulado, utilizando cadenas de Markov, para evaluar condiciones normales, adversas y extremas del medio ambiente en la confiabilidad de los sistemas de transmisión y distribución de energía, que no incluir este tipo de segmentación conduce a resultados optimistas o engañosos.

Entre 2006 y 2009, Borriquete y compañeros [54–56] presentaron un estudio basado en la técnica de Monte Carlo para correlacionar salidas en redes de distribución con información proveniente de sistemas de localización de descargas atmosféricas, cuya exactitud contempla una zona elíptica de influencia. Se estableció que si dicha zona incluía una línea, se estimaban las sobretensiones directas e indirectas mediante los programas LIOV-EMTP y eran comparadas con el nivel crítico de flameo.

En 2010, Liu y Singh [57] presentan un método para evaluar la confiabilidad de sistemas complejos mediante procesos de Markov y el método de mínimos cortes, considerando fluctuaciones en el clima. Por otra parte, Miyazaki y Okabe [58] presentaron un estudio experimental para calcular la tasa de fallas de sistemas, debido a descargas atmosféricas e incorporando el efecto de los descargadores de sobre tensión.

Un artículo publicado por Alverja y Sölder, en 2011 [59], presenta un modelo de confiabilidad que incorpora el comportamiento estocástico de la intensidad y duración de cambios climáticos en las tasas de fallas y el periodo de restablecimiento de los sistemas, esta última variable no había sido incorporada hasta este estudio. Este modelo considera principalmente la combinación de las velocidades del viento y la densidad de descargas atmosféricas, mediante una simulación basada en el método de Monte Carlo.En ese mismo año, un grupo de trabajo de IEEE normalizó los índices de confiabilidad, considerando la correlación de los indicadores clásicos con parámetros climáticos [60].

En 2013, Mikropoulos y Tsovilis [61] presentaron un método estadístico con Monte Carlo para evaluar el comportamiento de líneas de distribución, considerando algunos modelos presentes en la IEEE 1410:2011, como el de acoplamiento electrogeométrico propuesto por Eriksson, una extensión de la ecuación de Rusk generada por Darveniza para sobretensiones inducidas y la expresión para sobretensiones por impacto directo dependiente de la densidad de descargas atmosféricas. El aporte del estudio, con respecto al estándar mencionado, consiste en brindar un margen para la tasa de fallas y la inclusión de una distribución de corrientes de cresta.

Basado en la misma técnica de simulación, Shariatinasab y compañeros presentaron, en 2014 [62], un análisis para líneas de transmisión con la particularidad de contar con un proceso iterativo entre los programas Matlab y EMTP. El estudio se enfocaba también a determinar los descargadores de sobretensiones a partir de una vida útil media. Aplicaciones más académicas también han surgido como propuestas para determinar esquemas de protección en sistemas eléctricos, como el trabajo de Araújo y compañeros, en 2015 [63], en el cual se implementa la ecuación de Rusk en Simulink para estimar sobretensiones inducidas y determinar la localización de descargadores de sobre tensión en el alimentador de 13 nodos de IEEE.

También en 2015, se presentaron los resultados de otro estudio desarrollado de manera conjunta entre la empresa distribuidora AES Sul de Brasil y las universidades de Itajuba y Bologna, en el cual trabajaron Borriquete y Nucci entre otros [64], utilizando un modelo de Monte Carlo y códigos en LIOV-EMTP-RV, para calcular sobretensiones externas, estimar una tasa anual media de fallas y evaluar la distancia entre descargadores de sobre tensión.

Finalmente, análisis de riesgo para sistemas de transmisión y distribución, considerando condiciones operativas, protecciones, condiciones climáticas adversas y descargas atmosféricas fueron publicados por Kezunovic y compañeros, entre 2013 y 2016 [65–68]. El enfoque desarrollado en estos trabajos es muy novedoso al incorporar conceptos de “Big Data” como redes neuronales y lógica difusa aplicados a la gestión de sistemas eléctricos de potencia.

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

3.1. Sobretensiones de origen atmosférico

El estudio de la física del rayo ofrece una amplia gama de problemas complejos por solucionar, que incluyen: ciencias de la atmósfera, física del plasma y electromagnetismo, los cuales se vinculan al proceso dinámico de carga y descarga de las nubes de tormenta. En el ámbito de la ingeniería eléctrica, el enfoque consiste en simplificar dicha física mediante modelos con orientación práctica, considerando las variables más representativas de este fenómeno, para proteger los sistemas de potencias frente a las sobretensiones que provocan.

En general, se parte de una concentración de datos o densidad de descargas atmosférica, que se distribuye de manera espacial en un área determinada, variando en función del tiempo, en periodos determinados o de manera estacional. Cada evento sobre esta distribución, contiene información para generar una señal impulsiva o de frente rápido, modelada por una función de probabilidad dependiente de la intensidad y el tiempo de levantamiento.

Respecto a la parametrización espacial y temporal, se utilizan los niveles de densidad de descargas atmosféricas, ubicación especifica de impactos en zonas geográficas, los procesos no homogéneos de Poisson o distribuciones mensuales de impactos. La selección de estos modelos, típicamente esta sujeta a las características de los estudios que se realicen. En cuanto a los parámetros del evento, el principal es la intensidad del retorno de corriente. Existen muchas otras para modelar este fenómeno, pero se encuentran limitadas principalmente a la precisión que tienen los sistemas de detección o monitorio de rayos. Por tanto, en algunos casos para completar las entradas de los modelos es necesario recurrir a datos estandarizados y relaciones experimentales. Lo anterior, es utilizado en variables como: el tiempo de frente, las relaciones para los tiempos de decaimiento o cola, las velocidades de retorno y algunos coeficientes de correlación, entre otros. Para cada evento se define una señal tipo impulso de acuerdo a una función de probabilidad (generalmente logarítmica)

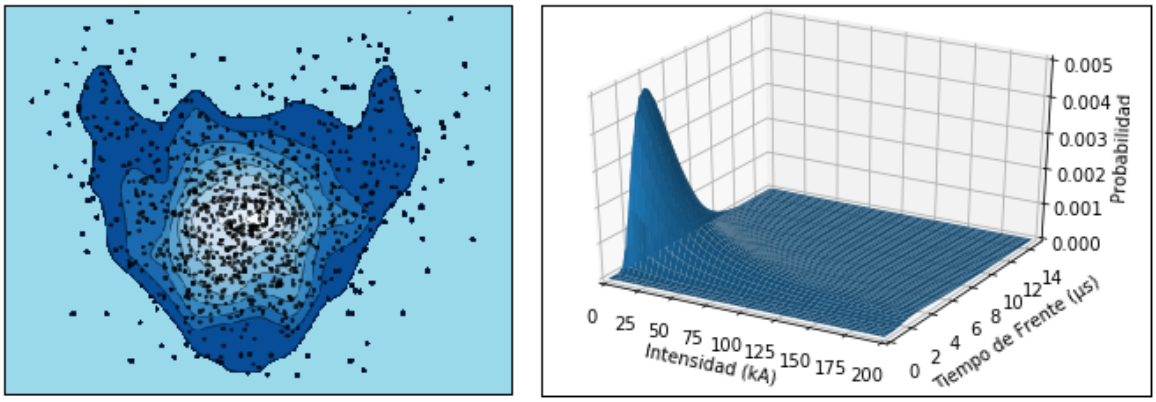


Figura 3.1: Histograma 3D para densidad de descargas atmosféricas (Izquierda) y función probabilidad Lognormal para intensidad y tiempo de cresta (derecha)
(Elaboración propia)

En la figura 3.1 se presentan de manera gráfica algunos de los modelos empleados, en este caso densidad basados en histogramas y parámetros de una señal tipo impulso. De esta manera, la parametrización de una descarga atmosférica se construye mediante la combinación de múltiples variables aleatorias. En modelos simplificados se considera únicamente el efecto del primer impulso de las descargas, aunque se conoce que en general un rayo es el producto de múltiples eventos.

Para estimar la probabilidad de ocurrencia de una cantidad de descargas atmosféricas en una zona determinada $(N = k)$ en un intervalo de tiempo fijo $(0, t)$, se utiliza la función de probabilidad descrita en 3.1. Donde, $\mu(t)$ es una función no lineal que brinda información de la variación estacional de la actividad atmosféricas [1,45].

$$P(N_t = k) = \begin{cases} \frac{(\mu(0,t))^k e^{-\mu(0,t)}}{k!} & \mu(0,t) < \infty \\ 0 & \mu(0,t) = \infty \end{cases} \tag{3.1}$$

Por otra parte, para estimar la probabilidad de una señal tipo impulso asociada a cada descarga atmosférica se emplea la siguiente función densidad 3.2. En la cual, I es la intensidad de corriente de la descarga, t_f es el tiempo de frente del impulso, $\sigma_{ln(I)}$ y $\sigma_{ln(t_f)}$ son las desviaciones estándar y ρ es el coeficiente de correlación. En caso de que el coeficiente de correlación no sea estadísticamente representativo, se pueden utilizar las funciones Logarítmicas normales de manera desacoplada. [45,46].

$$p(I, t_f) = \frac{1}{(2\pi)(I \cdot t_f)(\sigma_{ln(I)} \cdot \sigma_{ln(t_f)})\sqrt{1-\rho^2}} \cdot$$
$$exp\left[\frac{-0,5}{(1-\rho^2)}\left\{\left(\frac{ln(I) - ln(\bar{I})}{\sigma_{ln(I)}}\right)^2 - 2\rho\left(\frac{ln(I) - ln(\bar{I})}{\sigma_{ln(I)}}\right)\left(\frac{ln(t_f) - ln(\bar{t_f})}{\sigma_{ln(t_f)}}\right) + \left(\frac{ln(t_f) - ln(\bar{t_f})}{\sigma_{ln(t_f)}}\right)^2\right\}\right] \tag{3.2}$$

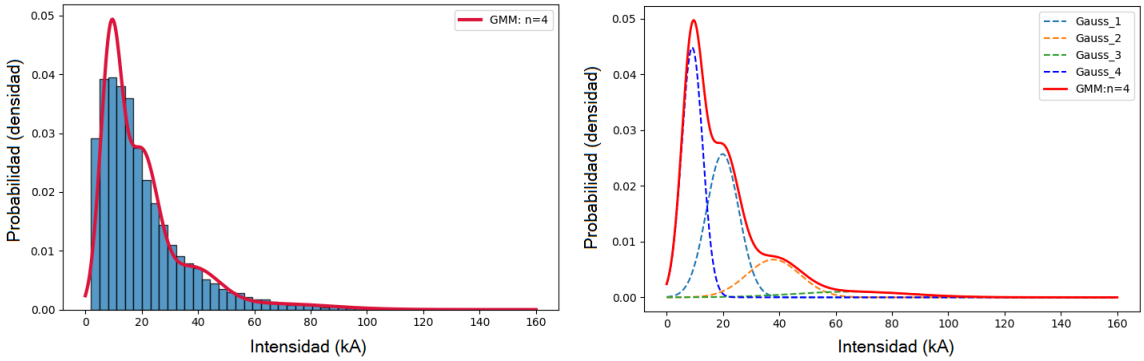


Figura 3.2: Función gaussiana mixta, con n=4, para modelar las intensidades. Evaluación previa *(Elaboración propia)*

Como alternativa, se propone explorar la distribución Gaussiana Mixta (GMM), la cual ha sido utilizada para modelar variables aleatorias en sistemas de potencia con muy buenos resultados [69]. Esta función se construye mediante la suma de n funciones gausianas, con una variable de peso que define su nivel de participación. La función densidad de define de la siguiente manera:

$$f_Y(y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} = \omega_i f_{N(\mu_i \sigma_i^2)}(y) \\ f_{N(\mu_i \sigma_i^2)}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} e^{\frac{-(y-\mu_1)^2}{2\sigma_i^2}} \end{cases} \tag{3.3}$$

Con el fin de evaluar de manera previa este tipo de función, se ha generado una prueba simple sobre un conjunto de datos que contienen las intensidades de descargas atmosféricas en el área metropolitana de Costa Rica para 2010. De manera arbitraria, se ha seleccionado una n=4 con el fin de exponer el concepto. La figura 3.2 muestra los resultados obtenidos. En la imagen se muestra un histograma de los datos utilizados y la fución GMM (izquierda). La figura de la derecha presenta la descomposición de la GMM en las cuatro componentes gaussinas. En secciones futuras se explicaran las técnicas de ajuste que serán utilizadas.

Una vez definidos los parámetros del retorno de corriente de una descarga atmosférica, se emplea el modelo de línea de transmisión para establecer el acoplamiento con los sistemas de potencia. En la figura 3.3 se presenta la visión general de este modelo, el cual supone que la corriente en la base del canal asciende como si estuviera en una línea de transmisión sin pérdidas, a una velocidad v. En la figura también se representa el comportamiento de la corriente en relación al desplazamiento y el tiempo, dando como resultado una función de frente onda característica. En la ecuación 3.4 se describe comportamiento de la corriente:

$$i(z,t) = \begin{cases} i(0, t - z/v) & z \leqslant v \cdot t \\ 0 & z > v \cdot t \end{cases} \tag{3.4}$$

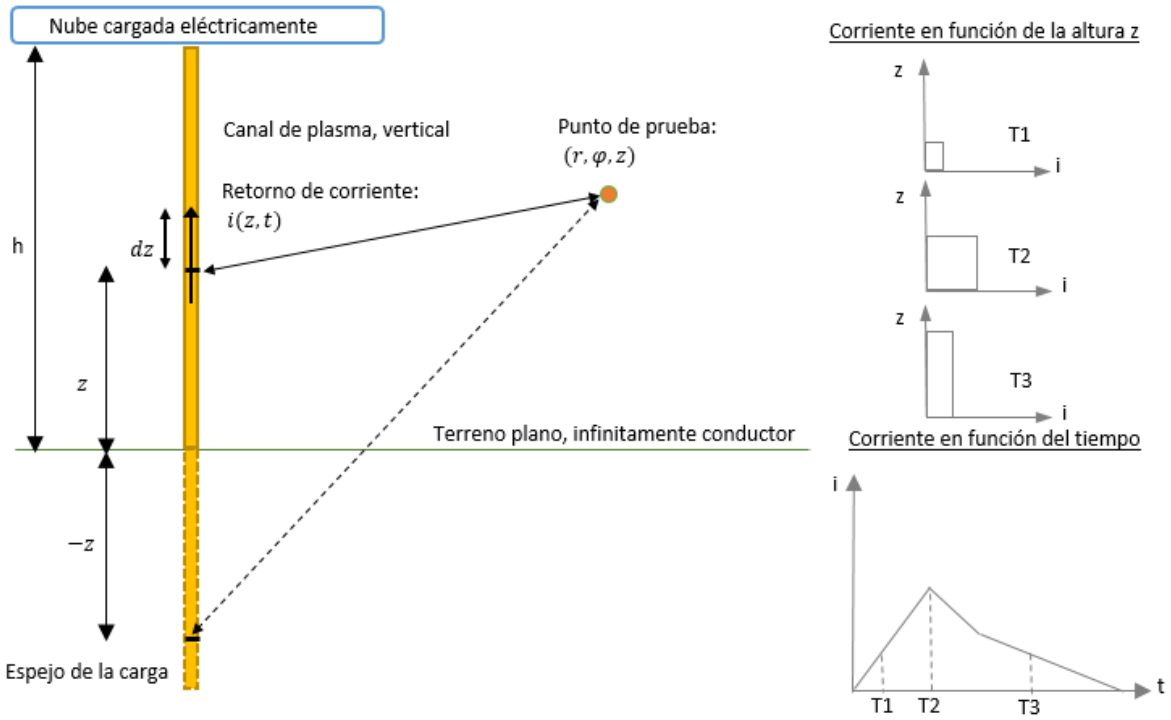


Figura 3.3: Canal de retorno y las relaciones entre corriente, desplazamiento y tiempo
(Elaboración propia:basada en [30])

Para representar la corriente en la base del canal, la expresión más utilizada corresponde al modelo de corriente de propagación propuesto por Heidler, en la cual su amplitud, tiempo de frente y de cola son colocados directamente en la ecuación [27]. Donde: η es el factor de corrección de la amplitud, I_0 es la amplitud de la corriente en la base del canal, τ_1 es la constante del tiempo de frente , τ_2 es la constante del tiempo de cola (en este caso será estimada por correlación, a partir de los datos de τ_1) y n es un factor de corrección.

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(\frac{t}{\tau_2}\right) \tag{3.5}$$

En el caso particular de un impacto directo en las redes eléctricas, la descarga atmosférica se modela mediante una fuente de corriente descrito en la ecuación 3.4, la cual produce una onda viajera caracterizada por las ecuaciones telegráficas, cuya solución corresponde a $u(x,t) = u_1(x-vt) + u_2(x-vt)$ y $i(x,t) = [u_1(x-vt) - u_2(x-vt)]/Z_c$, donde v y Z_c, son la velocidad de propagación y la impedancia característica respectivamente, los subíndices 1 y 2 representan la dirección en que se desplaza la tensión. Para sistemas complejos estas ecuaciones se aplican de forma nodal, considerando tiempos de propagación particulares y se resuelven mediante programas como los EMTP. No obstante, para desarrollar un cálculo simplificado, son ampliamente aceptadas las estimaciones utilizando redes

de dos puertos considerando la impedancia característica. Para este caso, se aplican las siguientes consideraciones: la corriente del rayo se divide en dos caminos sobre la línea, que existen coeficientes de acoplamiento entre fases y que es posible modelar la dinámica de la red, mediante coeficientes de reflexión de ondas y diagramas reticulares.

$$U_{max} = \begin{cases} U_{inicial} = 0,5 \cdot I/Z_c & Onda \quad inicial \\ \Gamma = \frac{Z_{nuevo} - Z_c}{Z_{nuevo} + Z_c} & Reflexión \quad onda \end{cases} \tag{3.6}$$

Para sistemas de distribución no son tan comunes los impactos directos de descargas atmosféricas, principalmente en medios urbanos, debido al apantallamiento que proveen edificios o estructuras. En ambientes poco poblados la utilización de un modelo electrogeométrico para establecer el nivel atracción de la red es muy útil.

En relación a las sobretensiones por impactos indirectos, se considera que a partir del proceso de carga de la nube y el movimiento de corriente por el canal vertical se generan campos eléctricos y magnéticos, estáticos, inducidos y radiados. Existen varios modelos para establecer el acoplamiento entre una red eléctrica y los campos inducidos por el rayo. El más utilizado es el propuesto por Agrawal, el cual se basa en el concepto de tensión dispersa y se expresa únicamente en función del campo eléctrico. Según el modelo, la tensión total en un punto de la línea es el resultado de superponer la tensión dispersa $U_s(x,t)$ y la incidente $U_i(x,t)$, de tal modo $U(x,t) = U_s(x,t) + U_i(x,t)$. También se indica que la tensión incidente en cualquier punto de la línea se obtiene a partir del campo eléctrico vertical, por lo que se aproxima a $U_i(x,t) \approx hE_z^i(x,0,t)$. [26, 30]. Estas ecuaciones se utilizan en en simulaciones bajo el dominio del tiempo, en programas como LIOV o Yaluk, los cuales emplean métodos de diferencias finitas [31, 32].

No obstante, es posible realizar aproximaciones de la misma con la fórmula de Rusk, si lo que se desea calcular es una sobretensión máxima de manera simplificada. Dicha ecuación es la recomendada en la IEEE 1410 [1, 70] Siendo, I la amplitud de la corriente del rayo, h la altura de la línea, y la distancia del impacto, v la velocidad del retorno, ε_0: permitividad en vacío (8,85x10-12 F/m) y μ_0: permeabilidad en vacío (4πx10-7 Tm/A). La mayor utilidad de esta ecuación, es para el cálculo de sobretensiones inducidas

$$U_{max} = \frac{1}{4\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \frac{I \cdot h}{y} \cdot \left\{1 + \frac{v}{\sqrt{2 \cdot c^2 - v^2}}\right\} \tag{3.7}$$

Considerando que la naturaleza del estudio se enfoca en un análisis sistémico de confiabilidad, se determinó viable utilizar modelos simplificados para el cálculo de sobretensiones. No obstante, con el fin de brindar mayor validez a esta consideración, se utilizaron como referencia los programas ATP-EMTP y LIOV. En la figura 3.4 se presentan lo modelos empleados.

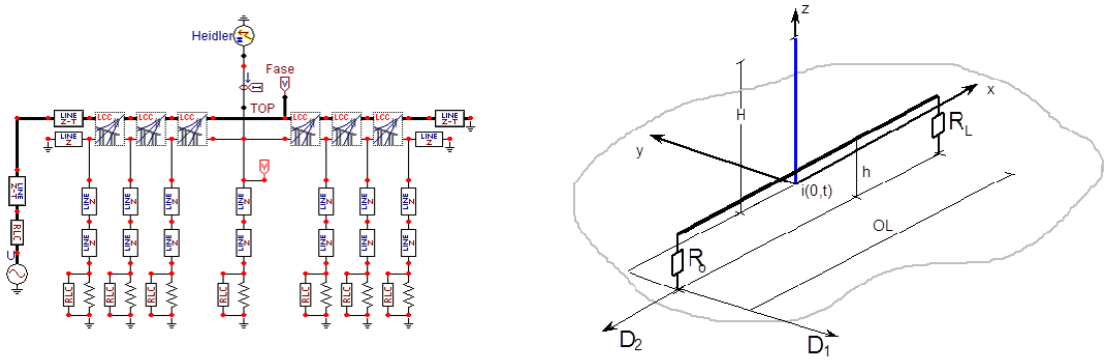


Figura 3.4: Modelos empleados en ATP-EMP y LIOV, para el cálculo de sobretensiones
(Elaboración propia: Extraída de ATP-EMTP y LIOV)

3.2. Confiabilidad operativa de los sistemas de distribución

La interacción de las redes eléctricas de distribución con las descargas atmosféricas inicia con el modelado a nivel geográfico, los parámetros del aislamiento y las características de los dispositivos de protección, las cuales formam parte de las bases de datos de las empresas.Con el fin de ejemplificar lo anterior, se presenta en la figura 3.5 una visualización de capas obtenida del sistema GIS de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, correspondiente a cuatro alimentadores de media tensión ubicados al sur del área metropolitana de Costa Rica. También, se muestra un ejemplo de un montaje electromecánico utilizado por la misma empresa, el cual incluye componentes de protección contra sobretensiones, aislamiento sólido, poste de concreto, seccionadoras de línea, herrajes, conectores y sistema de puesta a tierra entre otros.

Para sistemas aéreos y expuestos a la intemperie, se especifica un aislamiento tipo solido, construido en porcelana o material compuesto cuya principal variable eléctrica para el soporte de sobretensiones de frente rápido, corresponde a la Tensión Crítica de flameo (CFO: Critical Flashover). Este valor se obtiene en las pruebas de diseño al aislamiento y se caracteriza mediante la curva voltaje-tiempo. La prueba consiste en someter el material a una señal tipo impulso normalizada a $1{,}2x50\mu s$ variando la tensión de entrada. El valor corresponde a la tensión que ofrece una tasa de falla del 50 % basado en una función de probabilidad normal. En la ecuación 3.5, se muestra la ecuación correspondiente, siendo μ y σ el valor medio o CFO del aislamiento y la desviación estándar de la prueba. En alguno casos, por facilidad también se utiliza la función Weibull [1, 20].

$$p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3.8}$$

En relación a los dispositivos de protección, lo más común es el empleo de descargadores de sobretensiones de óxido metálico (ZnO principalmente), los cuales tienen un comportamiento no lineal

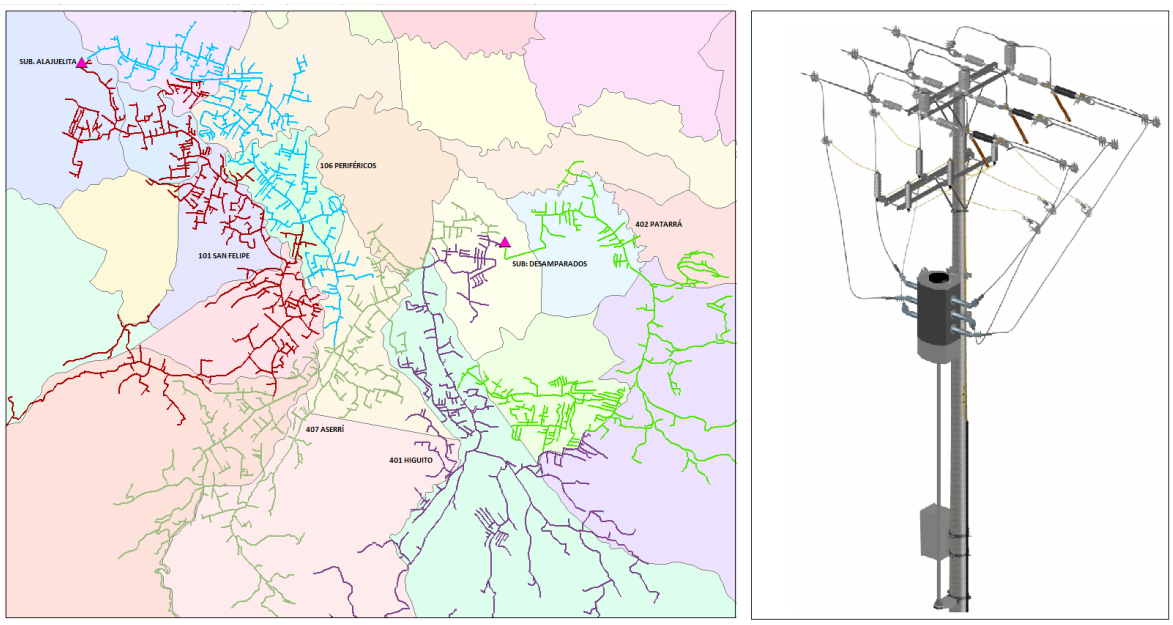


Figura 3.5: Red eléctrica geoferenciada y montaje electromecánico de un seccionador
(Elaboración propia: Fuente CNFL)

y su principal características es proveer una tensión residual en sus terminales ante un frente de onda. Si las tensiones residuales del dispositivo se contrastan con la curva voltaje-tiempo del aislamiento, es posible determinar el margen de protección. Aunque existen algunos modelos para describir el comportamiento de estos dispositivos, la práctica común es utilizar datos publicados por fabricantes y construir un modelo genérico discreto. En la figura 3.6 se muestra la función clásica para la tasa de falla del aislamiento y una curva característica de un descargador de 10 kA con máxima tensión de operación continua de 27 kV. Este último dato es muy importante, ya que depende del dispositivo expulsor de protección con el que cuenta el descargador ante sobrecalentamientos por sobretensiones temporales [1, 20].

Finalmente, considerando que los sistemas de distribución cuentan con elementos de protección que seccionan segmentos de red ante fallas, como reconectadores automáticos, seccionadores y fusibles, es necesario considerar en el desempeño del sistema el contexto operativo, el cual es definido mediante estrategias en los diferentes centros de control. Las acciones que en estos emplazamientos se realizan, pueden ir desde el restablecimiento de sectores perjudicados por fallas, hasta la modificación temporal o permanente del sistema para mejorar su desempeño técnico y económico.

En este contexto, la confiabilidad operacional surge como alternativa para gestionar activos en la industria moderna, ya que deja de lado la teoría convencional de la confiabilidad orientada a la reducción de la tasa de fallas y se enfoca en la capacidad que tiene un sistema (representado por sus procesos, aspectos tecnológicos y personas) para cumplir su función bajo un contexto operacional específico, en el cual se desarrollan escenarios de falla, frente a los cuales las organizaciones toman

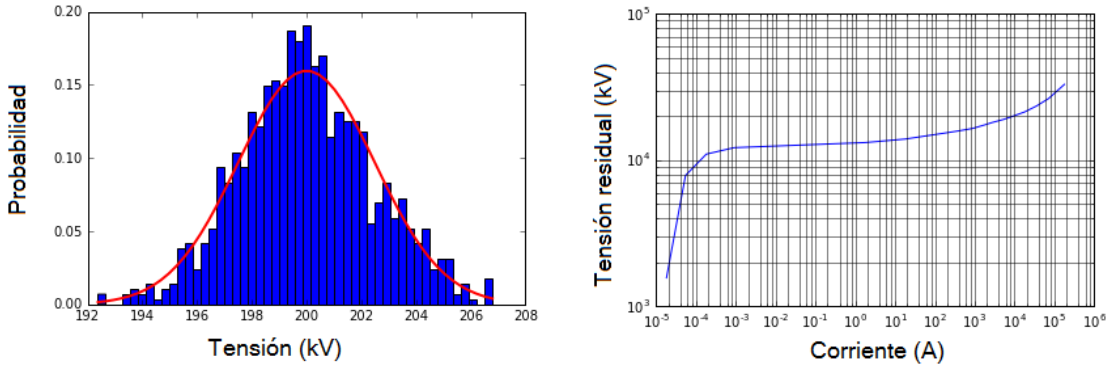
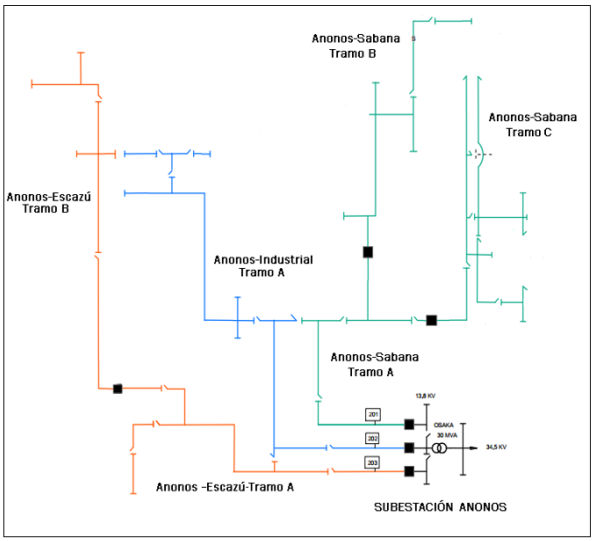


Figura 3.6: Función características de un aislamiento sólido y descargadores de sobretensiones *(Elaboración propia:Fuente CNFL)*

decisiones para minimizar el riesgo. Para la elaboración de un modelo de esta naturaleza, se parte de los objetivos estratégicos de la organización a la cual se aplique, se determina el desempeño de los sistemas actuales y se determinan indicadores claves (KPIs: Key Performance Indicators), con el fin de establecer estrategias que optimicen su funcionamiento.

El paso inicial para determinar el desempeño de los sistemas ante sobretensiones de origen externo consiste en establecer las tasas de transición entre estado de operación y falla, en periodos de tiempo determinados o a nivel estacional. Este proceso comúnmente se representa de manera gráfica mediante un diagrama espacial de estados o cadenas de Markov [35, 36, 71]. En la figura 3.7 se presenta un diagrama unifilar de un sistema de media tensión, compuesto por tres alimentadores, ubicados en el área metropolitana de San José. El sistema tiene la particularidad de operar radialmente y cada alimentador se destaca por contar con uno, dos y tres elementos de protección. De esta manera, si se considera que el modelo más extenso que puede alcanzar seria de ocho estados, para un periodo de tiempo determinado. En el Anexo 1, se muestra el desarrollo de las ecuaciones.

Las tasas de transición corresponden a los tiempos medios de operación y reparación, son los parámetros para determinar las probabilidades de confiabilidad y mantenibilidad. La primera corresponde a la capacidad de un sistema de operar de manera continua en un periodo de tiempo y la segunda expresa la capacidad de un sistema de recuperar su condición de operación en un tiempo determinado. En cadenas de Markov, su función base de probabilidad es la exponencial. No obstante, en caso de tener un historial extenso de datos, se pueden emplear las siguientes funciones de probabilidad: normal, lognormal, exponencial, Gamma y Weibull. En el conjunto de ecuaciones 3.8, se muestran las funciones de densidad [43]. En este campo, la función GMM también podría ser incluida, considerando su versatilidad (ver sección 3.1)



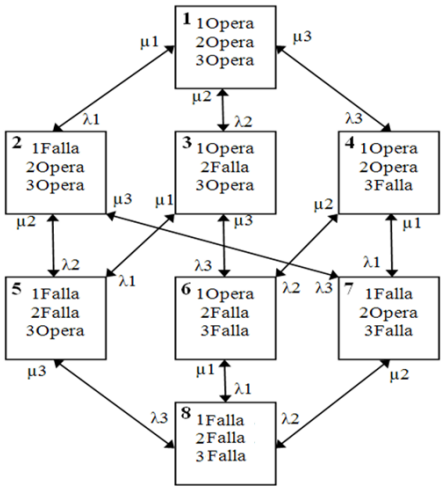


Figura 3.7: Red de distribución de tres alimentadores y el diagrama espacial de ocho estados posibles *(Elaboración propia: Fuente CNFL. Diagrama de estados basado en [35])*

$$R(t), M(t) = \begin{cases} normal \rightarrow f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & \mu : media, \quad \sigma : desviación \\ Lognormal \rightarrow f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) & \mu : media, \quad \sigma : desviación \\ Exponencial \rightarrow f(t) = \lambda \exp\left(-\lambda \cdot t\right) & \lambda : 1/media \\ Gamma \rightarrow f(t) = \frac{1}{\beta \cdot \Gamma(\alpha)} \left[\frac{t}{\beta}\right]^{\alpha-1} & \alpha : forma, \quad \beta : escala \\ Weibull \rightarrow f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\eta^{\beta}} \exp\left(-\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} & \beta : forma, \quad \eta : escala \end{cases} \tag{3.9}$$

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta la disponibilidad como índice de desempeño, el cual resume cuantitativamente el perfil de operabilidad de un elemento. Representa el porcentaje del tiempo disponible (de uso) del activo en un periodo determinado. Se estima, mediante la ecuación 3.9. donde TPO y TPFS son los tiempos promedios de operación continua y fuera de servicio. Como dato cuantitativo, se realizó un cálculo de este indicador para el sistema mostrado previamente en la figura 3.6 y se determinó que en promedio los alimentadores tienen valores de disponibilidad del 0.999924. Este tipo de indicador es realmente particular, debido a que en general, los valores de continuidad respecto al tiempo fuera de servicio es muy alto. En este sentido, la cantidad de nueves es sumamente representativo. Bajar esta cantidad, requiere inversión que se contrasta con el beneficio adquirido.

$$A_0 = \frac{TPO}{TPO + TPFS} \tag{3.10}$$

Adicionalmente, para completar los indicadores de desempeño, se considera fundamental incluir

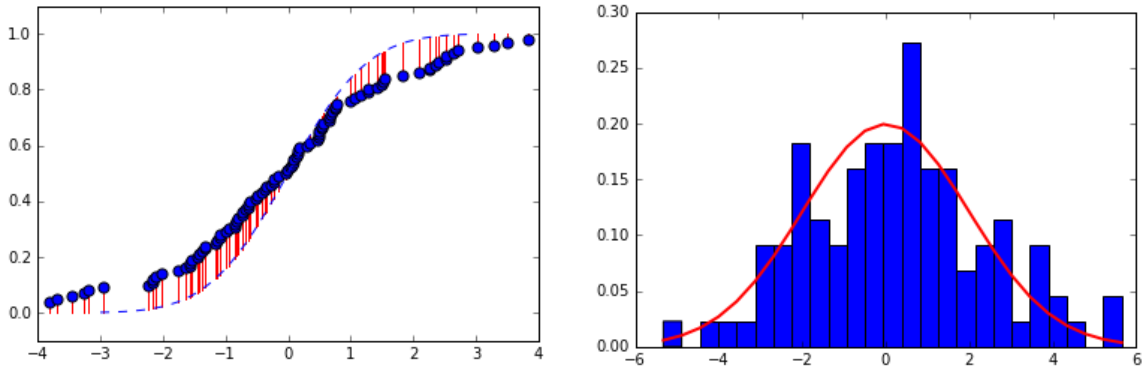


Figura 3.8: Ejemplo de una prueba de Kolmogorov - Smirnov, para cien eventos aleatorios aplicada, a una función normal con $\mu = 0$ y $\sigma = 2$

(Elaboración propia)

una función que contemple los aspectos financieros de las empresa, la misma debe estar compuesta por los costos de mantenimiento preventivo (CMP) y mantenimiento correctivo (CMC), tomando en consideración: materiales, personal y repuestos entre otros. También, debe contener una componente de costos por indisponibilidad de servicio (CIS) orientado a establecer el impacto sobre el proceso productivo. Este último se calcula considerado la frecuencia de fallas (FF), el tiempo promedio fuera de servicio (TPFS) y los costos de penalización (CP) o por pérdida del proceso productivo. Este calculo se puede obtener mediante la expresión 3.10.

$$Indicadores \quad de \quad Costos = \begin{cases} CM = CMP + CMC & Costos \quad mantenimiento \\ CIS = FF \cdot TPFS \cdot CP & Costos \quad indisponibilidad \\ IC = ICM + CIS & Costos \quad totales \end{cases} \tag{3.11}$$

Como consideración final, para el trabajo con variables aleatorias, tanto para los procesos de confibiabilidad como la parametrización de descargas atmosféricas y el cálculo de sobretensiones, es fundamental definir la función que mejor se ajuste al comportamiento de los datos [43]. En este trabajo se utiliza, la prueba Kolmogorov - Smirnov, el cual calcula la distancia máxima entre la frecuencia acumulada de los tiempos observados y la frecuencia teórica acumulada provista por el modelo seleccionado. Si la distancia entre estas frecuencias acumuladas es igual o mayor, se puede concluir que el modelo seleccionado no provee un buen ajuste para los datos evaluados. En la figura 3.8 se muestra un ejemplo de este procedimiento, utilizando como referencia una función densidad normal y un conjunto de cien datos aleatorios, en los cual el valor-p conduce a rechazar que esta es la distribución de esos datos.

3.3. Método de Monte Carlo y agrupamiento

En términos generales el método de Monte Carlo es un procedimiento numérico introducido por J.N. Von Neumann y S. Ulam, con el cual se determina la respuesta de un sistema ante variables de entrada aleatorias. El mismo es ampliamente utilizado en muchos campos de la ingeniería, principalmente para problemas multidimensionales, debido a su versatilidad y posibilidades que brindan los ordenares actuales. La aplicación se basa un proceso iterativo exploratorio, en el cual se resuelve un conjunto de modelos bajo incertidumbre. La estructura general del método se puede describir en los siguientes pasos [1, 72].

- Generar un conjunto de números aleatorios para variables de entrada, de acuerdo al dominio de la variables y las funciones de probabilidad establecidas
- Resolver de manera iterativa el modelo (o conjunto de modelos) del sistema considerando las variables aleatorias generadas, hasta cumplir un criterio de convergencia o error.
- Desarrollar un análisis estadístico, mediante histogramas normalizados para determinar el comportamiento del sistema

Como ejemplo de la aplicación del método se ha planteado un ejercicio, en el cual se estima la probabilidad de falla del aislamiento para un sistema eléctrico en el área metropolitana de Costa Rica ante sobretensiones de origen externo. Para tal efecto, se ha considerado una función de densidad uniforme para ubicar las descargas eléctricas (coordenadas geográficas), una función lognormal para la intensidad de las descargas, compuesta por un valor medio de 30 KA, desviación estándar de 0.65 y una función normal para el aislamiento con valor crítico de flameo de 250 kV. Dentro de las simplificaciones, no se considera el efecto de los esquemas de protección, ni el apantallamiento de objetos sobre la red. Como parte de los modelos a resolver, se incluyó el electrogeométrico propuesto por la guía IEEE-1410 y los estimadores de sobretensiones basados en redes de dos puertos con impedancia característica de 430 Ω y la fórmula de Rusk.

En la figura 3.9 se muestran los resultados obtenidos de la simulación de dos mil eventos, basados en sus funciones de probabilidad y las condiciones planteadas anteriormente para este escenario. Considerando, una densidad de descargas de 12 impactos por kilómetros cuadrado al años, se estima que el sistema experimentará 130 fallas al año.

El caso anterior, corresponde a la técnica estadística para establecer una coordinación de aislamiento en un sistema autoregenerable, en la cual, a partir de la distribución estadística de las sobretensiones y de la función de probabilidad de fallo del aislamiento, es posible obtener el riesgo o frecuencia de salidas de equipos o segmentos de red y con este valor se estima finalmente la tasa de falla anual de la línea de distribución. Evidentemente, es un caso muy pesimista, donde la red se encuentra completamente vulnerables a la actividad atmosféricas. No obstante, únicamente ejemplifica el proceso de

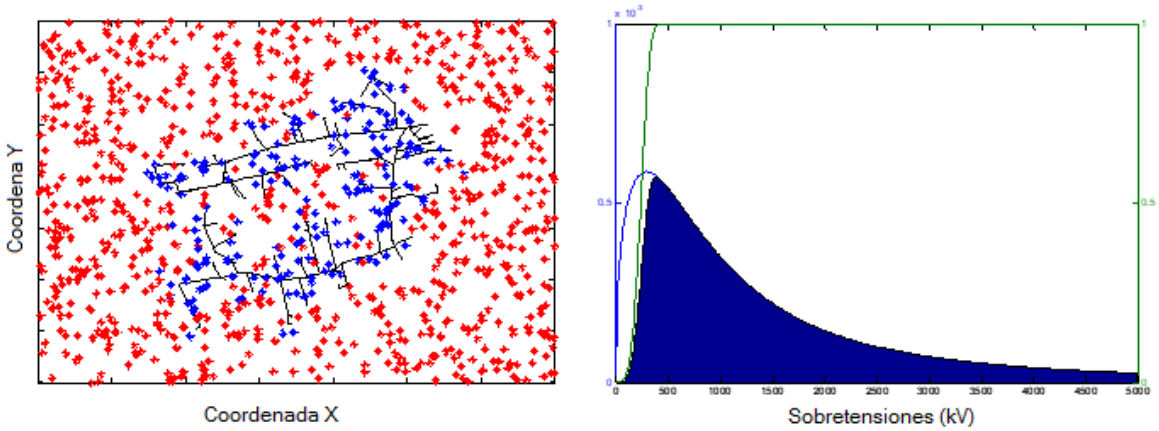


Figura 3.9: Estimación de falla en aislamiento sólido en una red de media tensión debido a sobretensiones de origen externo

(Elaboración propia)

cálculo y el vínculo entre aislamiento y sobretensiones de origen externo. El cual, generalmente se usa para una etapa de diseño.

En este trabajo, se propone una estimación alternativa de riesgo, que corresponde a la suma de riesgos e impactos individuales, considerando datos históricos. El mismo se expresa mediante un proceso estocástico en el que R corresponde al riesgo sistémico de las descargas de origen atmosférico. El mismo se calcula incorporando una probabilidad de falla condicional de cada elemento de control (segmentos de red), $P[F|S_i]$ y el impacto que este genera. Este último corresponde al producto de la probabilidad de permanecer en estado de falla por los costos de indisponibilidad $P[EF]CIS$ mas los costos de reparación, $[CM]$. La relación anterior, se expresa de la siguiente manera, con n igual al numero de segmentos de control y m el nivel de sobretensión. En este contexto, el experimento de Monte Carlo se desarrollará combinando la teoría del cálculo de sobretensiones y la estimación de confiabilidad.

$$R = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} P[F_i|S_j] \cdot [P[EF_i] \cdot CIS_i + [CM_i] \tag{3.12}$$

Considerando que el nivel de riesgo del sistema corresponde a la sumatoría de segmentos bajo control, se considera factible desagregar y caracterizar grupos y representarlos a nivel geográfico. Para tal efecto, se propone utilizar algoritmo de agrupamiento k-means combinado con la técnica de silueta, los cuales han sido aplicados en sistemas de potencia [73, 74] de manera muy satisfactoria. Adicionalmente, se utiliza una aproximación con diagramas de Voronoi, la cual también es una técnica de uso frecuente, especialmente el procesos de planeamiento [75]. La principal ventaja de esta última etapa, es la definición de zonas de riesgo concretas y la disminución de la dispersión de los datos.

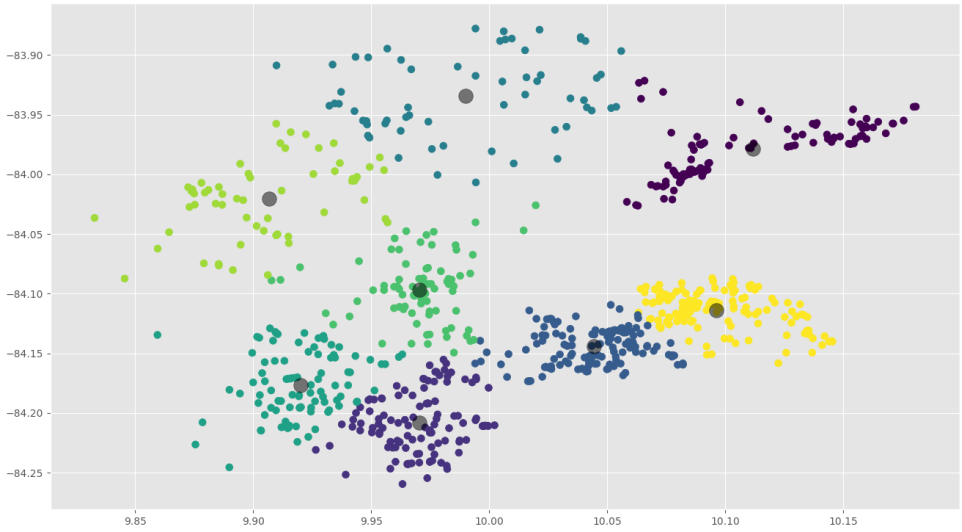


Figura 3.10: Agrupamiento de descargas atmosféricas en CNFL, julio 2010
(Elaboración propia: Datos CNFL)

En la figura 3.10 se muestra un agrupamiento de datos geográficos de descargas atmosféricas en una zona particular de Costa Rica y la construcción de sus respectivos diagramas. Para este ejemplo, únicamente, se caracteriza el nivel de densidad de las descargas en 6 regiones. A nivel, de experimento (ver capitulo 6) se incluye una tercer variable asociada al nivel de riesgo. En términos matemáticos, la técnica se basa en la definición de k centroides dentro de un conjunto de datos normalizados, en los cuales se minimiza la distancia euclidiana de cada elemento. El siguiente conjunto de ecuaciones permite ejecutar estos pasos.

$$Agrupamiento = \begin{cases} arg\ \ min_C\ \ \sum_{i=1}^{k} \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 & k - means \\ \frac{b(i)-a(i)}{max\ \ \{a(i),b(i)\}} & Silueata \\ V_i = \{x / \|x - p_i\| < \|x - p_i\|, \forall j \neq i\} & Voronoi \end{cases} \tag{3.13}$$

Para K-means, el proceso consiste en calcular de manera iterativa las distancias de los datos con los centroides de los grupos (se parte de un grupo inicial arbitrario), hasta satisfacer un criterio de convergencias como la varianza. Para el coeficiente de silueta, lo que se establece es una relación entre la distancia promedio de cada valor x a todos los demás puntos en el mismo cluster a(x) y distancia promedio de x a todos los demás puntos en el cluster más cercano b(x). Finalmente, los diagramas de Voronoi se construyen al asociar todas las ubicaciones del espacio euclidiano con el mas cercano con los centroides del agrupamiento. En este contexto se denomina V_i a un poligono de Voronoi, conformado por los puntos mas cercanos al centroide p_i.

3.4. Marco normativo de la especialidad

Los documentos que representan concenso entre la comunidad científica y la industria eléctrica corresponden a las normas internacionales o las desarrolladas en regiones específicas. En la actualidad, existen guías y normas orientadas al mejoramiento del desempeño de las líneas de distribución ante descargas atmosféricas. IEEE publicó en 2011 la última versión del estándar 1410: "Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines" [70].En el caso de IEC ofrece el estándar 62305: "Protection Against Lightning" dividida en cuatro partes y publicadas en 2010 [76–79].

Ambos trabajos proporcionan información y métodos para minimizar la probabilidad de fallas provocados por rayos e incorporan de manera conceptual la relación entre costo y beneficio. Para su uso es indispensable complementarlas con otras normas como las vinculadas a la aplicación de pruebas en laboratorios de alta tensión, de las cuales existen dos referencias técnicamente equivalentes: el estándar 4 de IEEE cuya última versión es de 2013 y las normas 60060 de IEC [80–82], las cuales están divididas en dos partes con versiones vigentes desde 2006 y 2010.

Otro caso es la gama de normas aplicadas a la especificación y verificación de las características del aislamiento eléctrico, el cual para sistemas de media tensión expuestos a la intemperie está dominado por la porcelana y los materiales compuesto en los que predominan el caucho de silicona. En este apartado es usual la utilización de la familia de normas NEMA/ANSI C29 [83–88], para la industria con influencia norteamericana, las cuales presentan sus últimas revisiones en 2017. En el caso de IEC, las principales normas se encuentran divididas en tres grupos, la 62155 del 2003 y la 60273 de 1990, para aislamiento de equipos y redes, respectivamente y la tercera corresponde a la norma de selección de aislamiento en función al nivel de contaminación 60815, la cual ha sido actualizada en 2008 y esta dividida en tres parte [89–93].

De igual manera, se normalizan los dispositivos de protección, en los que destacan los descargadores de sobre tensión fabricados de óxido metálico como la opción más utilizada en los sistemas modernos. Las referencias para estos dispositivos son la ANSI/IEEE 62.11 de 2012 y las IEC 60099 partes 4 y 5, cuyas últimas actualizaciones en 2014 y 2018, modificaron en gran medida lo referente a la capacidad térmica, el manejo de sistemas energía y la clasificación de equipos [94–96].

Se finalizará esta etapa de referenciación con las normas de coordinación de aislamiento, las cuales incorporan factores que influyen en el soporte del aislamiento, formas de onda y sobretensiones normalizadas, procedimientos y modelos para simulaciones. Para IEEE corresponden a las normas 1313, dividida en dos partes difundidas en 1996 y 1999 [97,98]. Por otra parte IEC, tiene el grupo de normas 60071, cuyas partes vigentes son la 1, 2 y 4 publicadas entre 2004 y 2019 [99–101]. Su aplicación depende de la información disponible sobre las tensiones representativas. El primero corresponde al método determinístico, el cual se basa en factores, coeficientes y gráficas, que simplifican el proceso. El segundo se denomina el método estadístico y se enfoca en el análisis de riesgo

Capítulo 4

Estimación de sobretensiones en sistemas de distribución

En esta sección se presenta el algoritmo para la parametrización estadística de descargas atmosféricas y la estimación de sobretensiones en sistemas de distribución de energía eléctrica. El capítulo se desarrolla en tres partes. En la primera, se explicará el diseño y lógica del algoritmo mediante narrativas específicas de cada subrutina y un seudo-código, complementado con figuras y gráficas esperadas. En la segunda, se presenta una implementación de esta estructura computacional en un sistema eléctrico real (en este caso, el de CNFL), con el fin de analizar su eficiencia y utilidad del programa bajo un entorno práctico. En la tercera parte, se ofrece una síntesis del capítulo con los principales resultados.

En un proceso de coordinación de aislamiento, la estimación de las tensiones representativas constituye el punto de partida (en este caso, sobretensiones de origen externo). Bajo el concepto general de riesgo que se desarrolla, este tipo de fenómeno corresponden a la componente denominada "Peligro". Su estimación brinda información clave para determinar la vulnerabilidad de los sistemas y el surgimiento de fallas, las cuales se parametrizan en función del nivel de las mismas, utilizando una probabilidad condicional. Para las empresas de distribución de energía eléctricas, esta cuantificación es fundamental para dimensionar el nivel de aislamiento y los esquemas de protección contra sobretensiones y determinar las estrategias operativas.

Debido a que el estudio no se enfoca estrictamente en el cálculo de sobretensiones, sino en vínculo de este tipo de eventos con los niveles de confiablidad de los sistema, dicha estimación no contempla un cálculo detallado o un análisis en el dominio del tiempo de las sobretensiones, los procesos de reflexión de onda debido a cambio de impedancia y los pulsos electromagéticos subsecuentes a la primer descarga. Los modelos empleados se enfocan en estimar el nivel de sobretensión máxima para cada evento.

4.1. Estimador de sobretensiones y generador de funciones de probabilidad

Para la elaboración de este algoritmo se consideran los requerimientos mínimos de datos, los cuales corresponden a la combinación de históricos de impactos de descargas atmosféricas en una región determinada y una red georeferenciada con equipos de protección contra sobretensiones identificados. La construcción se basa en una estructura simple dividida en cinco etapas las cuales se describen a continuación, junto con las entradas y salidas del módulo.

Para el correcto funcionamiento de este módulo es necesario verificar que el sistema de coordenadas geográficas de las bases de datos sean equivalentes. En algunas aplicaciones será necesario un pre-procesamiento de datos para cumplir los requerimientos de entrada del programa. La estructura general del módulo se muestra en el siguiente pseudocódigo, el cual es secuencial y cuenta con una subrutina condicional para la estimación de sobretensiones. El mismo se presenta a continuación.

Algoritmo 4.1: Estimador de sobretensiones y generador de funciones de probabilidad

Datos: DescargasAtmosféricas($i\bar{d}_d, \bar{x_1}, \bar{y_1}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{t_f}$), RedEléctrica($i\bar{d}_r, \bar{V_n}, \bar{x_2}, \bar{y_2}, \bar{Z_c}, \bar{d_{eg}}, \bar{Ds}$)
Resultado: $EspacioPoisson(N_t = k)$, $Intensidad(I, t_f)$, $Sobretensiones(U_{max})$

1 ***inicio***;
2 Generar las estructuras de datos (dataframe) ;
3 $Matriz\ de\ \ correlación$ [DescargasAtmosféricas] ;
4 Definir:DivisiónTemporal(n), DivisiónEspacial (mxm);
5 ***Estimador de sobretensiones***;
6 $RedDescarga\{i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{x_1}, \bar{y_1}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{d}\}$ ← d=kdtree $[(x_1, y_1), (x_2, y_2)]$;
7 **para** $i \leftarrow 1$ ***en*** $RedEléctrica(i\bar{d}_r)$ **hacer**
8 $RedDescarga\{i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{x_1}, \bar{y_1}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{d}, \bar{U_{max}}\} \leftarrow U_{max}$ ***Sujeto a***;
9 **si** $d < d_{eg}$ **entonces**
10 $U_{max} = 0,5I \cdot Z_c$
11 **en otro caso**
12 $U_{max} = Rusck(I, d)\ \forall\ U_{max} > 1{,}05 \cdot V_n$
13 $RedDescarga\{\bar{n}, i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{d}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}, \bar{U_{res}}\} \leftarrow U_{res}$ ***Binario***;
14 **si** $Desacargador\ de\ sobretensión$ **entonces** $U_{res} = 1$;
15 ***Funciones de densidad de probabilidad***;
16 $Prueba\ de\ Ajuste \leftarrow\ Kolmogorov–Smirnov$;
17 **Usar:** ($LogNormal$, $lognormal\ \ bivariante$, GMM) ;
18 $f(\bar{U_{max}})$, $f(\bar{U_{max}} \leftarrow \bar{U_{res}})$;
19 $f(\bar{I}, \bar{t_f})$ o $f(\bar{I})$, $f(\bar{t_f})$
20 ***Parametrización espacial-temporal***;
21 **para** $j \leftarrow 1$ ***en*** $RedDescarga(x_1, y_1, T)$ **hacer**
22 $clasifica\ eventos\ (\bar{x_1}, \bar{y_1}) \leftarrow\ Quatree\ Actividad \leftarrow\ Subregiones(m, T)$
23 $Define: Distribución\ espacial\ de\ descargas\ (2D)$
24 ***Visualización***;
25 $Genera\ gráficas\ probabilidad\ y\ simulación$
26 ***final***;

- **Datos de entrada:** Se tienen como entrada dos estructura de datos. La primera corresponde a las tupla de datos de descargas atmosféricas que tiene la siguiente codificación: *DescargaAtmosférica* $(i\bar{d}_d, \bar{x_1}, \bar{y_1}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{t_c})$, la cual contiene un identificador del evento $i\bar{d}_d$, coordenadas de los impactos $\bar{x_1}, \bar{y_1}$, una variable temporal $\bar{T}$ que contiene el año, mes, día, hora, minuto y segundo en que se registro el evento, la corriente pico $\bar{I_p}$, el tiempo de frente de la señal $\bar{t_f}$ y el tiempo de cola $\bar{t_c}$. La segunda tupla corresponde a los datos del sistema eléctrico: *RedEléctrica* $(i\bar{d}_r, \bar{V_n}, \bar{x_2}, \bar{y_2}, \bar{Z_c}, \bar{d_{eg}}, C\bar{F}O, \bar{D}s)$, los cuales también contemplan un identificador por elemento (especialmente a estructuras de soporte tipo poste) $i\bar{d}_r$, el voltage nominal $\bar{V_n}$, la ubicación geográfica $\bar{x_2}, \bar{y_2}$, impedancia característica $\bar{Z_c}$, distancia electrogeometrica $\bar{d_{eg}}$, nivel crítico de flameo $C\bar{F}O$ y un valor binario que indica si existe parecencia de un descargador de sobretensión como parte del montaje electromecánico $\bar{D}s$

- **Resultados:** Con el procesamiento y tratamiento de datos se obtiene como salida del módulo una actividad espacial y temporal de las descargas atmosféricas, mediante el nivel de correlación de parámetros , funciones de probabilidad para simular la densidad de impactos , , el nivel de actividad por mes , la caracterización de intensidad de descargas y las sobretensiones que surgen en el sistema, considerando el funcionamiento de los descargadores de sobretensión: *Intensidad*(I, t_f) y las sobretenciones máximas que surgen en el sistema: *Sobretensiones* (U_{max}).

- **Inicio:** El arranque del proceso es muy tradicional y básicamente consiste en cargar y almacenar las estructuras de datos de entrada. Posteriormente, se definen una matriz de correlación de las variables vinculadas a las descargas atmosféricas para tomar decisiones sobre las funciones de probabilidad a utilizar. Finalmente, se define la división temporal *DivisiónTemporal* (n) y espacial *DivisiónEspacial* (mxm) a utilizar en el estudio. Esto define la estacionalidad climática y las dimensiones de la grilla geográfica.

- **Estimador de sobretensiones:** El segundo paso consiste en estimar las sobretensiones que surgen en el sistema. Usualmente, los datos disponibles corresponden a una región particular (región cuadrada), por lo cual se deben seleccionar únicamente los eventos que modifican la tensión nominal del sistema a un nivel que sea considerado como sobretensión (de acuerdo a las normas IEC e IEEE un valor mayor a 1,05 del nominal). Para estimar la sobretensión se utiliza la simplificación de la ecuación de onda viajera para impacto directos y la ecuación de Rusk para impacto indirecto, las cuales son dependientes de la corriente del rayo. El criterio de selección corresponde a la distancia del impacto sobre el sistema basado en el ángulo de atracción debido a su configuración geométrica. En este contexto, el problema consiste en estimar la distancia de los impactos con la red, considerando un gran volumen de datos con el fin de generar una operación vectorial. En este contexto, técnicas como k-d tree son muy útiles para estimar dichas distancia tomando como referencia las coordenadas de los impactos y las del sistema eléctrico.

Para la estimación de datos se genera una estructura de datos hija denominada *RedDescarga* ($\bar{n}, i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{d}, \bar{T}, \bar{I}_p, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}, , \bar{U_{res}}$) que incluye la distancia calculada, las sobretensiones estimadas y un valor binario para tensiones de restitución cuando se detecta que existe presencia de un descargador de sobretensión en el evento.

- **Estimador de funciones de probabilidad:** Con la nueva estructura de datos (que contempla las sobretensiones estimadas en el sistema) se aplica un algoritmo que parametriza algunas funciones de probabilidad (en este caso, lognormal y GMM) a los datos obtenidos y se aplica la prueba estadística Kolmogorov-Smirnov para establecer las funciones de probabilidad que caracterizan los parámetros, en este caso: la intensidad de descarga atmosférica y las sobretensiones del sistema. En general, se debe generar una separación de los datos, considerando los parámetros de aislamiento de los sistemas. esta división permite establecer a priori el nivel de protección del sistema.

- **Parametrización de actividad:** Finalmente, se utiliza una clasificación rectangular denominada Quatree para estimar la actividad de descargas atmosféricas en las subregiones definidas en la división espacial. El algoritmo consiste en dividir en mitades las diferentes subregiones del área bajo estudio. Con esa clasificación se estima en dos dimensiones la actividad atmosférica para cada espacio temporal definido previamente. Mediante la concentración de datos, se definen histogramas para las coordenadas de las descargas atmosféricas. Retorna: $H\bar{i}s_X$ y $H\bar{i}s_y$

- **Fin:** Con esta secuencia finaliza la primer etapa de análisis, la cual queda almacenada para etapas de visualización

En la figura 4.1 se muestran de manera esquemática la idea desarrollada en el módulo. La misma presenta la interacción entre una red de distribución y múltiples descargas atmosféricas, en la cual se destacan tres eventos para ejemplificar el concepto. El procedimiento consiste en extraer los eventos que generan sobretensiones (colores: rojo azul) y estimar la magnitud máxima del evento considerando si el efecto es por inducción (I1), impacto directo (I2) y bajo la presencia de dispositivos de protección contra sobretensiones (I3).

El resultado final del proceso conduce a la estimación de funciones de probabilidad. En la figura 4.2 se muestran algunos resultados esperados. En (a) se obtendría una clasificación espacial y temporal de la actividad atmosférica, contemplando una capa por cada periodo de tiempo y una grilla en común, mientras (b) brindaría información del parámetros clave de intensidad de las descargas. En (c) se muestra una distribución de sobretensiones sin considerar los dispositivos de protección, en tanto (d) permitiría visualizar el efecto en la función de probabilidad anterior considerando la tensión residual proporcionada por los descargadores de sobretensión. En general, estas subrutinas se ejecutan de manera inicial cada vez se tienen nuevos datos y se desea actualizar el análisis.

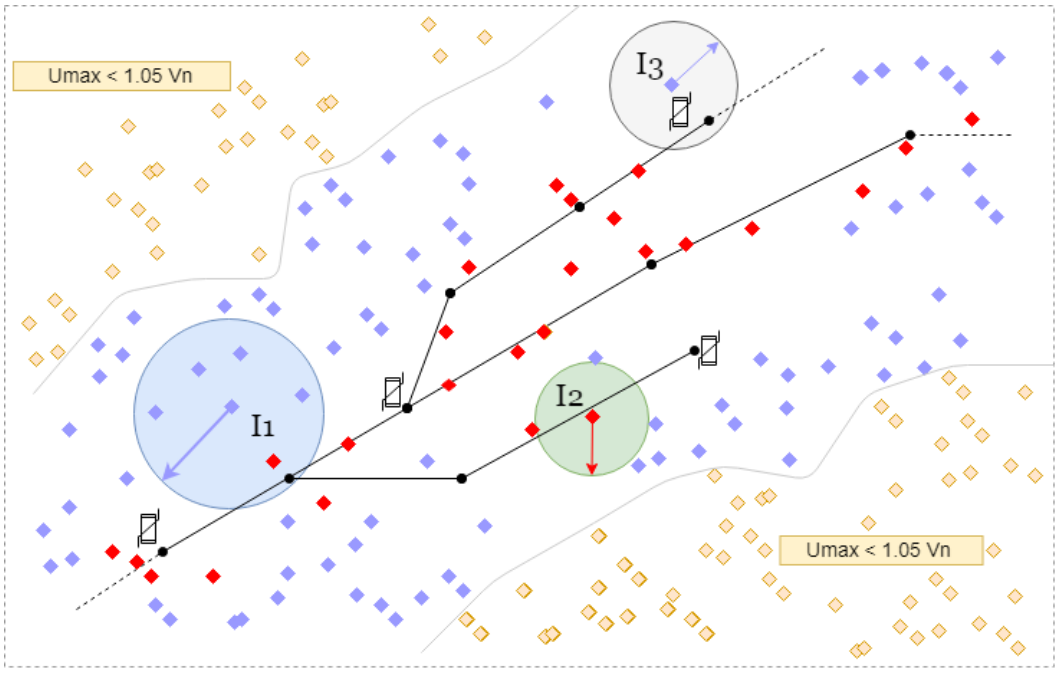


Figura 4.1: Esquema de interacción entre descargas atmosféricos y sistemas de distribución

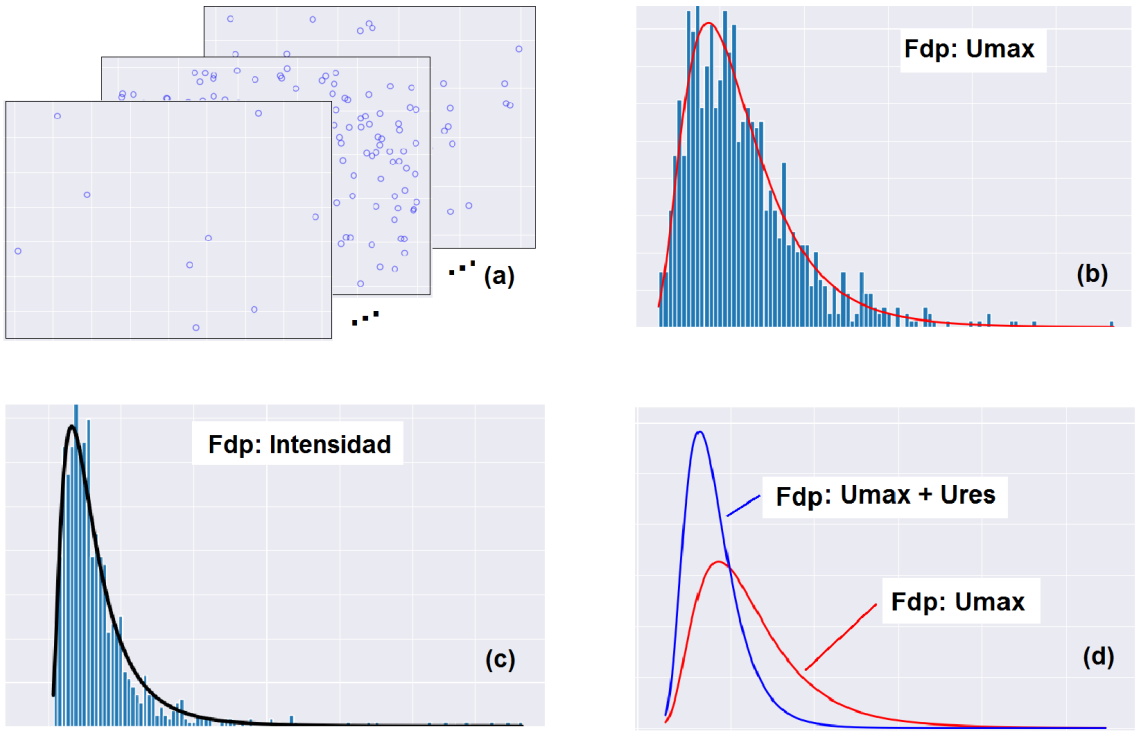


Figura 4.2: Gráficas teóricas del módulo de sobretensiones y parametrización

4.2. Implementación del algoritmo de sobretensiones en un sistema real

Con el fin de evaluar la utilidad de este módulo de programación se desarrolla una implementación en el sistema de prueba. En este caso, se utilizará el sistema de media tensión de la CNFL, el cual tiene una área densamente energizada, que concentra aproximadamente el 50 % de la energía consumida en Costa Rica en solo un un 2 % del territorio nacional. Para la evaluación se han utilizado 174 814 datos históricos de descargas atmosféricas registrados entre 2010 y 2017 y la red georeferenciada actual del sistema de distribución, la cual contiene datos de sus estándares electromecánicos, recorridos de las lineas, consumo promedio de los clientes y sistemas de protección entre otros. En la figura 4.3 se presenta el área geográfica bajo estudio.

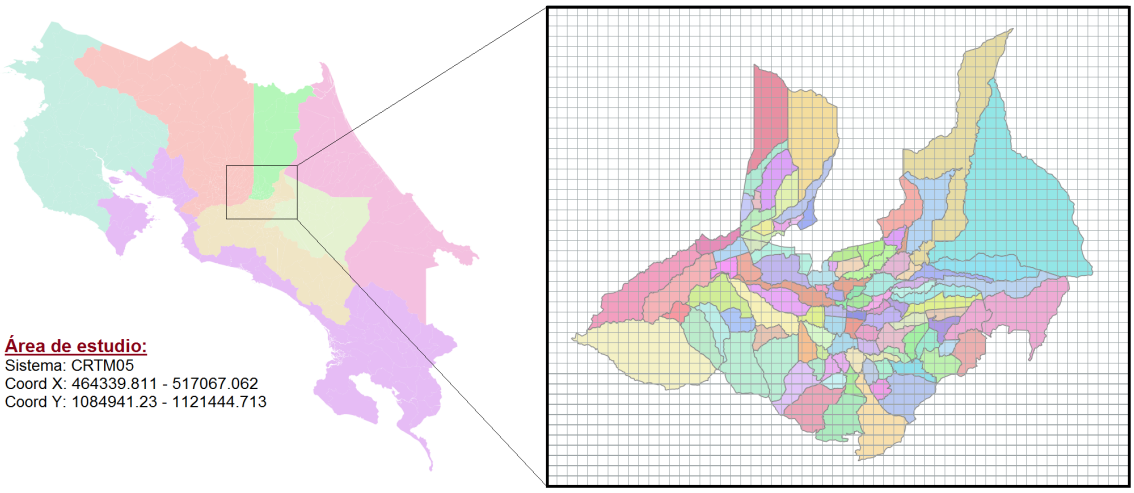


Figura 4.3: Área y ubicación geográfica del sistema de de la CNFL

La CNFL, basada en su tradición de ofrecer el mejor servicio a sus clientes y utilizar investigación científica para planificar y operar su sistema, mostró especial interés en este proyecto. De tal manera, que adquirió mediante una compra directa datos del sistema de monitores de descargas atmosférica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y puso a disposición sus bases de datos, principalmente el Sistema de Información Geográfico Eléctrico (SIGEL), el Sistema Integrado de Generación y Distribución (SIGEDI), los estándares electromecánicos de construcción y las especificaciones técnicas de materiales

4.2.1. Parámetros de las descargas atmosféricas

Considerando el orden inicial del módulo se presenta una matriz de correlación de las variables asociadas a las descargas atmosféricas. En la figura 4.4 se muestran los resultados para el conjunto de datos analizados. La misma indica que no existe una relación directa entre las variables, lo cual sugiere

que la parametrización se puede realizar de manera individual con funciones univariantes. Por ejemplo, no existe una relación entres meses particulares con los niveles de intensidad. Adicionalmente, se puede realizar una división temporal interanual basado en datos disponibilidad y escalamiento espacial bajo consideraciones de comodidad computacional. Para este ejercicio se desarrollará un análisis mensual (n=12) y se una segmentación aproximada a 1x1 km.

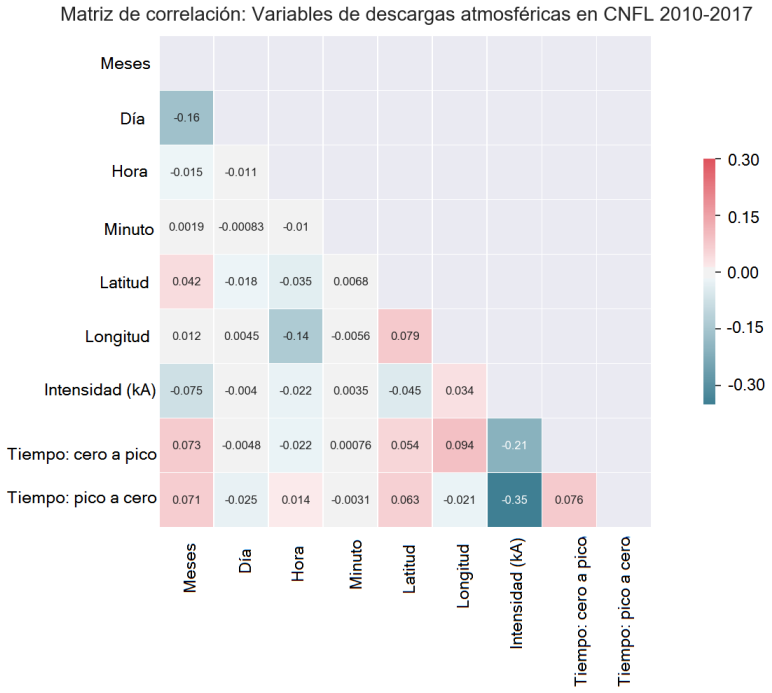


Figura 4.4: Matriz de correlación de descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017

Respecto a la estimación de variables aleatorias, se hace una diferencia entre parámetros globales y específicos. Los primeros utilizan toda la información disponible y están vinculados directamente el evento atmosférico (tiempo, espacio, intensidad). Los segundos, completamente específicos al sistema (en este caso, sobretensiones) en los cuales se filtra únicamente la información relevantes. A continuación, se estimará la variación internanual de las descargas y su ubicación utilizando todos los datos disponibles, los cuales corresponden a un rectángulo que contiene el área de concesión de la CNFL.

El primer parámetro corresponde al nivel de actividad temporal, el cual corresponde a una distribución discreta normalizada y organizada interanualmente. En la figura 4.5 la distribución de datos por cada mes para el periodo seleccionado y un histograma normalizado para cada mes del año. Los resultados muestran variaciones considerables por años y un patrón estacional muy definido, en el cual se identifica una época seca entre noviembre a marzo y una época lluviosa de abril a octubre, siendo septiembre el mes de mayor actividad. Adicionalmente, julio presenta la interrupción típica de la época lluviosa en Centro América (fenómeno meteorológico conocido como verano de San Juan). Este patrón tiene gran utilidad, especialmente cuando se contrasta con los datos de fallas en los sistemas.

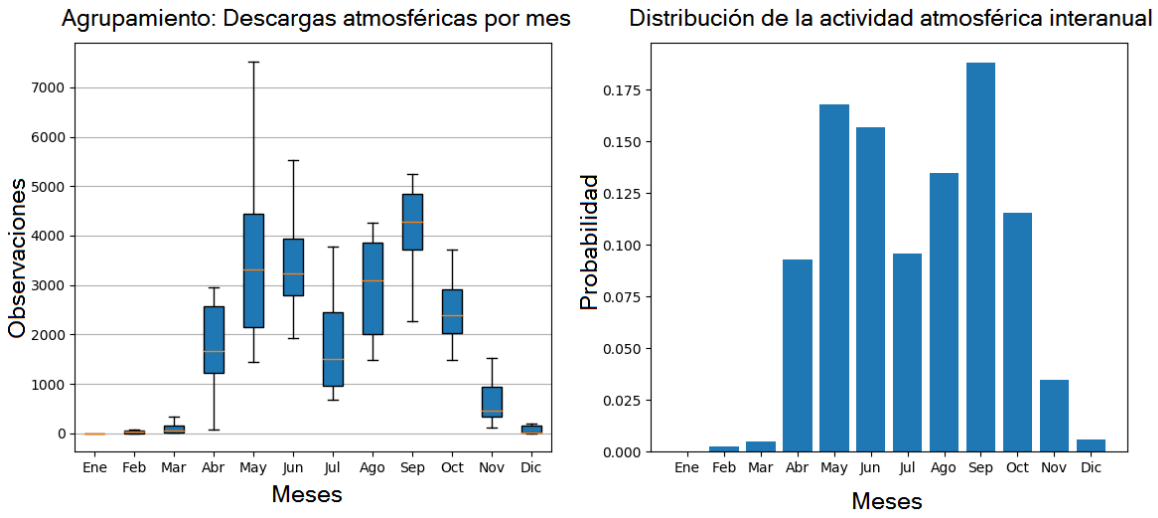


Figura 4.5: Parametrización mensual de la actividad atmosférica: CNFL - 2010-2017

Estimaciones adicionales con modelos ARIMAX fueron desarrolladas para analizar la serie de tiempo respecto a la estacionalidad, datos irregulares y eventos cíclicos. En general, el resultado mostró que la componente regular y la estacional de la serie de datos son determinadas de manera adecuada. No obstante, debido a la extensión de la serie de tiempo no se obtuvieron resultados contundentes para las componentes de cíclica, la cual usualmente requiere series de datos cercanas a los 20 años. Se recomienda continuar explorando este enfoque para determinar la relación de la actividad atmosférica con el fenómeno ENOS (El niño y la niña - Oscilación del Sur). Ese enfoque podría proporcionar información clave para el mantenimiento y operación de los sistemas.

Posterior a la actividad atmosférica interannual se estimó la distribución espacial. De igual manera, se tomó todo el conjunto de datos y se aplicó una división uniforme del área bajo estudio utilizando una estructura de datos Quatree. El resultado de este análisis es un histograma en dos dimensiones, el cual se representa mediante una gráfica de densidad. La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos, junto con los histogramas de cada coordenada que permitirán generar simulaciones de actividad atmosférica. En general, los resultados muestran que existe un mayor nivel de densidad en la zona norte-oeste del área bajo estudio.

Finalmente, para caracterizar las descargas atmosféricas, se estimó la función de probabilidad de la intensidad, emplenado las funciones lognormal y GMM. Los resultados basados en el T-KS, demostraron que ambas funciones presentan muy buen desempeño. En la figura 4.7 se presentan los resultados obtenidos. En la sección del experimento (Capitulo 6), se utilizará una función GMM con n=3. Lo anterior, debido a su versatilidad y bajo el concepto de parsimonia, en el cual se elige la función de menor orden que cumpla los requerimientos establecidos. En la figura de ajuste, los valores de la gráfica fueron reducidos a 50 KA para visualizar las diferencias entre curvas.

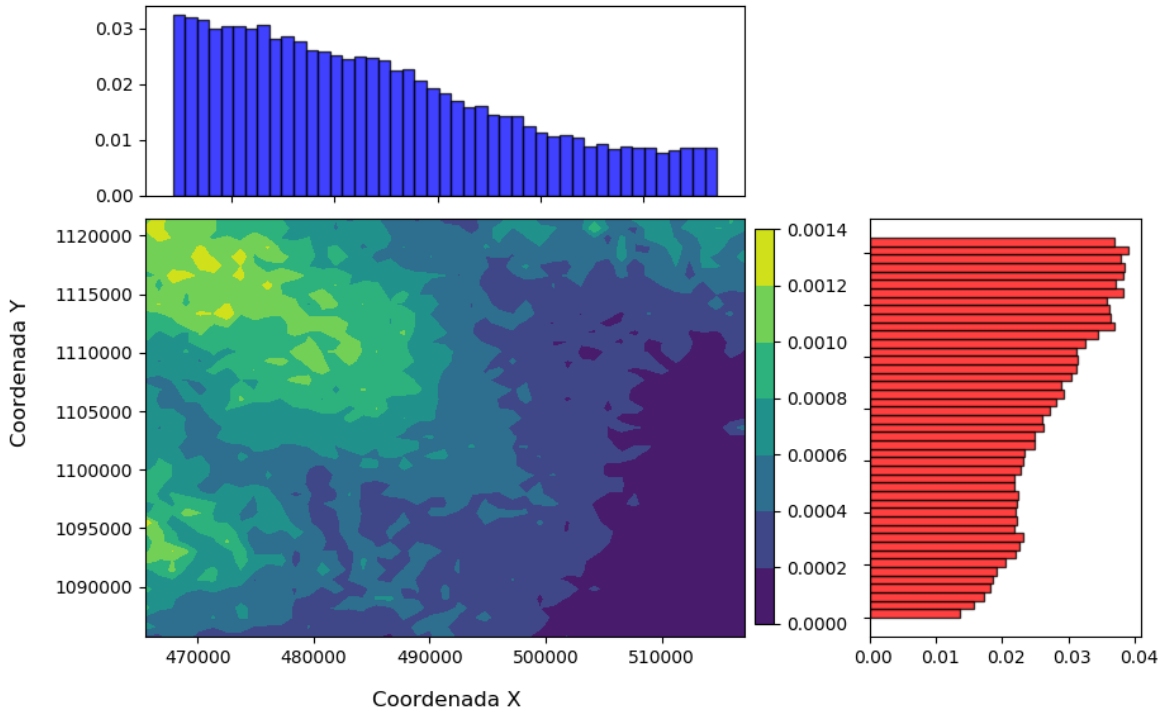


Figura 4.6: Parametrización espacial de las descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017

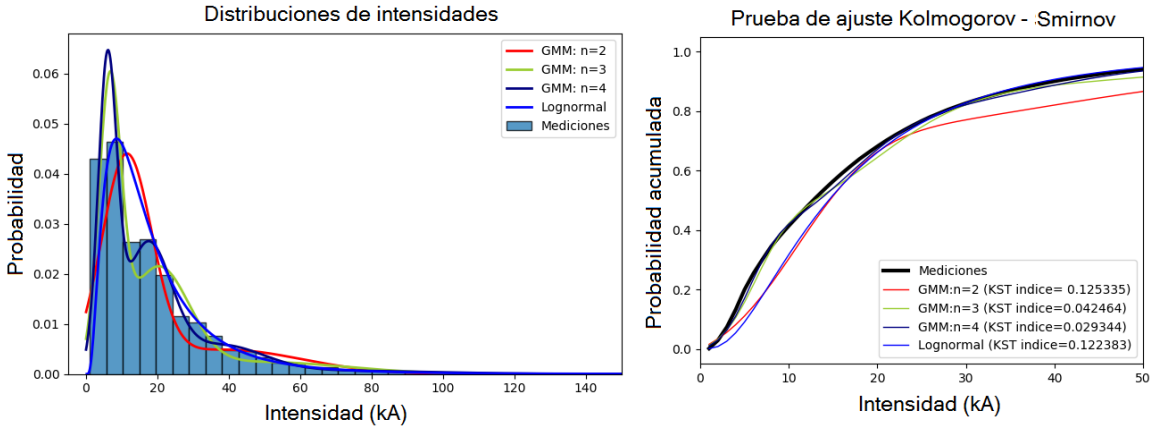


Figura 4.7: Parametrización de la intensidad de descargas atmosféricas: CNFL - 2010-2017

4.2.2. Parámetrización de las sobretensiones de origen atmosférico

Este apartado inicia con el proceso de filtrado de las descargas atmosféricas. Se parte de todo el conjunto de datos completos para las coordenadas seleccionas (acotamiento de la zona) y se extraen aquellos que generaron un aumento de la tensión del sistema superior a 1.05 pu. Como la tensión menor de operación del sistema línea a línea es 13.8 kN, se definió como mínimo valor 8 kV considerando su valor por fase. Esta consideración, únicamente permite eliminar aquellos eventos que por su lejanía o magnitud de corriente no producen efectos significativos al sistema. En una etapa posterior, se contrastan los datos de las sobretensiones con la capacidad de soporte del sistema.

En la figura 4.8 se presenta una sección de sistema bajo estudio, con el objetivo de mostrar el efecto del filtrado o clasificación. Se seleccionó un región ubicada en el centro-norte del área bajo estudio y datos de julio de 2011, de manera arbitraria, únicamente para el ejemplo. La imagen presenta todos los eventos registrados en ese periodo y se destacan los que generaron sobretensiones en el sistema de distribución basado en el criterio mencionado. Estos se representan con círculos de blanco. En la imagen se denota que la mayor parte de los eventos excluidos son los ubicados en la periferia. No obstante, también existen impactos cercanos a las líneas que se descartan porque la intensidad de corriente es baja.

Una vez procesados los datos para el periodo de estudio, considerando el efecto del filtro, se genera el cálculo de sobretensiones a nivel sistémico. De igual manera, al nivel de intensidad de corriente, se establece una histograma con los valores seleccionados y se realizan las pruebas de ajuste con funciones log-normal y GMM. En la figura 4.9 se presentan los resultados. Para esta variable, se considera que la GMM con n=3, cumple los requerimientos de una manera adecuada y brindó el mejor coeficiente de ajuste. En general, se determinó que para este sistema, el 80 % de los datos se encuentra por debajo de los 50 kV, lo cual representa un nivel de sobretensiones relativamente bajo. Lo anterior, es consecuencia directa de un nivel de intensidad moderado en las descargas atmosféricas analizadas.

La división y parametrización de las sobretensiones en dos grupos permite en primer instancia entender de manera amplia el comportamiento de esta variable (rango de 0 - 100 kV) y en segundo orden especificar los eventos que si pueden sobrepasar el nivel de aislamiento (rango superior a 100 kV). Adicionalmente, en las figuras de la prueba de ajuste también se modifican las escala para poder visualizar las diferencias entre las curvas. Los valores de la gráfica fueron reducidos, en este caso a 80 KV y 1000 kV.

En el próximo capítulo, la estimación de sobretensiones será contrastada con el nivel de respuesta del sistema, en cuanto a la cantidad de fallas generadas y su efecto a nivel financiero

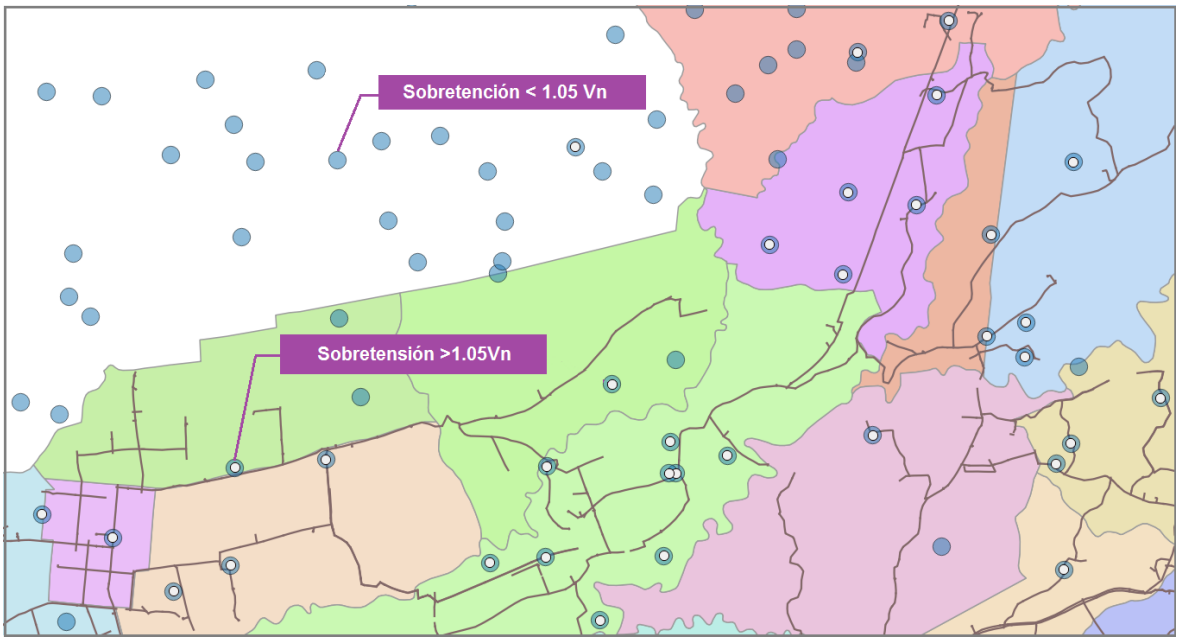


Figura 4.8: Proceso de filtrado de descargas atmosféricas, bajo el criterio de sobre tensión mínima: CNFL - 2011 - Julio

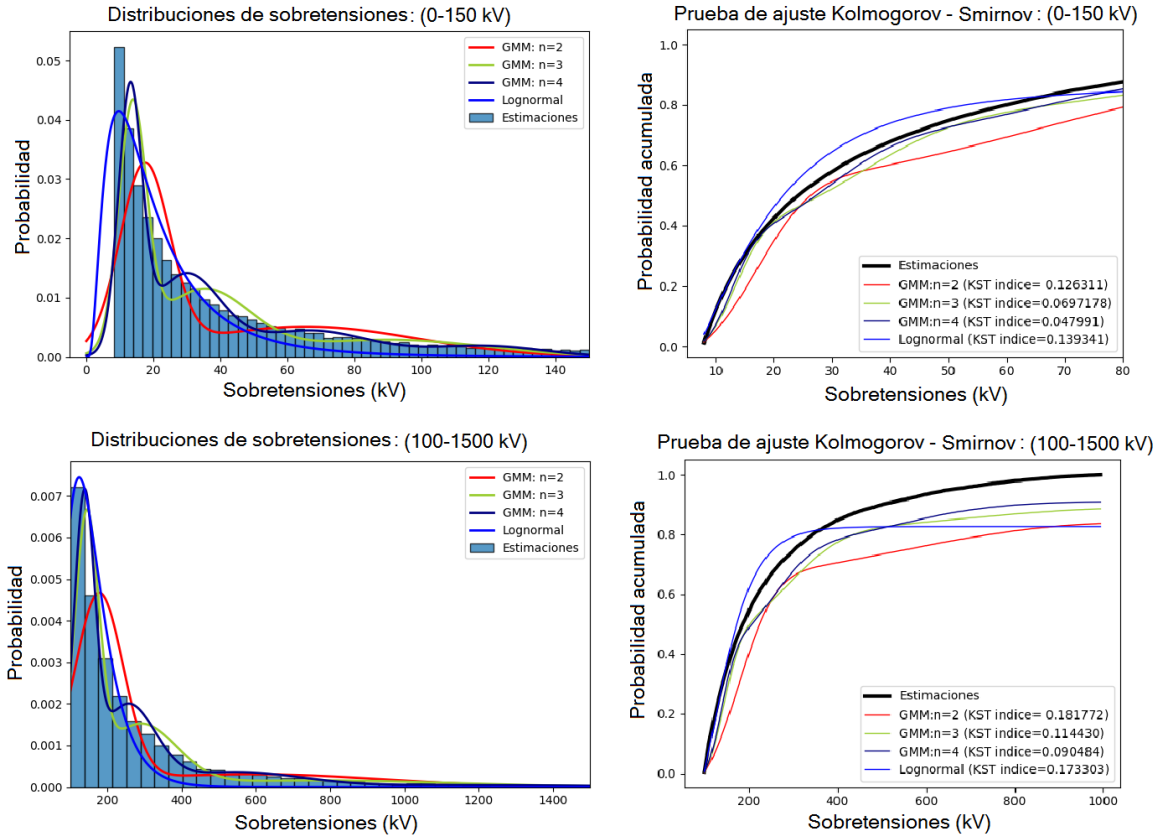


Figura 4.9: Parametrización de Sobretensiones de origen externos: CNFL - 2010-2017

4.3. Síntesis del módulo de sobretensiones

Se desarrolló un algoritmo que permite caracterizar de manera probabilística la actividad atmosférica de una región determinada y las sobretensiones que generan sobre un sistema de distribución de energía eléctrica. En general, respecto al sistema de prueba, se determinó que no existe una correlación fuerte entre los paramétros de descargas atmosféricas. El valor de intensidad tiene una media cercana a los 15 kA y las sobretensiones generadas se agrupan principalmente en el rango inferior a los 100 kV. La tabla 4.1 muestra un resumen de los parámetros caracterizados para el sistema de prueba.

Tabla 4.1: Resumen: Parámetros de descargas atmosféricas y sobretensiones para el sistema de prueba

Variable	**Modelo**	**Descripción**
Correlación de parámetros	Mapa térmico normalizado	El valor máximo de correlación es de 0.35, entre la intensidad y el tiempo de decaimiento (peak to zero)
Variación estacional	Histograma normalizado	Se determinó que el periodo de descargas atmosféricas se ubica entre abril y noviembre, siendo octubre el mes de mayor actividad
Distribución espacial	Histograma normalizado	Se determinó que la zona con mayor actividad es la norte-oeste
Intensidad de descargas	GMM de orden 3	Los valores de intensidad predominantes se ubican en el rango de 0 a 40 kA
Sobretensiones	GMM de orden 3	Los valores de intensidad predominantes se ubican en el rango de 0 a 100 kV. En general, los rango superiores son los de mayor influencia para el sistema
Descargadores de sobretensión	Función uniforme	Se considera un valor de restitución constante a 65 kV (ver tabla 5.1). con espaciamiento a cuatro vanos, lo cual reduce la probabilidad de falla a 25 %

Capítulo 5

Estimación de la confiabilidad operativa

En esta sección se presenta el algoritmo para la estimación de probabilidades vinculadas a la confiabilidad operativa de sistemas de distribución, en presencia de sobretensiones de origen atmosférico. De manera similar al capítulo anterior, se desarrollará una explicación de la lógica empleada, la correspondiente aplicación sobre el sistema de prueba seleccionado y una síntesis de los principales hallazgos.

El análisis que surge en este capítulo contrasta el método tradicionales de coordinación de aislamiento estadística con un enfoque alternativo basado en procesos de Markov. Mientras el procedimiento tradicional utiliza una distribución de probabilidad de sobretensiones y una curva teórica de disrupción de aislamiento para estimar una tasa de fallas (muy utilizado en la etapa de planeamiento y diseño de los sistema de energía), el procedimiento alternativo integra una tasa de fallas y restitución de los sistemas (proveniente de registros históricos) para comprender la vulnerabilidad y el riesgo inherente de las sobretensiones externas. Unos de los beneficios de este enfoque es que conduce a la mejora sistemática del esquema de protección, minimizando costos. Como consecuencia, se define una función de falla del sistema en función del nivel de sobretensión y como caso base, se estima el nivel de impacto de las salidas, considerando costos por energía no suministrada y mantenimiento correctivo.

Se ha definido como punto de partida utilizar cadenas de Markov (en el área de confiabilidad este modelo típicamente es el primer enfoque) orientada a la evaluación de sistemas extensos, basado en la información existente. En general, este tipo de modelos experimenta mejoras con el tiempo debido a una especialización en la recolección de datos y la definición de funciones de probabilidad específicas para la confiabilidad y mantenibilidad. Por tanto, la idea central del modelo actual es entender el nivel de criticidad, definir una estructura que permita ampliarlo, establecer los mecanismos para formalizar las datos, así como el establecimiento de futuros trabajos.

5.1. Estimador de indicadores de confiabilidad

Este módulo utiliza tres conjuntos de datos principales, los cuales corresponden al histórico de salidas del sistema registrado mediante SCADA que contienen fecha y duración de las fallas en el sistema (media tensión trifásico), la estructura de datos denominada *RedDescarga* generada en la sección anterior, la cual brinda información de las sobretensiones generadas por rayos y *RedData* datos de diseño y operación del sistema (costos de mantenimiento y esquema de protección).

El código se ha estructurado en tres etapas: la primera se utiliza para calcular la tasa de fallas teórica del sistema por falla de aislamiento (método tradicional), el segundo identifica los niveles de confiabilidad,mantenibilidad y disponibilidad del sistema (totales y particulares para descargas atmosféricas) y el tercero estima un nivel de impacto promedio para el sistema debido a sobretensiones y normaliza los coeficientes de transición para el modelo de Markov y una función acumulada de probabilidad de fallas en función de las sobretensiones.

La salidas de este módulo permite tener un panorama claro el desempeño de los sistemas de distribución frente a las sobretensiones de origen atmosférico, en el cual se identifica a priori el nivel impacto de estos eventos en relación al total de fallas. Esta ultima consideración, implica calcular el nivel de confiabilidad sistémica y de segmentos de control. A continuación, se presenta el pseudocódigo, el cual contiene una síntesis de los pasos descritos anteriormente.

Algoritmo 5.1: Estimador de indicadores de confiabilidad operativa

Datos: DataSCADA($i\bar{d}_s, \bar{T}_s, \bar{D}_e, \bar{E}q$), RedDescarga ($\bar{n}, i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{d}, \bar{T}, \bar{I}_p, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}$), RedData($\bar{P_S}, co\bar{stos}$)

Resultado: $C_{sc}(U_{max})$, $M_{sc}(U_{max}), f(falla|U_{max})$

inicio;
Generar las estructuras de datos (dataframe) ;
Establecer los segmentos de control y nivel de protección ;
Coordinación de aislamiento, tradicional;
$Filtrar\ \ Sobretenciones$: $DataScada$ y P(S—CFO← $RedDescarga\ RED$;
$Estimar\ \ nivel\ \ de\ \ riesgo\ \ de\ \ falla : \sum\ \ Densidad(sobretensiones) * Acumulada(aislamiento)$;
Estimación de confiabilidad operativa;
$Intersección\ de\ estructuras$: $DataScada$ y $RedDescarga \leftarrow\ \ d = kdtree[T, T_s]$;
$RedDescarga(\bar{n}, ..., \bar{U_{res}}, sa\bar{l}ida) \leftarrow\ \ Agrega\ binario\ de\ salida$;
$SalidaDescarga(i\bar{d}_{sd}, i\bar{d}_d, i\bar{d}_{sc}, \bar{T}f, \bar{T}, \bar{I}_p, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}, \bar{D}ir\}) \leftarrow\ \ genera\ estructura$
$Markov : \ \bar{P_{opera}}\ \ \bar{P_{falla}} \leftarrow\ \ 4\ \ estados\ \ total\ \ y\ \ 2\ \ estados\ \ descargas\ atmosféricas$
$Estima\ \ impacto : \bar{Hist_{riesgo}}$
Funciones de probabilidad de falla;
$Filtro\ eventos\ de\ Falla\ por\ nivel\ de\ sobretensión$;
Usar: ($Función\ de\ ajuste\ lineal$) ;
Define:$f(falla|U_{max})$;
Visualización;
$Genera\ gráficas\ probabilidad\ y\ simulación$
final;

A continuación, se presenta la descripción del algoritmo desarrollado. Una ventaja adicional de este enfoque es que se puede extender de manera progresiva al resto de causas de fallas, especialmente aquellas vinculadas a condiciones atmosféricas. En este contexto, esta estructura es una buena referencia para combinar modelos (en este caso, estimación de sobretensiones y confiabilidad). Las estructuras del mismo se describen a continuación, junto con las entradas y salidas del módulo:

- **Datos de entrada:** Se tienen como entrada tres estructuras de datos. La primera, se denomina DataScada($i\bar{d}_s, \bar{T}_s, \bar{D}_e, \bar{E}q$), la cual contempla todos los registros históricos de salidas en el sistema, donde $i\bar{d}_s$ es un identificador de eventos, $\bar{T}_s$ es una cadena de que tiene información del año, mes, día y minuto del evento, $\bar{D}_e$ es la duración del evento y $\bar{E}q$ es el equipo de control asociado al evento. La segunda estructura es *RedDescarga* ($\bar{n}, i\bar{d}_d, i\bar{d}_r, \bar{d}, \bar{T}, \bar{I}_p, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}, \bar{U_{res}}\}$) que se desarrollo en la sección pasada, la cual incluye una etapa caracterización de eventos representativos. Finalmente, se tiene la estructura *RedData* ($\bar{P}_s, \bar{costos}$) que brinda datos de protección del sistema (niveles de aislamiento y descargadores de sobretensión) y costos asociados a mantenimiento correcto y energía no suministrada por segmento de control

- **Resultados:** Con el procesamiento de datos se obtienen las probabilidades de confiabilidad $C_{sc}(\bar{U}_{max})$ y mantenibilidad y las probabilidades de permanecer en un estado de operación o falla del sistema $\bar{P}_0, \bar{P}_1$, que a su vez permiten estimar la disponibilidad del sistema. Finalmente, la probabilidad de falla en función del nivel de sobretensiones máximas: *f(falla* $\mid U_{max}$)

- **Inicio:** Este proceso consiste en cargar y almacenar las estructuras de datos a ser procesadas. La cantidad de datos históricos relacionados con las salidas del sistema debe ser equivalente al periodo muestreado de descargas atmosféricas.

- **Coordinación de aislamiento por el método tradicional:** Este módulo toma los valores de sobretensiones estimados en el módulo anterior (histograma) y transpone una función acumulada normal, correspondiente al modelo de descarga disruptiva del aislamiento. Poteriormente, suma los valores que están bajo la curva de falla y define un nivel de probabilidad que el sistema presente una falla.

- **Estimación de la confiabilidad operativa:** En este punto se comparan todos los registros temporales de las salidas del sistema con los registros de descargas atmosféricas, con el fin de identificar los eventos que generan salidas al sistema debido a sobretensiones. Se incluye en la estructura *RedDescarga* un valor binario que indica si el evento genera una salida. Adicionalmente, se genera una nueva estructura que asocia los impactos $i\bar{d}_d$ que generan salidas en el sistema a segmentos de control $i\bar{d}_sc$, considerando la duración del evento $\bar{T}f$, el nivel de sobretensión $\bar{U_{max}}$ y otro valor binario que indica que la salida es consecuencia directa del impacto o bien corresponde a la configuración de la red o pérdida de fuente de alimentación:

$SalidaDescarga(\bar{id_{sd}}, \bar{id_d}, \bar{id_{sc}}, \bar{Tf}, \bar{T}, \bar{I_p}, \bar{t_f}, \bar{U_{max}}, \bar{Dir}\})$. Para determinar la coincidencia entre salidas y eventos atmosféricos se utilizo una cadena de caracteres y la técnica kd-tree. En este caso, considerando una coincidencia de año, mes, día, hora y dejando un margen de 15 minutos entre registros. Adicionalmente, para simplificar la búsqueda se generan cuadrantes alrededor de cada impacto, seleccionando únicamente los alimentadores de mayor proximidad.

- **Análisis de confiablidad operativa:** esta etapa permite comparar los niveles de confiablidad del sistema, empleando un modelo de cuatro estados para cada elemento de control, (considerandos etapas de verano e invierno), con los valores específicos vinculados a la descargas atmosféricas. Con esta estimación surgen las probabilidades de cada estado P_{falla} *y* P_{opera}. *Finalmente, con estos datos se construyen histogramas de operación continua.*

- ***Probabilidad condicional de falla:*** *Basado en el la cantidad de fallas que fueron seleccionadas como salidas por descargas atmosféricas, se construye una dispersión de datos simple. Posteriormente, se define función lineal para caracterizar las fallas en función del nivel de sobretensiones:* $f(falla|U_{max})$

- ***Fin:*** *Con esta secuencia finaliza la segunda etapa de análisis, la cual queda almacenada para etapas de visualización*

En la figura 5.1 se muestra de manera esquemática la idea desarrollada. Para tal efecto se considera un sistema compuesto por tres alimentadores de media tensión provenientes de diferentes subestaciones, cuatro equipos de protección, dos enlaces automáticos y tres eventos atmosféricos con capacidad de generar salidas del sistema. Cada segmento de control se define como la linea de media tensión aguas abajo de un equipo de protección (hasta el final de la misma o hasta encontrar enlaces manuales o automáticos con otros alimentadores). En esta configuración se analizará cada un de los eventos:

- **Impacto 1:** Genera un registro de salida en el segmento de control protegido por el equipo E2. Un registro adicional define el tiempo de duración de la falla hasta la puesta en servicio. En este evento, el segmento controlado por E1, no sufre alteraciones.

- **Impacto 2:** Similar al evento anterior, este evento únicamente incluiría registros de salida y duración para el segmento controlado por E4. Dicho circuito solo cuenta con ese elemento de protección.

- **Impacto 3:** Este evento contempla una secuencia de restablecimiento. El evento inicialmente genera una salida para el segmento E1 debido a la sobretensión y sobre en el segmento E2 debido a la configuración en estado estable del sistema (aguas abajo). Debido a que el segmento controlado por E2 tiene la posibilidad de ser alimentado desde otra fuente, se ejecuta la acción de abrir E2 y cerrar E5. De esta manera el evento generó la salida completa del circuito (2 segmentos), pero tiene tiempos de restablecimiento diferente.

Con el algoritmo se espera tener salidas similares a las mostradas en la figura 5.2. Los valores sintetizan la probabilidad que los segmentos de control permanezcan en estado de operación o falla.

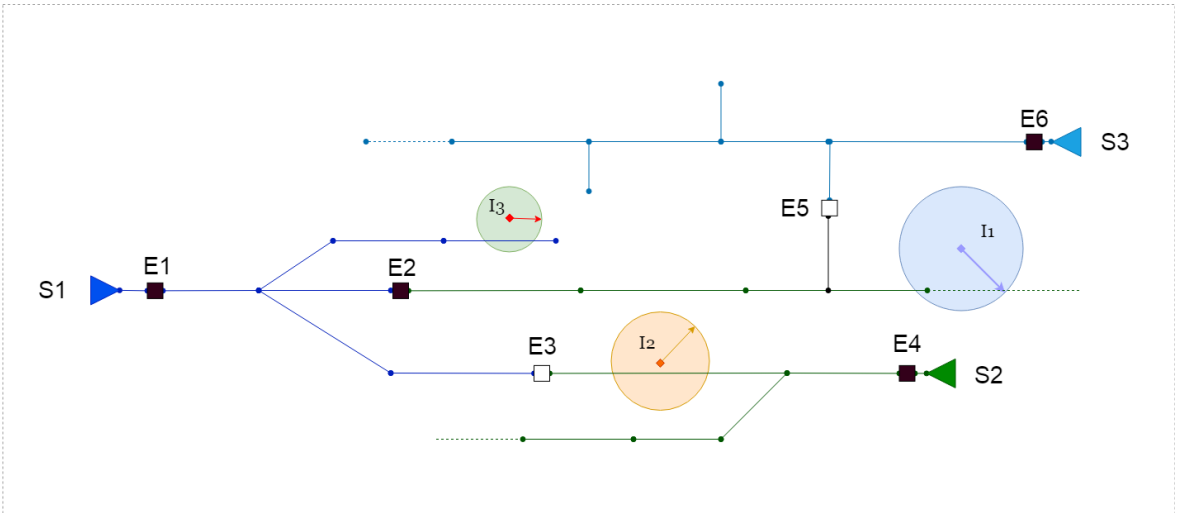


Figura 5.1: Esquema conceptual operación en un sistema de distribución ante descargas atmosféricas

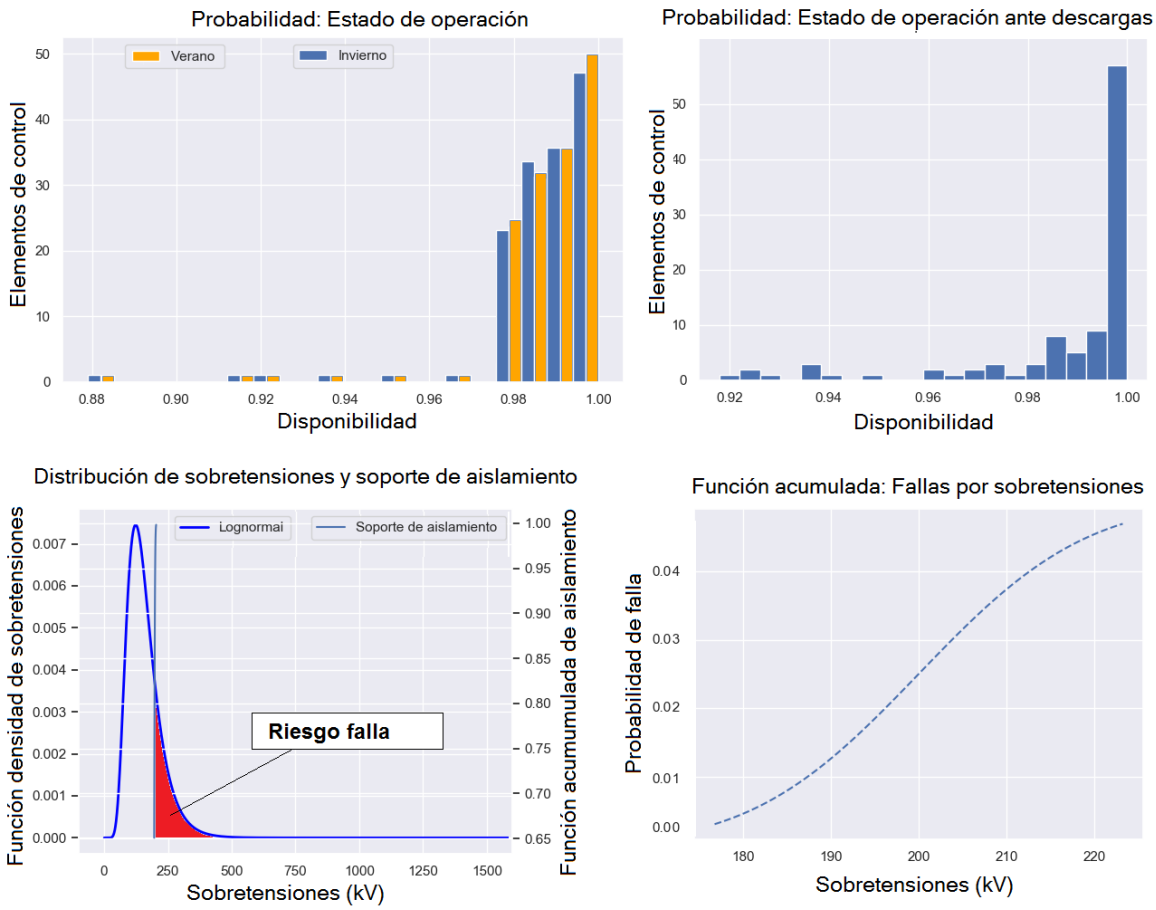


Figura 5.2: Gráficas teóricas (salidas esperadas) del módulo de confiabilidad

5.2. Implementación del algoritmo de confiabilidad en un sistema real

De igual manera al capítulo anterior, se realizará una implementación utilizando el sistema de la CNFL. Esta empresa cuenta con un Centro de Control de Energía, en el cual se realizan las acciones operativas para ejecutar trabajos de mantenimiento, restablecer el sistema ante fallas y controlar variables como tensión y cargabilidad entre otros. Este equipo de trabajo es el encargado de registrar los eventos del sistema utilizando como herramienta un sistema SCADA y el DMS. Actualmente, existe un sistema adicional denominado Sistema de Generación y Distribución (SIGEDI) en el cual se registran y genera las estadística de fallas, restablecimientos y operaciones.

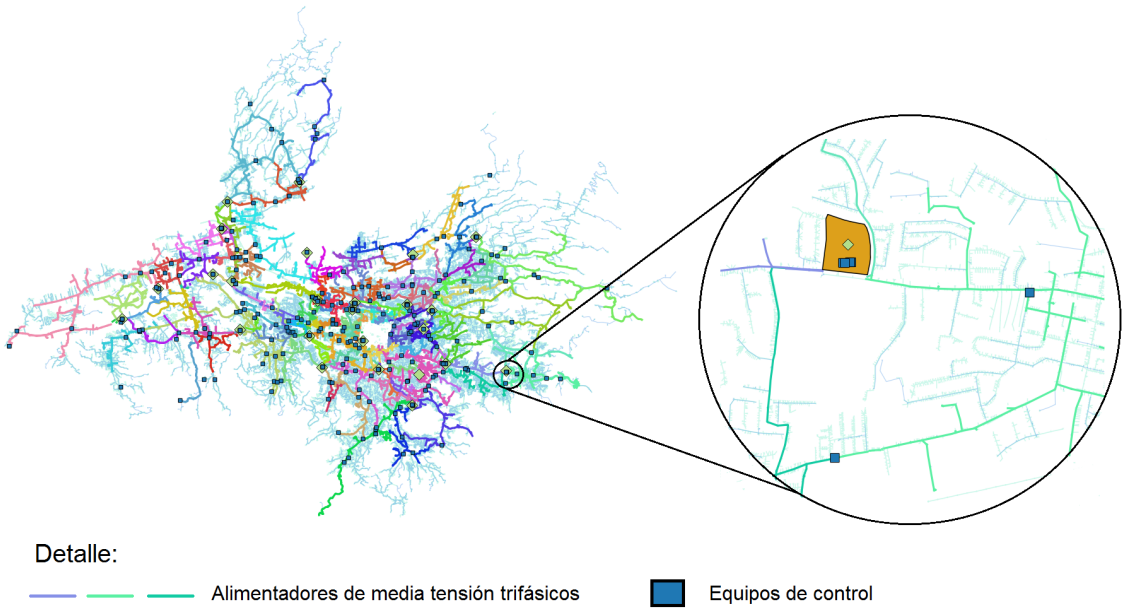


Figura 5.3: Red eléctrica georeferenciada y equipos de control de la de CNFL

El sistema bajo estudio esta conformado por 98 alimentadores de media tensión trifásicos, con tensiones nominales de 34.5 kV y 13.8 kV. La red seleccionada se compone de 200 segmentos de con control con equipo automatizado clasificados en: Interruptores de subestación y reconectadores (controles). Otros elementos como seccionadores de línea (enlaces entre circuitos) únicamente permiten generar maniobras en el sistema y los traslado de carga entre circuitos. Finalmente, las líneas de media tensión bifásicas, derivaciones monofásicas y la red de baja tensión no es contemplada en este estudio, debido a que no cuenta con datos disponibles de salidas y tiempos de reparación. La figura 5.3 muestra una vista general del sistema bajo estudio y un detalle de una zona ubicada al este del área metropolitana, en la cual se detallan los tres tipos elementos mencionados.

5.2.1. Estimación de riesgo bajo el método tradicional

El primer paso corresponde a la identificación del esquema de protección del sistema ante sobretensiones, el nivel de aislamiento utilizado, y la estimación preliminar de la tasa de fallas, considerando la distribución de sobretensiones calculada en el capítulo anterior. La tabla 5.1 muestra una síntesis de los dispositivos empleados en el sistema bajo estudio. Los datos fueron obtenidos luego de analizar las especificaciones y los montajes electromecánicos que utiliza esta empresa. En general, la CNFL utiliza criterios exigentes de selección de sus materiales y utiliza los valores mas altos que brindan las normas. Por ejemplo, para aislamiento de tipo poste, utiliza la clasificación ANSI 57-3 y para descargadores de sobretensión la clasificación "heavy-duty"*o* riser-pole", ambas de ANSI. Adicionalmente, están incursionando en la utilización de red compacta para zonas con alta vegetación o zonas urbanas de difícil acceso y la instalación se protectores electroestáticos de vida silvestre.

Tabla 5.1: Elementos del esquema de protección y principales parámetros, en CNFL

Nombre	**Normas**	**Parámetros eléctricos básicos**
Aislador tipo poste (porcelana)	ANSI C29.7	$V_{nom} = 45kV$ | $CFO = 200kV$
Aislador suspensión (sintético)	ANSI C29.13	$V_{nom} = 35kV$ | $CFO = 200kV$
Cortacircuitos (porcelana)	ANSI C29.6	$V_{nom} = 25kV$ | $BIL = 150kV$
Seccionadores (sintética)	ANSI C29.6	$V_{nom} = 25kV$ | $BIL = 150kV$
Descargador de sobretensión (34.5kV)	ANSI C62.11	V_{MOC}= 27 kV | MVD= 65 kV
Descargador de sobretensión (13.8kV)	ANSI C62.11	V_{MOC}= 8.4 kV | MDV= 25 kV

*Valor estándar de 8x20@10kA

Debido a que estos elementos están dispersos por toda la red y son heterogéneos, se utilizará el de menor rango de soporte frente a señales tipo impulsivas. En este caso, se utilizará un valor de 200 kV de CFO, el cual será considerado no autoregenerable. En la figura 5.4 se contrastan las funciones de densidad de las sobretensiones estimadas en la sección anterior, con la función de distribución acumulada de falla del soporte. La probabilidad de falla corresponde al área bajo la curva de soporte y se estima en 0.006623. La cantidad de fallas anuales se obtiene multiplicando la probabilidad de fallas por el números promedio de eventos anuales. Basado en los registros históricos, se estima que el sistema presentará 7.2 fallas al año debido a descargas atmosféricas, en la red trifásica de media tensión

Este procedimiento corresponde al método tradicional para estimar la tasa de fallas de los sistemas y en general brinda buenos resultados. Debido a la incertidumbre en cuanto a la vejez del aislamiento, el estado de los sistema de protección, las variaciones en parámetros ambientales (presión y temperatura), las diferencias en alturas y los niveles de apantallamiento debido a vegetación o edificios, hacen que

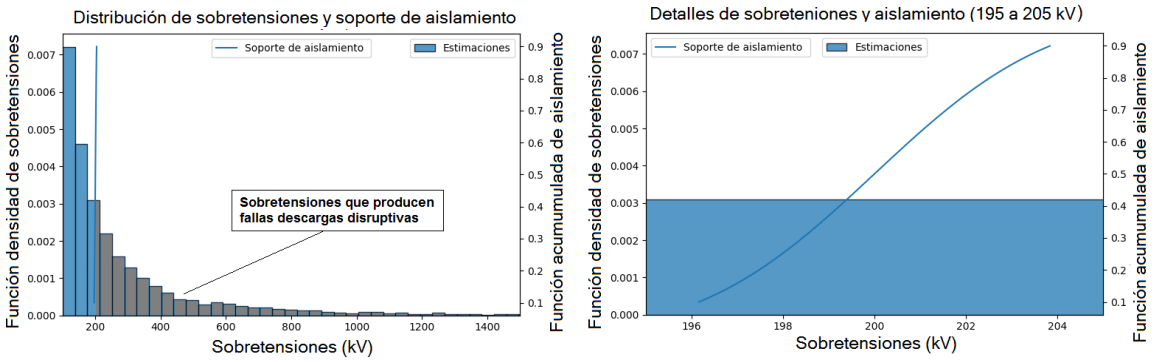


Figura 5.4: Estimación de la probabilidad de fallas en el sistema de CNFL, método tradicional

la estimación no siempre sea la mas exacta. El enfoque alternativo propuesto en esta tesis, es partir del cálculo numérico de las sobretensiones desarrollada en la sección anterior y una asignación de tasa de falla considerando registros de salidas reales del sistema (por segmento controlado) mediante una cadenas de Markov.

5.2.2. Estimación de riesgo bajo el método alternativo

Bajo este enfoque, lo primero es identificar los niveles de disponibilidad del sistema considerando la la lógica operativa descrita en la sección anterior. Con esta premisa se determinó que el sistema puede ser analizado mediante la división de elementos de control y un modelo de Markov de cuatro estados, con el fin de verificar una variación temporal y espacial en época seca y lluviosa. En la figura 5.6 se presenta el sistema utilizado y los histogramas de disponibilidad estimados.

El modelo seleccionado tiene probabilidades de operación y falla para época seca y lluviosa, con coeficientes de transición vinculados a las tasas de falla y reparación (λ y μ) para cada estación y transiciones entre las dichas épocas (m y n). Utilizando como referencia la parametrización temporal de las descargas (interanual) determinadas en la sección anterior, se consideró que los meses de época lluviosa se extienden desde abril a noviembre y la estación seca de diciembre a marzo. En el Anexo 2, se presentan el desarrollo de las ecuaciones de este sistema. En general, se determinó que cerca del 50 % de los segmentos de control tienen una probabilidad de mantenerse en operación cercana a 0.999 (tres nueves). En este caso, la época seca presenta el mejor nivel de operación continua (aun considerando que tiene mayor cantidad de meses).

Como segundo paso, se define una relación entre la actividad atmosférica y salidas del sistema en SCADA. Con estos parámetros se realiza un ejercicio similar al anterior, pero con un modelo de Markov de dos estados (solo época lluviosa) y se estima la probabilidad del sistema para permanecer en su estado de operación continua o bajo falla. Bajo este procedimiento se determinó una tasa de falla anual es de 3.14 y un tiempo medio de restitución de 28 min. En contraste con el procedimiento de tradicional, se considera que este valor representa de mejor manera la frecuencia de falla.

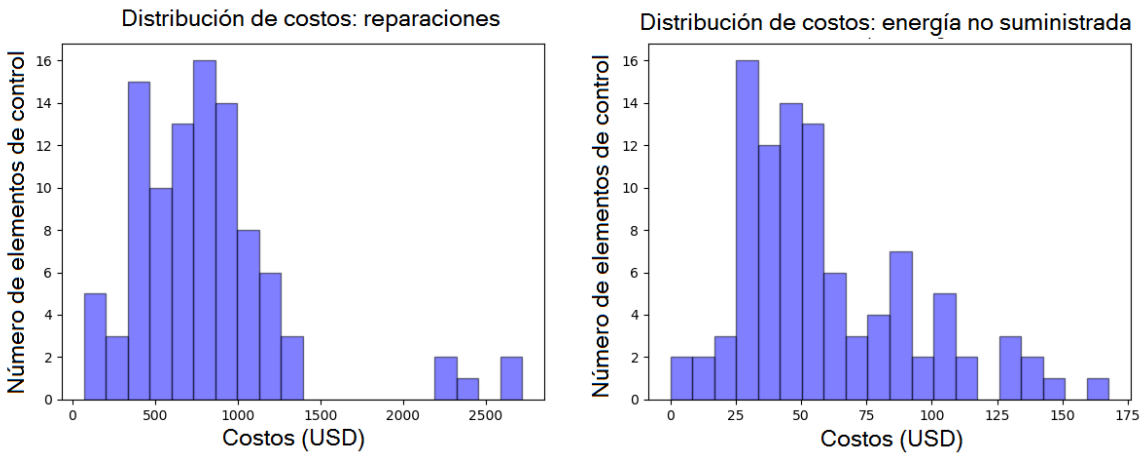


Figura 5.5: Distribución de costos por segmento de control: CNFL 2017-2018

El beneficio adicional de este proceso es que permite definir los niveles de disponibilidad y de manera complementaria el impacto o efecto de las salidas. La figura 5.7 muestra la distribución de las probabilidad de permanecer en estado de operación continua, ante descargas atmosféricas. En este caso, ante el poco surgimiento de eventos con magnitudes superiores a los niveles de aislamiento, se encontró que el sistema tiene una probabilidad promedio de operación continua 0.999997 (cinco nueves). Adicionalmente, se determinó que las salidas por descargas atmosféricas representan menos del 1 % de fallas en CNFL. Esta información, no es trivial, ya que en general, las empresas desconocen este dato y la mayor parte de las salidas de este tipo, terminan sin una causa aparente.

Respecto al nivel de impacto que tienen los eventos atmosféricos sobre el sistema de distribución, se utiliza un enfoque financiero que incluye los costos de energía no suministrada (intermediación de compra y venta) y los costos de mantenimiento. En la figura 5.5 se muestran las distribuciones de costos, los cuales se describen a describen a continuación:

- Costos de energía no suministrada: es el consumo promedio de energía no suministrada (consumo promedio por tiempo de indisponibilidad), multiplicado la diferencias entre las tarifas de venta y compra. Se considera la composición de sectores: residencial, comercial e industrial de cada segmento de control

- Costos de mantenimiento: En este caso se utiliza el valor promedio de reparación por falla, el cual contempla costos de desplazamiento, mano de obra y materiales. Para este caso, no se incluyó el costo de mantenimiento preventivo, ya que no existe un plan específico para sistemas de protección contra sobretensiones (no es un elemento diferenciador) y adicionalmente, anualmente la CNFL no cubre la totalidad de circuitos. Tampoco se incluyó el costo por penalizaciones ya que no existe una normativa especifica para esto, ni los costos por indemnización a usuarios, que corresponde al dinero que la empresa desembolsa por daños a equipos electrónicos.

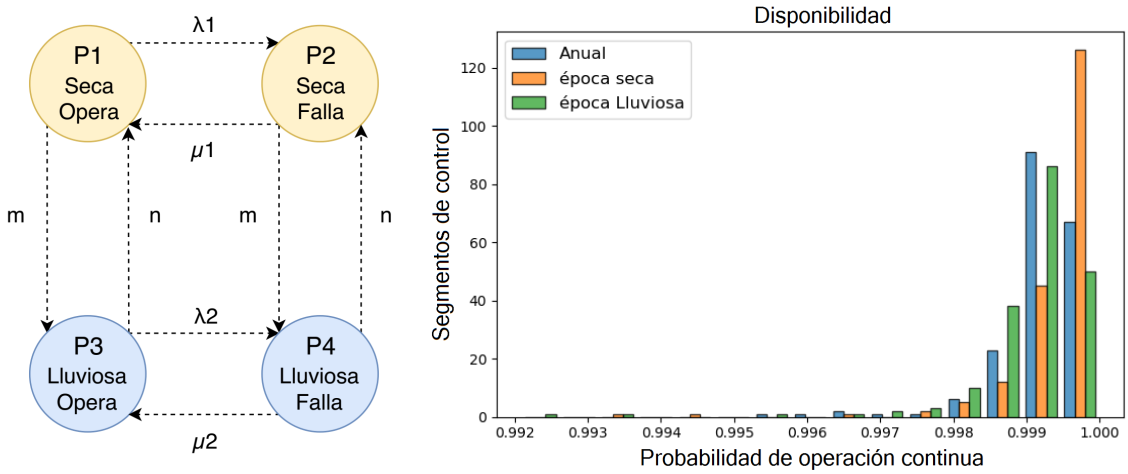


Figura 5.6: Disponibilidad de segmentos de control aplicando un modelo de Markov de cuatro estados: CNFL - 2010-2017

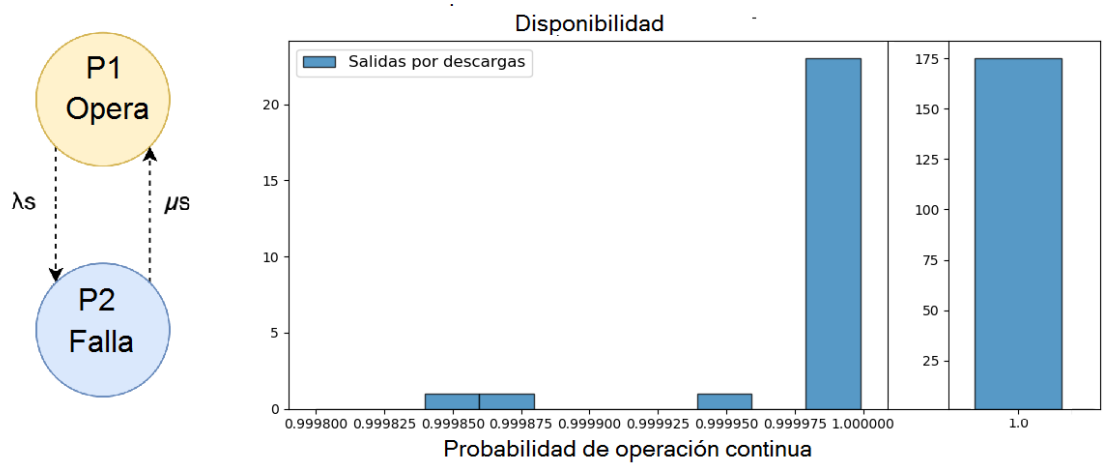


Figura 5.7: Disponibilidad frente a descargas atmosféricas de segmentos de control aplicando un modelo de Markov de dos estados: CNFL - 2010-2017

Tabla 5.2: Probabilidad condicional de falla en CNFL, debido a los niveles de sobretensión

S_i (kV)	100	200	300	400	500	600	700	Total
P(F|Si)	0.00025	0.00068	0.00236	0.00115	0.00235	0.00342	0.00463	0.00047
P(O|Si)	0.99975	0.99932	0.99764	0.99885	0.99766	0.99659	0.99539	0.99953

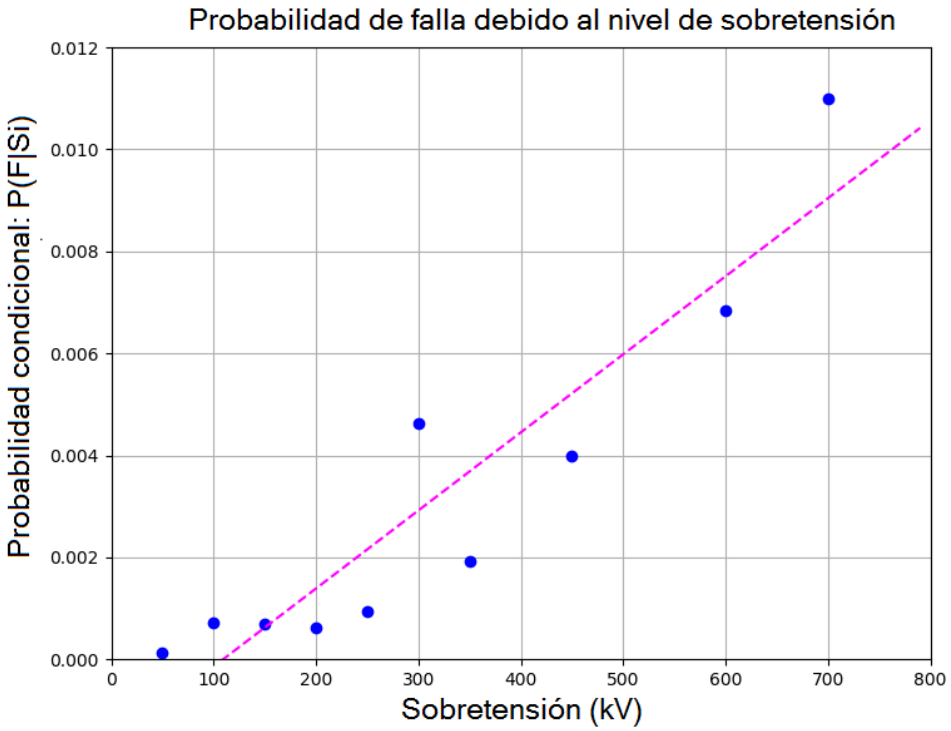


Figura 5.8: Probabilidad de falla condicionada al nivel de sobretensión: CNFL - 2010-2017

Basado en los registros del sistema en estudio se determinó que en promedio los costos anuales asociados a descargas atmosféricas corresponden a 2050 USD, de los cuales 93 % corresponde a los costos de reparación y 7 % a costos por energía no suministrada.

Finalmente, también se establece la probabilidad condicional de fallas $\mathbf{P(F)}$ ante el surgimiento de las sobretensiones S_i que han sido estimadas, combinando los datos de descargas atmosféricas, los registros de salidas del SCADA y las estimaciones de sobretensiones. En la tabla 5.2 se muestra una síntesis de las salidas del sistema debido a los niveles de sobretensiones. En la figura 5.8 se presenten la gráfica de probabilidad condicional estimada. El ajuste lineal que se presentan en esta figura se utilizará en un análisis de Monte Carlo (capítulo 6), el cual permitirá clasificar eventos de acuerdo a las dos regiones que se generaron, en donde se considerará que la zona inferior a la línea generará fallas en el sistema. Bajo este concepto y con el procesamiento de datos, se reconoce que aún ante el surgimiento de eventos con gran magnitud, el sistema puede mantener la continuidad.

La incorporación de esta probabilidad condicional, es el concepto que permite conjuntar la teoría de confiabilidad con el análisis de sobretensiones en un contexto real de operación de sistemas de distribución.

5.3. Síntesis del módulo de confiabilidad

Se desarrolló un algoritmo para analizar la probabilidad de fallas de sistemas de distribución ante descargas atmosféricas. El proceso permite comparar la técnica tradicional con un procedimiento alternativo basado en confiabilidad operativa, aplicando cadenas de Markov. Respecto al sistema de prueba, se determinó que el sistema presenta una condición de sobre-aislamiento y protección, que favorece en gran medida la continuidad del servicio (el cual es caracterizado por el índice de disponibilidad). Adicionalmente, se estableció una función de probabilidad de falla dependiente del nivel de sobretensión y se estimó un nivel de impacto financiero anual como referencia. La tabla 5.3 muestra un resumen de los principales resultados obtenidos en este capítulo.

Tabla 5.3: Resumen: Parámetros de descargas atmosféricas y sobretensiones para el sistema de prueba

Variable	**Modelo- norma**	**Descripción**
CFO (base)	Normas ANSI	Se determinó que el sistema presenta un CFO mínimo de 200 kV, basado en ANSI DS-35
U_{res} (DS)	Normas ANSI	Se determinó que la tensión de restitución es de 65 kV para redes de 34,5 kV, y las especificaciones conducen a los descargadores "heavy-dutyƶ riser-pole"
Tasa de fallas por rayos	Método tradicional (estadístico)	Se determinó que el sistema experimenta 7.2 fallas al año (en promedio), utilizando el método clásico, que suma la intersección entre la función distribución acumulada de sobretensiones y la función acumulada de soporte del aislamiento.
Disponibilidad Total	Cadenas de Markov de 4 estados	Se estimó que cerca del 50 % de los segmentos de control tienen una probabilidad de mantenerse en operación cercana a 0.999 (tres nueves).
Disponibilidad (Rayos)	Cadenas de Markov de 2 estados	Para el caso de descargas atmosféricas se determinó una tasa de falla anual de 3.14 y un tiempo medio de restitución de 28 min. En este contexto, la probabilidad promedio de operación continua 0.999997 (cinco nueves).
$f(falla\|U_{max})$	Función líneal	Se estableció una función lineal con dominio mayor o igual a 100 kV y una probabilidad de falla total de 0.00047. Considera todas las sobretensiones, ya que a valores menores a 100 kV, se les asigna probabilidad de falla igual a cero %
Impacto	Estimador de riesgo	Basado en los registros del sistema en estudio se determinó que en promedio los costos anuales asociados a descargas atmosféricas corresponden a 2050 USD, de los cuales 93 % corresponde a los costos de reparación y 7 % a costos por energía no suministrada %

Capítulo 6

Análisis de riesgo usando un modelo de Monte Carlo y técnicas de agrupamiento

En este capítulo se presenta un módulo de simulación para estimar el nivel de riesgo que tienen las sobretensiones de origen externo sobre los sistemas de distribución, en el cual se combinan los dos programas anteriores: sobretensiones y confiabilidad con una una etapa adicional de agrupamiento. Utilizando la misma estructura de las secciones anteriores, se describirá el algoritmo y posteriormente se desarrollará la aplicación sobre el sistema de prueba. Esté modulo al ser de carácter exploratorio no presenta salidas esperadas o teóricas, sino, únicamente se muestran los resultados de la implementación en el sistema de prueba.

El módulo se base en el método de Monte Carlo, el cual es una de las técnicas vigentes para el desarrollo de coordinación de aislamiento. No obstante, los métodos tradicionales abarcan principalmente una estimación de la tasa de fallas, omitiendo las consideraciones operativas del sistema. Está propuesta, expande el método alternativo presentado en la sección anterior en un entorno de simulación, lo cual permite valorar cambios en el sistema como: modificaciones en la topología de la red, cambio en el esquema de protección y cambios en la respuesta de atención de fallas entre otros. Este proceso, considera una estimación de error que permite la calibración del modelo y el módulo se enfoca en las estimación de niveles de criticidad.

La etapa adicional, clasifica de manera topológica los niveles de criticidad del sistema de distribución ante sobretensiones de origen externo. Para tal efecto, se emplea el algoritmo de agrupamiento K-means, un análisis de grupos basado en el coeficiente de Silueta y diagramas de Voronoi. Esta combinación ha sido seleccionada debido a su amplio uso en sistemas de potencia y es incluido como complemento metodológico.

6.1. Análisis de riesgo: Sobretensiones, confiabilidad y nivel de impacto

Este módulo utiliza un conjunto de variables aleatorias generadas con el módulo de estimación de sobretensiones e información de la red georeferenciada para establecer el vinculo entre los eventos atmosféricos y el sistema bajo estudio. Posteriormente, se incluye la información del módulo de confiabilidad que incluye la probabilidad condicional de ocurrencia de falla por nivel de sobretensión y la probabilidad de restitución. Adicionalmente, se incluye una matriz con información adicional que incluye los costos de las fallas por segmentos de control que permite determinar el impacto. Finalmente, un algoritmo de agrupamiento se utiliza para determinar zonas de control o intervención. La estructura general del módulo se muestra en el siguiente pseudocódigo.

Algoritmo 6.1: Estimador de nivel de riesgo: Efecto de sobretensiones de origen atmosférico

Datos: $EspacioPoisson(N_t = k),\ Intensidad(I, t_f),\ M_{sc}(U_{max}), f(falla|U_{max})$, RedEléctrica($i\bar{d}_r, \bar{V_n}, \bar{x_2}, \bar{y_2}, \bar{Z_c}, \bar{d_{eg}}, \bar{Ds}$), Costos(,
Resultado: Mapa de nivel de riesgo: R=P[A]$\cdot P[C|A] \cdot u(c)$

inicio;
Generar las estructuras de datos (dataframe) ;
Modelo de Monte Carlo;
Con n iteraciones;
para $i \leftarrow 1$ ***en*** n **hacer**
    Genera n variables aleatorias : $EspacioPoisson(N_t = k),\ Intensidad(I, t_f),\ Uniforme:\ fu(x)$;
    Estima sobretensión : $U_{max} \leftarrow$ *Usa Módulo sobretensión* ;
    Asigna probabilidad de falla : *evento* $S_i \leftarrow y_i = fu(x_i)$;
    si $U_{max} > 1{,}05 \cdot V_n \ \wedge\ y_i > P(F|S_i)$ **entonces**
        Acepta condición de falla ;
        Asigna tasa de restitución por elemento de control;
        Estima probabilidades de falla y operación $\leftarrow$ *Usa Módulo confiabilidad* ;
        Estima el efecto de la falla $\leftarrow R = P[A] \cdot P[C|A] \cdot u(c)$;
        Almacenadatos
Estimación de error $\leftarrow$ *Teorema de límite central*;
*Ecuación*1;
*Ecuación*2;
si *error* $<$ *0.05* **entonces**
    Detiene el proceso y pasa a agrupamiento
en otro caso
    aumenta n y repite el procedimiento
Agrupamiento;
Genera matriz de características $\leftarrow M$;
Define número de centroides máximos **k** ;
Aplica algoritmos de agrupamiento e indicadores $\leftarrow$ **K−mean** *y* **Silueta**
Visualización;
Genera gráficas y capas georeferenciadascon los resultados
final;

A continuación, se presenta una descripción de los pasos establecidos en el pseudocódigo.

- **Datos de entrada:** El algoritmo toma como entrada las funciones de probabilidad para simular la densidad de impactos e , la caracterización de intensidad de descargas *Intensidad*(I, t_f) y las sobretensiones máximas que surgen en el sistema: *Sobretensiones* (U_{max}), del módulo de sobretensiones. Además, incorpora las probabilidades de permanecer un estado de operación y falla del sistema $\bar{P}_0, \bar{P}_1$, que a su vez permiten estimar la disponibilidad operativa, del módulo de confiabilidad. Finalmente, la probabilidad de falla en función del nivel de sobretensiones máximas: *f(falla* $\mid U_{max}$)

- **Resultados:** El resultado del programa es un mapa georeferenciado con una cantidad representativa de zonas de control, clasificadas de acuerdo al nivel de criticidad o impacto (riesgo) causado por sobretensiones de origen externo. En este caso, se emplean una combinación de las tecnicas k-means, y diagramas de Voronoi y se definen las zonas como $\mathcal{V}(p_i)$, donde cada zona de control i, esta clasificada por un riesgo $R = P[A] \cdot P[C|A] \cdot u(c)$.

- **Modelos de Monte Carlo:** Este submódulo tiene una etapa inicial en la cual se declara la cantidad de simulaciones que se desea desarrollar y se genera un conjunto de variables aleatoria (igual al número de simulaciones seleccionado) de la ubicación de las descargas atmosféricas, intensidad de descargas y confiabilidad.

  Posteriormente, utilizado el "módulo de estimación de sobretensiones"se calcula el nivel de sobretensiones que generan los impactos sobre la red considerando la red conferenciada previamente cargada. Una vez cumplida esta etapa, se utiliza el "módulo de confiabilidad", para asignar una probabilidad de falla a cada evento (basado en la función de falla condicional). En este punto, si la asignación de la falla es positiva (cumple el criterio de nivel de sobretensión y se encuentra en zona de falla), se asigna una tasas de restitución (basada en las cadenas de Markov).

  Con esta gama de eventos desarrollados, se procede a estimar las probabilidades de falla y operación y en consecuencia el nivel de disponibilidad e indisponibilidad de los segmentos de control. Una vez clasificados los efectos de las descargas atmosféricas, se procede a estimar el nivel de impacto financiero sobre el sistema. Para tal efecto, se incluye sobre cada elemento de control los costos asociados a las reparaciones y los correspondientes a energía no suministrada.

  Finalmente, se evalúa el porcentaje de error de la simulación, considerando como caso base el valor de disponibilidad del sistema estimado en el capítulo anterior. Se ha fijado como criterio que este valor debe ser menor o igual al 5 % y en general, se ha utilizado el teorema de límite central, basado en una función normal, aplicando 100 ciclos bajo una misma cantidad de simulaciones (número de impactos), para estudiar la distribución del error. Si no se cumple el criterio mencionado, se repite el proceso aumentando el número de simulaciones.

- **Algoritmo de agrupamiento:** Este submódulo tiene como objetivo organizar de manera geográfica los resultados del análisis de riesgo. Por tal motivo, únicamente se analizan los impactos que generaron una sobretensión representativa con falla. Se inicia estimando una matriz de correlación entre variables claves, en este caso: Costo (impacto total), coordenada y X, Coordenada Y, las cuales son previamente normalizadas utilizando como base los valores promedios. En este contexto, se debe garantizar un correlación baja entre variables, con el fin de que sean representativas dentro del análisis.

  Definidas las variables, se genera un ciclo iterativo con diferentes número de grupos (centroides) aplicando k-means, con el fin de evaluar el coeficiente de silueta y definir los valores mas adecuados para generar el análisis global de agrupamiento. Típicamente, esto se representan mediante una gráfica en la cual, el coeficiente aumenta hasta un valor máximo (usualmente se conoce como óptimo) conforme crece el número de grupos y posteriormente decrece a valores muy bajos. No obstante, se debe valorar la utilidad de este coeficiente, dentro de un contexto de aplicación practica, es decir, la elección del número de grupo, podría no ser ese valor óptimo.

  Una vez elegido el valor de grupos, se procede a generar el agrupamiento con K-means y el respectivo análisis sobre el agrupamiento. Como este es un sistema de tres variables se puede generar un análisis gráfico (tanto del agrupamiento como del coeficiente de silueta). En este contexto, se le brinda mayor atención a la proyección de las coordenadas geográficas (X y Y), con el fin de brindar información útil para la toma de decisiones.

  Con el fin de sintetizar la información generada y eliminar la dispersión de datos provenientes de cada descarga atmosférica generada, se introduce la herramientas diagrama de Voronoi. Este algoritmo utiliza los centroides generados por el método K-means, y permite seccionar el área bajo estudio. Esta gama de poligonos, se consideran regiones que deben ser objeto de estudio, considerando el nivel de actividad de descargas y el impacto anual que producen.

- **Visualizaciones:** Con esta secuencia finaliza la primer etapa de análisis, la cual queda almacenada para etapas de visualización

El desarrollo de este algoritmo tiene dos consideraciones importantes. La primer es que permite evaluar el nivel de criticidad de un sistema de distribución ante descargas atmosféricas, mediante una clasificación del impacto de estos eventos en segmentos de control. La segunda es que brinda una plataforma para analizar cambios en los niveles de soporte de aislamiento y el sistema de sobretensiones. Lo anterior, resulta muy útil para la planificación y operación de redes, ya que se parte de una cantidad limitada de datos. En la siguiente sección se presenta la aplicación sobre el sistema de prueba, que constituye la primer implementación de esta idea.

6.2. Implementación del análisis de riesgo en el sistema de prueba

En esta etapa se describen los principales resultados del módulo, aplicado sobre el sistema de CNFL. Para tal efecto, se han compilado las principales gráficas en la figura 6.1.

Basado en el procesos iterativo descrito en la sección anterior, se determinó que se obtiene un nivel de convergencia luego de simular 100000 impactos sobre el área bajo estudios. Evidentemente, no todos los eventos generan sobretensiones (debido a la ubicación), no obstante, la generación de datos no tiene un efecto importante en términos de memoria computacional y tiempos de simulación,ya que una función de filtrado básicamente ignora los eventos que no son relevantes. El resultado final de este proceso corresponde a la figura (a). La gráfica B.1 del Anexo C, describe la generación de casos.

De manera complementaria a la ubicación de las descargas atmosféricas, se ha generado un histograma de las intensidades generadas, la misma corresponde a la función GMM de orden 3 planteada en el capítulo 4. La figura (b) muestra dicho comportamiento, el cual era esperado (no obstante, se verifica). Propiamente, en el contexto de simulación la figura (c) muestra la salida de sobretensiones generadas en un rango de 100 a 1500 kV, las cuales muestran un comportamiento similar a las gráfica de referencia obtenida en el capítulo 4. También se realiza una prueba de ajuste usando KST y se comprueba que la GMM de orden 3, cumple los requerimientos del método.

Una vez ejecutada la etapa de estimación de sobretensiones, se muestra la gráfica general de asignación de probabilidades de falla en función del nivel de sobretensión, ver figura (c). En este contexto, de los 100000 impactos, se determinó que únicamente 15245 eventos generan una sobretensiones (valores superiores a 1,05 de V_n). El procedimiento se ejecuta asignando de manera aleatoria y con una función uniforme, la probabilidad de falla a cada evento. Posteriormente, tomando como referencia la función lineal estimada en el capítulo 5, se define si el evento efectivamente causa salida o no. Para tal efecto, se define que: si la probabilidad es inferior a la función lineal, se asigna como falla, de lo contrario se mantiene la continuidad, ver figura (d). Los resultados indican que, de los eventos que generan sobretensiones, 16 darían como resultado una falla al sistema. Ese comportamiento, de hecho es compatible con los datos históricos analizados.

La etapa final en este proceso corresponde a la asignación de la tasas de restitución de los Segmentos de control bajo falla y la estimación de la disponibilidad e indisponibilidad. Tal como se aprecia en la figura (e) conforme se aumenta el número de eventos, la probabilidad de operación continua (tomada como referencia), tiende a estabilizarse en el valor promedio de referencia. En este caso, desciende desde 1 (no hay falla), hasta una probabilidad de 5 nueves (similar al caso base). A partir de este punto, el sistema se considera que emula las condiciones de vulnerabilidad del sistema. Para el caso de 10000 eventos, se genera una distribución del error, tomando como base la probabilidad de operación continua y se estima que el promedio es 5 %, cumpliendo el criterio de convergencia.

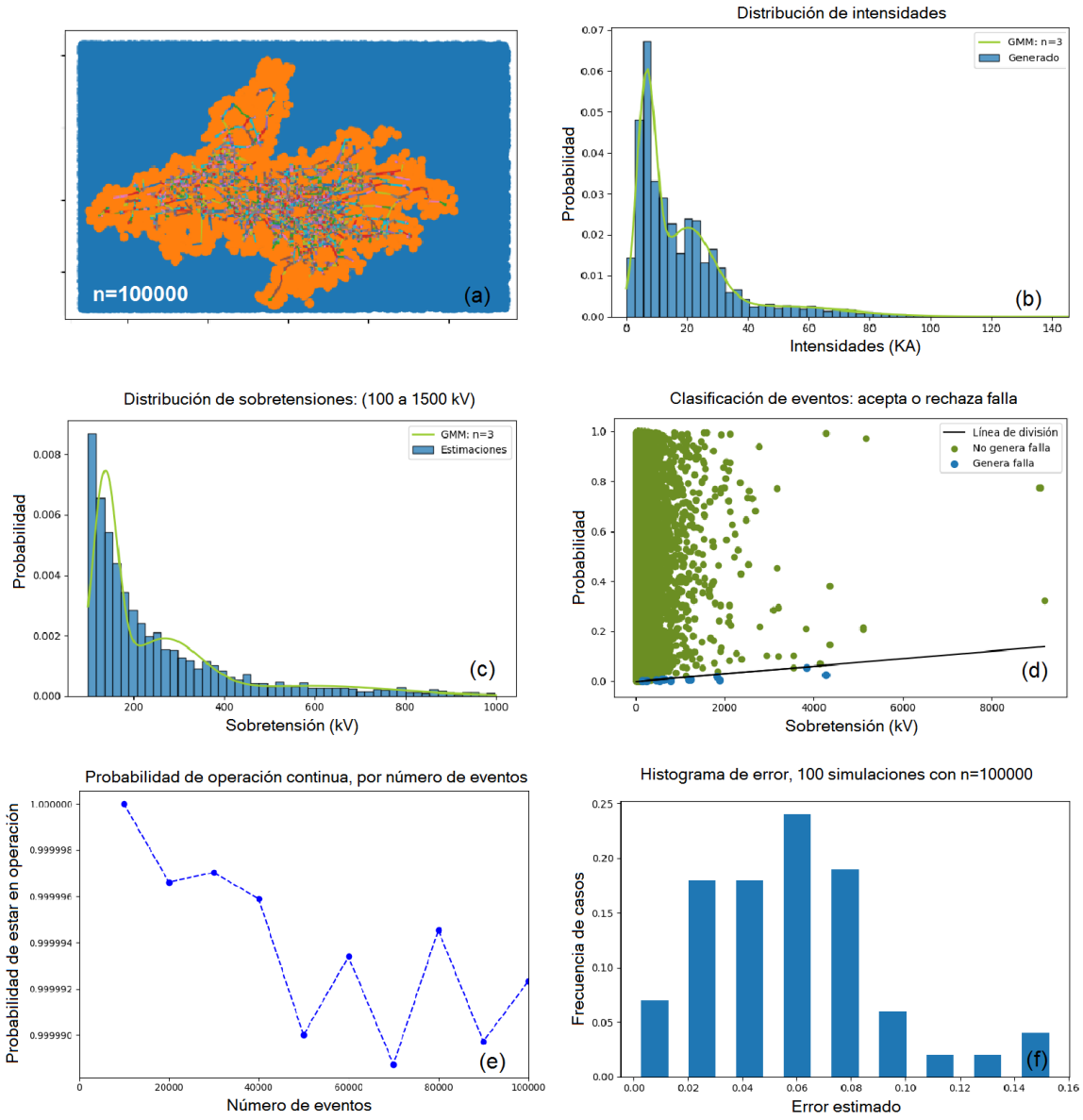


Figura 6.1: Salidas generadas mediante el proceso de Monte Carlo, para el sistema de CNFL
(a) Distribución espacial de 100 mil eventos, (b) Distribución de las intensidades generadas, (c) Distribución de las sobretensiones representivas, (d) Clasificación de eventos; fallas en función de la sobretensión, (e) Estimación de la probabilidad de mantener la continuidad, en función del número de eventos, máximo = 10 mil, (f) Distribución del error para 100 experimentos con n= 100 mil (Elaboración propia)

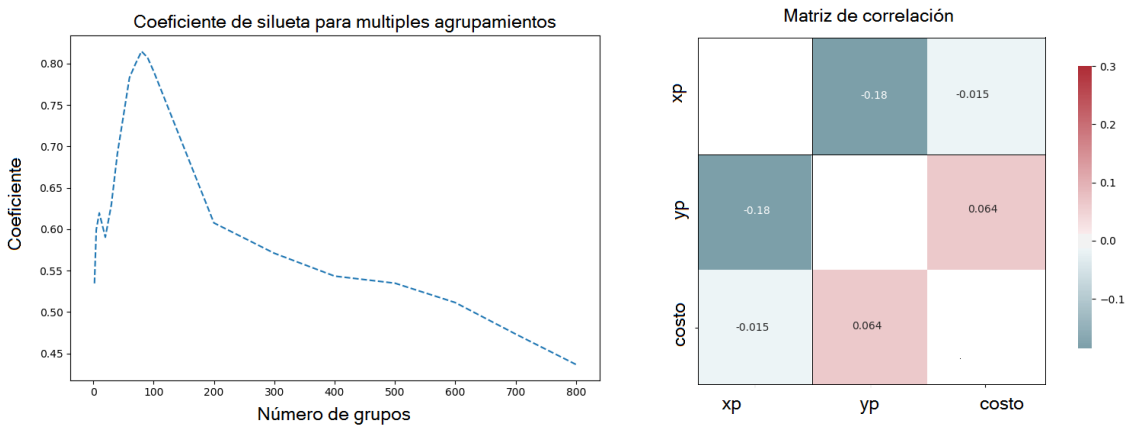


Figura 6.2: Análisis del coeficiente de silueta y correlación de variables
(Elaboración propia)

El proceso anterior corresponde a la calibración del sistema, el cual generó un conjunto de parámetros similares a los datos de entrada, bajo los cuales se establecieron las funciones de probabilidad y se alcanzaron resultados similares, con un margen de error del 5 %. En este contexto, el siguiente paso corresponde a la expansión de la cantidad de eventos para realizar un análisis espacial del efecto que tienen las descargas sobre el sistema bajo estudio. Este tipo de análisis recrea la actividad de muchos años de actividad atmosférica y permite estudiar estadísticamente las zonas de mayor impacto. para este caso se generó una simulación con 10 millones de eventos, los cuales generaron 1341 fallas sobre el sistema. Estos últimos son el nuevo objeto de estudio para el proceso de agrupamiento y clasificación.

De esta manera, se ha seleccionado un sistema de tres variables que relaciona la ubicación de las eventos atmosféricos con el nivel de consecuencias sobre el sistema eléctrico. Al igual que en el proceso de calibración, este efecto corresponde a los costos de reparación y energía no suministrada en los segmentos de control bajo estudio. Ante estas consideraciones, se procedió con un paso básico que consiste en analizar la correlación de las variables. En este punto, el indicativo correcto es una baja correlación, lo cual indica que las variables son representativas para el agrupamiento o que son relevante dentro de su contexto (en caso de tener alta correlación entre variables, típicamente solo se utiliza alguna de ellas). Adicionalmente, se recomienda generar la gráfica de coeficientes de silueta aumentando de manera progresiva el número de grupos, con el fin de identificar los rangos útiles. Esta valoración es puramente matemática y debe ser contrastada o armonizada con su utilidad práctica. Los resultados de este etapa se muestran en la figura 6.2. En la misma se confirma un nivel de correlación bajo, con un máximo de 0,18 y la curva de silueta, que contiene un valor óptimo de 100 grupos con un coeficiente de 0,8. La respuesta de esta gráfica es muy buena, considerando la forma típica o teórica del método y los valores que contiene. Para fines prácticos (criterio experto), se considera que iniciar con un análisis de 10 grupos brindaría posibilidades de establecer estrategias de control y planificación.

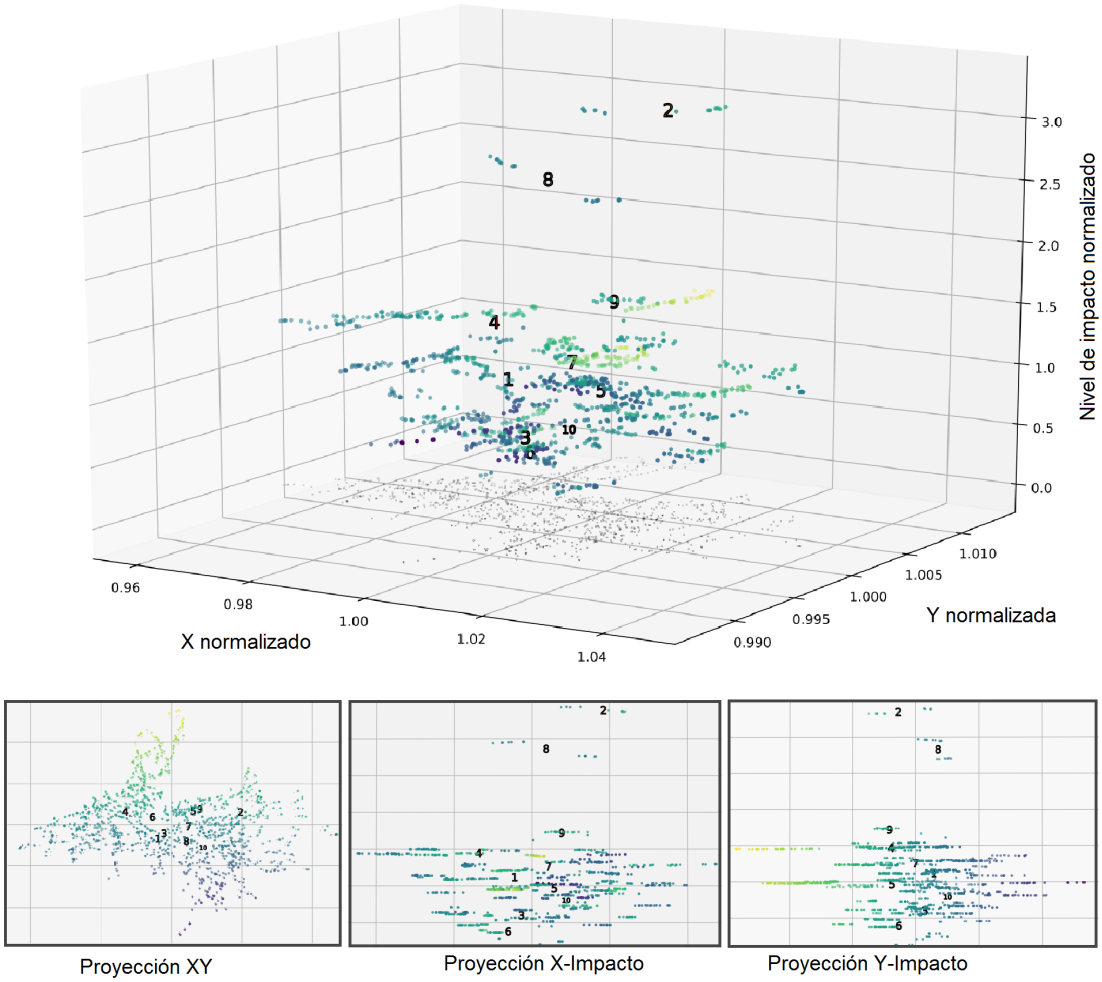


Figura 6.3: Resultado del agrupamiento con K-means: Visualización 3D y proyecciones 2D *(Elaboración propia)*

Considerando las premisas descritas anteriormente, se procede con el análisis espacial del efecto de las descargas sobre el red eléctrica de prueba. El mismo corresponde a una etapa clave en estudios de confiabilidad que permite conocer el nivel de criticidad que se tiene en el sistema, permitiendo orientar esfuerzos a los puntos críticos y optimizar los procesos de suministro de energía.

La figura 6.3 muestra el resultado 3D del agrupamiento utilizando el método K-means y las proyecciones 2D para las diferentes combinaciones de ejes. En este caso se presentan las variables normalizadas, considerando diez centroides como valor de entrada. Este tipo análisis gráfico realmente permite comprender el agrupamiento (especialmente, en un ordenador) y su distribución. Los pasos subsecuentes estarán enfocados en la proyección XY, la cual responde directamente a la ubicación geográfica del sistema eléctrico y las descargas atmosféricas. La figura 6.4, presenta el análisis detallado de esté agrupamiento para dicha proyección, incluyendo un detalle gráfico de los coeficientes de silueta por grupo. En la figura B.2 del anexo C, se pueden muestran agrupamientos adicionales.

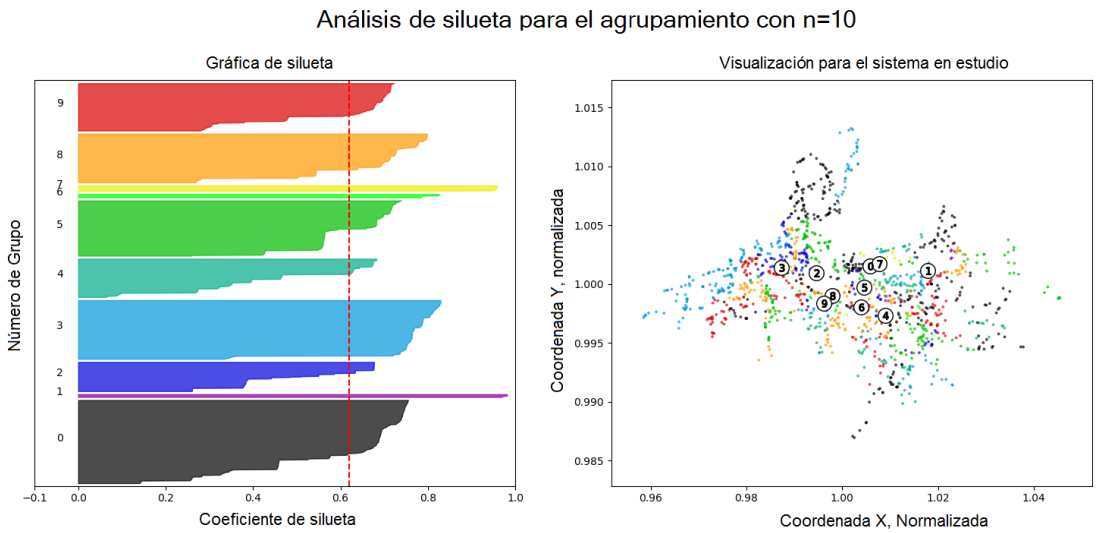


Figura 6.4: Resultado del agrupamiento con K-means y silueta
(Elaboración propia)

La importancia de trabajar sobre la proyección XY, radica en el hecho de que es completamente intuitiva para los administradores de sistemas eléctricos y es la que permite tomar decisiones. Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos en la figura 6.4 muestran utilidad al considerar que al menos seis (1,2,3,4,6 y 7) grupos muestran un grado importante de densidad, en tanto que el restante (0,5,8 y 9) una condición de mayor cobertura o están mas dispersos sobre el sistema. En este contexto, el agrupamiento permite dividir zonas de impacto geográfico con mucha claridad en la periferia del sistema y con mayor dificultad en la parte central. Lo anterior, es comprensible considerando la mezcla de alimentadores en esta última zona. Se ejecutaron experimentos adicionales aumentando el número de grupos, confirmando un mejora en el agrupamiento, no obstante, estaba en contraposición del establecimiento de zonas especificas con niveles de criticidad mas representativos.

Considerando este proceso, se definió que la aplicación de diagrama de Voronoi aplicado sobre la proyección XY representa un complemento muy adecuado para el proceso se agrupamiento, el cual permite dividir el espacio de muestreo tomando como entrada los centroides. En este contexto, los diagramas son trazados en dos dimensiones, utilizando los centroides proyectados sobre el plano bajo estudio. En otras aplicaciones como reconocimiento de imágenes, los diagramas de Voronoi en 3D tienen amplia utilidad. En la figura 6.1 se muestra el resultado de aplicar dichos esquema sobre el sistema bajo estudio. Evidentemente, el seccionamiento en planos permite un control mas ordenado de la superficie bajo la cual se plantea desarrollar estrategias de protección y clasificación.

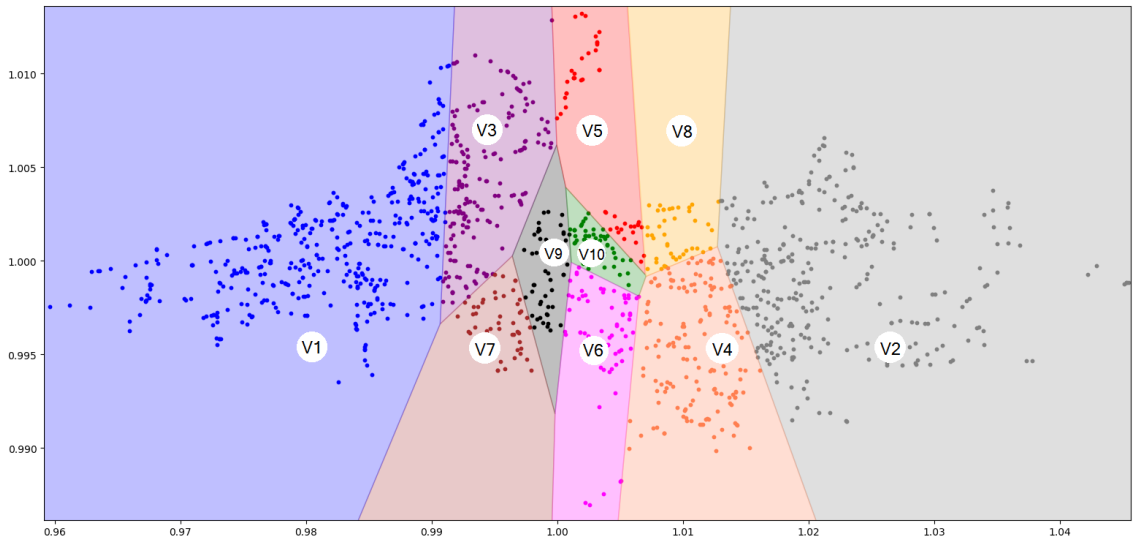


Figura 6.5: Resultado del agrupamiento utilizado diagramas de Voronoi 2D sobre el plano XY *(Elaboración propia)*

Tabla 6.1: Descripción del sistema de partición geográfico, usando digramas de Voronoi

Regiones (planos)	**Impacto (%)**	**Descripción geográfica (cantones)**
V1	31,57	Región oeste: Alajuela, Belén, Mora y Santa Ana, Escazú
V2	23,97	Región este: Cartago, La Unión, Goicoechea y Coronado
V3	12,47	Región norte-oeste: Belén, Flores y Santa Bárbara
V4	11,18	Región sur-este: Montes de Oca, Curridabat y Desamparados
V5	4,72	Región central-norte:Santo Domingo y Barva
V6	3,68	Región central-sur: San José, Alajuelita y Aserrí
V7	3,26	Región central-sur-oeste: San José y Escazú
V8	3,24	Región central-este: Moravía y San Isidro
V9	3,12	Región central-oeste: Heredia y San José
V10	2,79	Región central-este: Tibás, Goicochea y Moravía

En la tabla 6.1 se brinda la cuantificación del sistema en cuando al nivel de riesgo, considerando el peso ponderado que cada región tiene dentro del diagrama sobre el impacto total del sistema. Con este indicador se determinó que la zona norte-oeste (conformada por las regiones V1 y V3) concentran el 44 % del impacto total sobre el sistema, en tanto que la región sur-este absorbe cerca del 36 % del impacto. Finalmente, un 20 % se distribuye ente las zonas centrales y sus extensiones hacia el norte y el sur. Basado en el análisis previo vinculado a la actividad atmosférica y los patrones de confiabilidad, se considera que los resultados reflejan un comportamiento adecuado, ya que existe mayor probabilidad de afectación en la zona norte-oeste y el nivel de impacto aumenta en las periferias del sistema, debido al peso que que tienen los costos de reparación sobre el indicador de impacto. Lo anterior, se debe a que el sistema bajo estudio opera de manera centralizada.

6.3. Síntesis del módulo de análisis de riesgo

Se desarrolló un algoritmo que permite estudiar el nivel de impacto que tienen las descargas atmosféricas y las sobretensiones generadas sobre los sistemas de distribución. En este contexto, se desarrolló un experimento de Monte Carlo y una etapa de agrupamiento basada en K-means y diagramas de Voronoi. El proceso de simulación cumplió los requerimientos de convergencias y se exploró sobre un conjunto amplio de eventos para clasificar el nivel de impacto sobre el sistema de prueba. La tabla 6.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el proceso.

Tabla 6.2: Resumen: Análisis de riesgo del sobre el sistema de prueba (CNFL)

Variable	**Modelo**	**Descripción**
Riesgo	Monte Carlo	Mediante un proceso iterativo se determinó que el sistema alcanza un nivel de estabilidad (error promedio menor o igual a 5 %) luego de 100 mil eventos. Ante estas condiciones se emula de manera adecuada el comportamiento de referencia.
Agrupamiento	K-means y Silueta	La utilización de los algoritmos propuestos fue exitosa. Las variables seleccionadas presentaron una correlación máxima de 0.18 y coeficiente de silueta altos entre 0.54 y 0.82, con una forma compatible con la teoría. Se generaron visualizaciones 3D y 2D para su comprensión
Clasificación	Diagramas de Voronoi	Basado en un enfoque práctico, se utilizo un agrupamiento base de 10 grupos sobre la proyección XY (geográfica). Se determinaron los pesos sobre el nivel de impacto en sistema de prueba.
Resultados	Sistema CNFL	La clasificación muestra que las zonas periféricas concentran un 80 % del peso sobre los niveles de impacto. El mismo está altamente vinculado a los costos de reparación.

Capítulo 7

Estrategias para el mejoramiento de la confiabilidad operativa y discusión

En este punto hemos avanzado en la construcción de algoritmos para estimar: sobretensiones en sistemas de distribución originadas por descargas atmosféricas, tasas de falla que estos eventos originan, tiempos de restitución del servicio y el impacto desde una perspectiva financiera. En el proceso se han generado los elementos teóricos que sustentan la metodología y se ha desarrollado una implementación sobre un sistema de prueba, en el cual se han definido una clasificación topológica con niveles de riesgo.

En términos de confiabilidad operativa este proceso constituye la etapa inicial para mejorar la gestión de los sistemas de distribución. En este proceso prevalece la construcción de los mecanismos para interactuar y modificar su funcionamiento utilizando como base un entorno de simulación y constituye una base para generar trabajos futuros de manera incremental.

En general, las acciones de mejoramiento se enfocan al diseño de planes de mantenimiento preventivo y estrategias para la atención de fallas, el estudio detallado de los modos de fallas, el análisis del ciclo de vida de los sistemas, la optimización de costos-beneficio y la implementación de estructura organizacional que permita avanzar de manera progresiva en el desarrollo de las técnicas, basados en la mejora continua.

En este trabajo se expone un análisis de costos-beneficio sobre el sistema de prueba, con el fin de ejemplificar el potencial de estos conceptos y avanzar en esta dirección. Se plantea evaluar las condiciones de inversión en sistemas de protección, aislamiento y las estrategias de mantenimiento, para identificar un punto de referencia y desplazar el sistema a un punto de mayor rentabilidad.

En general, el proceso de mejoramiento de la confiabilidad operativa en sistemas de ingeniería corresponden a un conjunto de acciones que se generan de manera progresiva y pueden durar periodos de cuatro a siete años para alcanzar su madurez. Entre tanto, los grupos de trabajo encargados de estas labores deben identificar y generar acciones de corto plazo que permitan ir corrigiendo problemas y generando confianza, principalmente a los gerentes o administradores de las empresas, quienes a su vez definen los planes estratégicos y disponen de los recursos financieros.

Bajo esta premisa, se ha planteado una estructura de análisis para ejecutar acciones inmediatas para mejorar las confiabilidad operativa en los sistemas de distribución frente a las descargas atmosféricas. El proceso se basa en la curva característica de costo-beneficios representada en la ecuación 7.1, la cual contrasta los efectos de las fallas en relación al nivel de inversión que se esta ejecutando. En este contexto y basados en los alcances del trabajo, este marco de referencia se utilizará para evaluar la normalización del nivel de soporte de aislamiento y los sistemas de protección.

$$Costo\ Total = \sum [Costos \quad de \quad inversión] + [Costos \quad de \quad fallas] \tag{7.1}$$

Esta ecuación tiende a optimizar el funcionamiento de los sistemas al sumar costos o gastos que se requieren para mejorar las condiciones de operación del sistema y los beneficios esperados. En esta suma existe un mínimo global que corresponde a un punto de inflexión, en donde se alcanza el nivel de inversión que maximiza el beneficio. A la derecha e izquierda de este punto la relación costo beneficio es desfavorable. Para su desarrollo se pueden utilizar simulaciones especificas y modelos de optimización formales. Estos últimos son especialmente útiles cuando se analiza la confiabilidad de los sistemas de manera integral con múltiples modos de falla. No obstante, para cada modo de falla es fundamental contar con herramientas que permitan entender la dinámica de las mismas.

En esta aplicación se integra la herramienta de análisis desarrollada, para apoyar la toma de deciciones en relación a modificaciones sobre el esquema de protección o para acompañar otro tipo de estrategias (operativas o de mantenimiento). Este tipo de análisis podrá ser ampliado de manera progresiva y permitirá la sistematización completa para la gestión de fallas. En esta ocasión se utiliza un enfoque financiero vinculado a operación y mantenimiento. Por tanto, se contrastarán los costo y beneficios de modificar o normalizar el equipos de aislamiento y protección considerando los presupuestos anuales destinados a esta labor como referencia. Es posible, realizar el mismo análisis para proyectos de inversión considerando diseños específicos.

Para la implementación se ha definido un procedimiento basado en tres pasos, las cuales se describen a continuación, junto a las consideraciones tomadas para los cálculos. Posteriormente, se realizará la implementación sobre el sistema de prueba

- **Identificación de alternativas para el sistema de protección contra sobretensiones:**

  Se utiliza como punto de partida los niveles de aislamiento que prevalecen en el sistema, basado en las especificaciones técnicas y los estándares constructivos. Se considera que estos permanecen invariables y no existen modificaciones substanciales. Se identifican los gastos anuales en términos de aislamiento, los cuales corresponden a las últimas adquisiciones de estos materiales.

  De igual manera, se consideran las especificaciones y estándares que se utilizan para decargadores de sobretensión y los costos de las últimas compras de estos dispositivos. En este caso, la variable primordial es el nivel de protección residual, el cual se considera constante. No se optimizará la ubicación de los descargadores y se mantendrá invariable el número de equipos que se instalan regularmente. Se asumen costos adicionales del montaje completo, el cual contempla electrodos de puesta a tierra, herrajes, terminales y conductores de cobre. No se incluyen otros dispositivos como protectores electroestáticos de vida silvestre, ya que corresponden a otro modo falla y responde a objetivos diferentes.

  En esta etapa se analizan las posibilidades que tiene el sistema para ser modificado. Estas deben adaptarse a los requerimientos actuales y sin modificación adicional de los estándares de construcción (el cual se puede analizar en etapas posteriores, en coordinación con diseñadores e instaladores). Esta etapa debe incluir la comparación de costos y niveles de protección.

- **Alternativas para la atención de fallas producidas por descargas atmosféricas:**

  Se toma como punto de partida el riesgo que presentan las diferentes zonas de control. Mientras el paso anterior se enfoca en la tasa de fallas vinculado al esquema de protección, estas alternativas tienen como objetivo disminuir los tiempo de restitución mediante estrategias de mantenimiento.

  Estas acciones en general corresponden a una mejora en la lógica operativa. En general, se enfocan en la implementación de una estrategia descentralizada con los mismos grupos de trabajo. Alternativas adicionales pueden ser incorporada, como la modificación de la cantidad de grupos de atención de fallas de manera estacional. Finalmente, las estrategias deben adaptarse a la condición actual de la empresa y no deben requerir una inversión adicional, ya que el objetivo es promover acciones inmediatas, valorar los primeros resultados y hacer que la metodología gane aceptación.

  No incluye la instalación de equipos adicionales como detectores de falla, ya que esto responde al contexto general de los modos de falla. En este caso, se trata de genera las primeras acciones en un modo de falla específico, lo cual funciona como guía para futuras implementaciones.

- **Evaluación de estrategias y análisis de costos-beneficio:**

  En esta etapa se establecen la relación de los costos y beneficios (financieros, en este caso) que brindan algunas acciones o estrategias, en comparación al escenario que prevalece en la actualidad. Basado en en ese punto de operación base, justamente se establece en que dirección podría moverse el sistema, ya sea aumentando o disminuyendo el nivel de protección de manera que tienda hacia un punto óptimo.

  Esta comparación se realiza de manera visual, mediante curva costo-beneficio. En un entorno de operación y mantenimiento, esta actividad se desarrolla bajo un enfoque de corto plazo con la información mas cercana que se tenga a disposición. En general, bajo este enfoque las diferencias no son sustanciales, porque en general corrigen únicamente desviaciones o malas prácticas de diseño. No obstante, se debe considerar que es una actividad continua y los beneficios se acumulan durante cada año. En el caso de los estudios de planificación, el efecto es más notorio ya que se toma en cuenta aspectos como las proyecciones en el consumo de energía y planes de inversión en periodos extensos (30-50 años).

7.1. Análisis costo-beneficio en el sistema de prueba

En los capítulos anteriores se estudiaron las condiciones del esquema de protección contra sobretensiones. En estos apartados se determinó que existía heterogeneidad en los niveles de aislamiento y que el sistema presentaba una condición de sobre aislamiento, principalmente en aisladores tipo punta poste de porcelana. En relación a los descargadores de sobretensión, se determinó que la empresa utiliza la categoría mas robusta de protección, aunque su utilización es para aplicaciones muy específicas. Por tanto, se considera que las acciones girarán entorno a que tan factible es disminuir los margenes de protección. A continuación, se describirán los resultados obtenidos al aplicar los tres pasos mencionados en la sección anterior.

Alternativas del esquema de protección

Tomando como referencia los dispositivos de protección utilizado por CNFL, se han construido dos imágenes de referencia que permiten mapear el estado actual del sistema y las alternativas que se ajustan de manera inmediata a los requerimientos actuales.

La figura 7.1 mapea las posibilidades de aislamiento, considerando el costo y nivel de impulso crítico para diferentes tipos de aisladores. No se incluyen los aisladores de suspensión sintéticos porque no presentan una condición se sobreaislamiento.

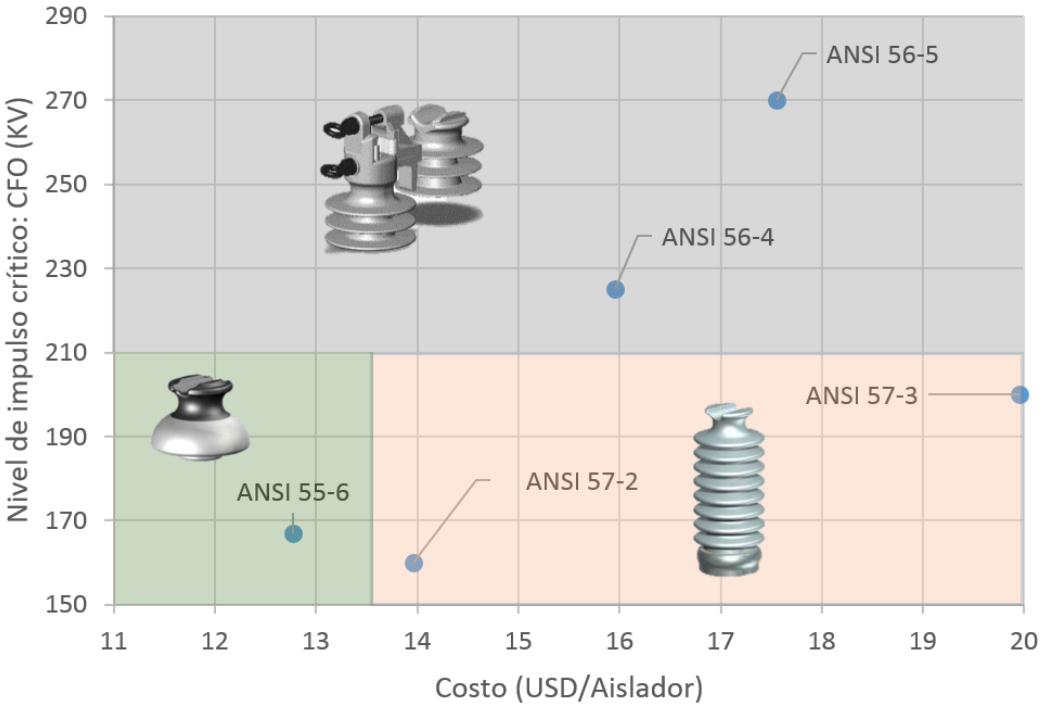


Figura 7.1: Relación de costos y nivel de impulso crítico para aislamiento sólido
(Elaboración propia)

El aislamiento actual para instalaciones tipo poste corresponde al ANSI 57-3 de porcelana, el cual esta diseñado para una capacidad de tensión nominal de 45 kV y presenta valores típicos de CFO aproximados a los 200 kV. Dentro de la misma categoría se encuentra el aislador ANSI 52-7, que es diseñado para instalaciones de 35 kV y reduce el CFO a 160 kV. Este tipo de material se caracteriza por un alto desempeño mecánico al ser completamente sólido y su alta densidad limita el rompimiento de la capacidad disruptiva por perforaciones en la porcelana. Las otras opciones que pueden ser tomadas en cuenta corresponde a los aisladores tipo "Pin", que son ampliamente utilizados, cumplen los requerimientos mecánicos (aunque son mas vulnerables al no ser completamente rellenos) y se encuentran versiones de porcelana y material compuesto.

Por otro lado, la figura 7.2 muestra las opciones para descargadores de sobretensión, las cuales corresponden a dispositivos tipo de distribución de oxido de zic (ZnO) y únicamente pueden variar por clase. Las opciones de carburo de silicio (SiC) se encuentran descontinuadas y han sido desplazadas por este tipo de tecnología. Adicionalmente, otras categorías como como descargadores de subestación o intermedios resultarían imprácticas para las aplicaciones actuales. Para cualquier tipo de dispositivo, los elementos complementarios se mantiene sin variación.

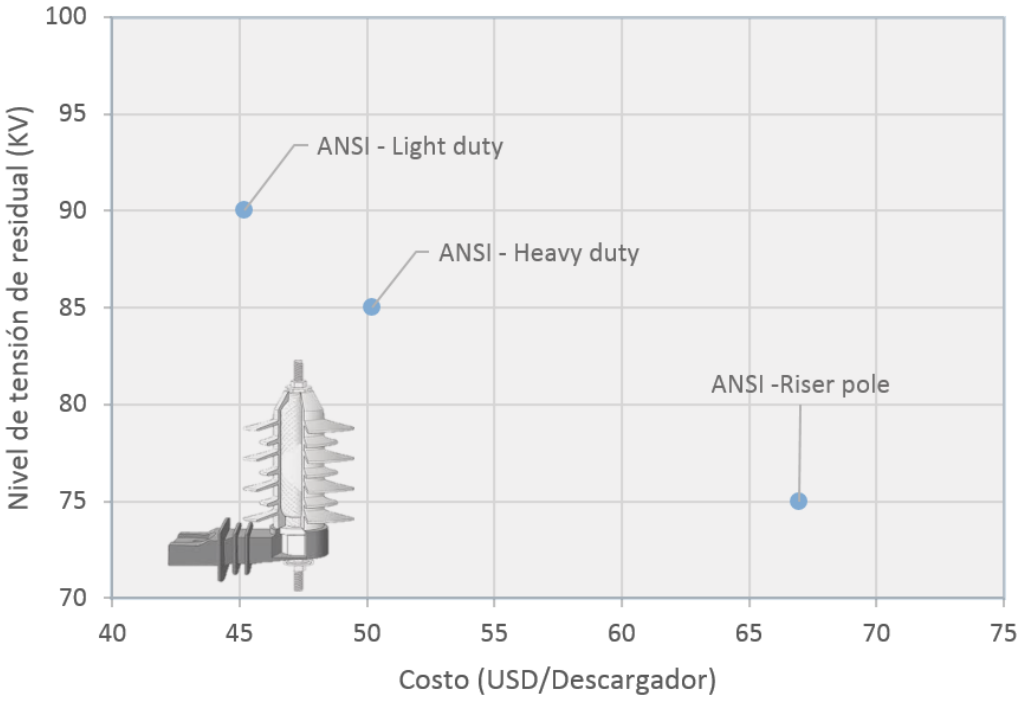


Figura 7.2: Relación de costos y tensión residual para descargadores de distribución
(Elaboración propia)

Actualmente, la CNFL utiliza una metodología para la selección de descargadores que favorece la inclusión de los tipo Riser pole", los cuales tienen el mayor margen de protección en la categoría de distribución. Adicionalmente, se pueden evaluar las clases "heavy dutyz "Light duty". Como los valores están estandarizados, se considera que la categoría actual de 27 kV para el máximo valor de sobretensión en operación continua es adecuada. Este valor es para sobretensiones temporales y define las características del dispositivo de expulsión. por tanto, únicamente se explora sobre el nivel de tensión residual para cada categoría (referenciado a una señal 8X20 μs de 10 kA).

Alternativas para la atención de fallas

Con el análisis previo se determinó que el nivel de confiabilidad del sistema ante descargas atmosféricas es realmente bueno, con un valor de disponibilidad anual de 0.99999 (5 nueves). Esto se debe al nivel de sobre asilamiento y la cantidad de descargadores de sobretensiones que anualmente se instalan. No obstante, se determinó que el principal factor que aumenta el impacto de cada salida es el costo de atención de fallas. En este rubro el tiempo de respuesta y los gastos por desplazamientos son el factor de mayor predominancia. Lo anterior, responde a que el esquema utilizado por la empresa para coordinar los equipos de trabajo está centralizado.

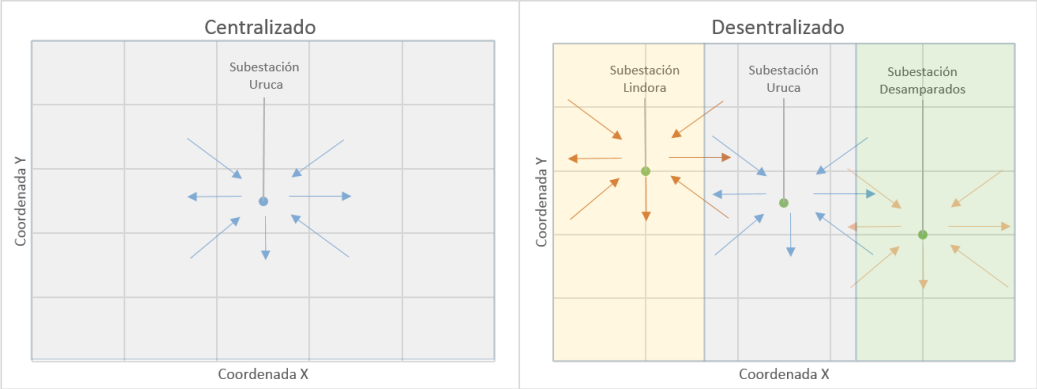


Figura 7.3: Propuesta para la descentralización de los equipos de atención de fallas
(Elaboración propia)

La alternativa que se plantea bajo este contexto, corresponde al fraccionamiento sectorial de los grupos de trabajo. Basados en la información suministrada por la CNFL, en general operan con 10 grupos de trabajo para los bloques de mayor consumo de energía (06:00 a las 14:00 y de las 14:00 a las 23:00) y 2 equipos de trabajo para el horario nocturno (23:00 a las 06:00). Con esta información plantea la posibilidad de utilizar instalaciones existente de la empresa para distribuir dichos grupos. En la figura 7.3 se presenta de manera gráfica la propuesta, la cual incluye las subestaciones Lindora (ubicada en la zona oeste) y Desamparados (zona sur-este), con lo cual los equipos de trabajo podrían seccionarse equitativamente: 3 equipos para el este, 3 para el oeste y 4 en la zona central. Respecto a las zonas de riesgo determinadas en la sección anterior, se considera que los equipos de la oeste atenderían principalmente V1 y V3, mientras los equipos de sur-este, se enfocarían en V1 y V4, las cuales absorben un 80 % de las fallas.

Este tipo de decisiones requieren consideraciones adicionales. Por ejemplo, se deben general las condiciones habilitadoras en cuanto a la logística de materiales y aspectos administrativos. No obstante, responde a las tendencias de la mayoría de sistemas. En términos de costos y con el fin de evaluar la propuesta, se considera que el componente de traslados y atención restablecimientos mejorara de manera proporcional, con una reducción de la tercera parte. La componente costos vinculada a materiales se mantendrá constante, ya que responde a sustitución de equipos dañados.

En general, se visualiza una brecha en el modelo para gestionar el sistema de distribución, el cual si está siendo acompañando de una evolución tecnológica orientada a la formalización sistema de gestión de distribución avanzado (ADMS). Bajo este contexto, se deben generar complementos que alimenten el sistema y permitan el máximo aprovechamiento de dichos recursos. Un análisis podrá ser tomado como referencia para analizar el resto de modos de falla, especialmente para aquellos que pueden ser analizados utilizando modelos o datos complementarios.

Estimación del costo-beneficio

una vez determinadas las consideraciones se procede con la estimación de la relación costos-

beneficio para las acciones que se desean plantear.

En términos de soporte de aislamiento, se considera que los más factible es estandarizar el uso al tipo ANSI 57-2. Lo anterior, debido a que actualmente el menor nivel de protección del sistema se encuentra cercano a ese rango. Aunque el estándar indica 160 kV de CFO los fabricantes ofrecen valores típicos de 180 kV. Por tanto, la acción corrige un problema de normalización. Por otra parte, es el tipo de aislamiento es el que realmente le corresponde a este tipo red y ofrece las mejores condiciones mecánicas, de vida útil, no requiere adiestramiento adicional para el personal técnico y es el que mejor se adapta a las condiciones actuales del sistema. Adicionalmente, presenta una relación de costos y CFO muy favorable en comparación a las otras alternativas.

Por otra parte, para los descargadores de sobretensión se determinó que el margen de protección puede ser adaptado a la clase "light-duty". En general, el desempeño de estos dispositivos es altamente eficiente y mantienen la tensión de restitución estable (es usual, asumir un desempeño óptimo). Adicionalmente, el criterio de mayor peso corresponde a que los niveles de intensidad de corrientes registrados son relativamente moderados (media de 15 kA), lo cual sugiere que este dispositivo es el adecuado. Como criterio adicional, para la elección corresponde a la poca actividad de impactos directos y a la gran cantidad de dispositivos instalados en la red.

Finalmente, aunque no se considera una diferencia en las tasas de falla debido a que las simulaciones base asumen los niveles mas bajos de aislamiento del sistema y desempeño óptimo de los descargadores, existe una pequeña disminución en los costos de atención de fallas. Aunque es mínimo (debido a la alta confiabilidad) es un criterio que debe ser considerado para futuros análisis sobre otros modos de falla.

En la tabla 7.1 se muestra el detalle de costos para el caso base y las acciones propuestas. En este caso, se representan las de mayor peso, que corresponde a los gastos de equipos. En la figura 7.4 se muestra el análisis gráfico de la solución

Tabla 7.1: Análisis de costos para las acciones propuestas de mejoramiento de la confiabilidad

Escenario	**Descripción**	**Costos (MCRC)**
Caso base	Se consideran las condiciones usuales del sistema	99.92
Aislamiento	Se considera normalización del aislamiento tipo poste a la clase ANSI 57-2	92.99
Descargadores	Se considera el efecto adicional de disminuir el margen de protección usando la clase "ligth duty"	72.05

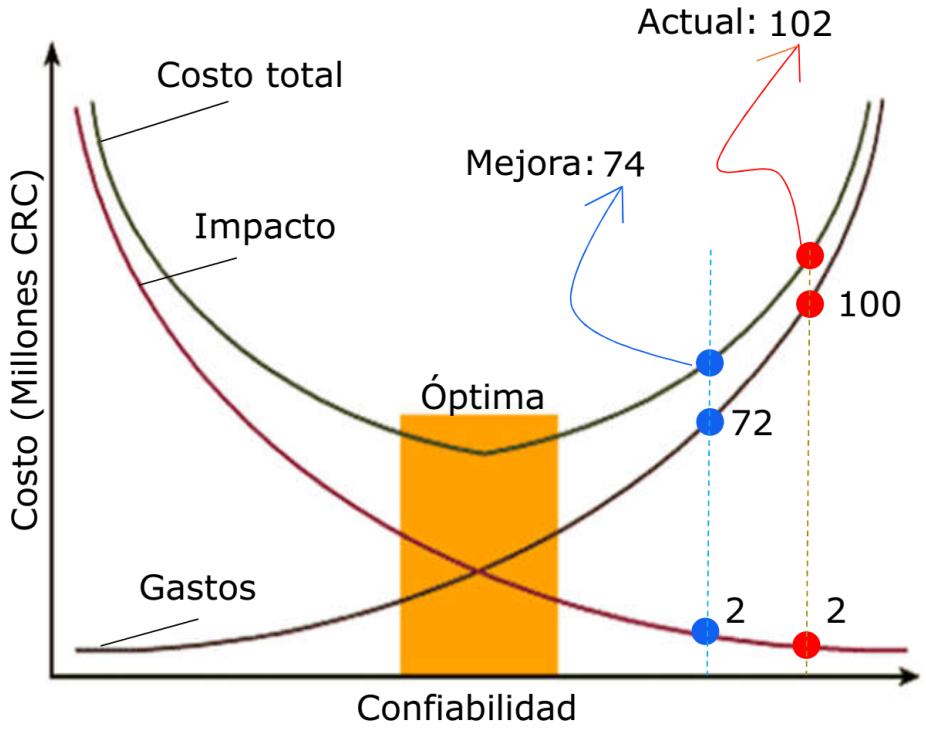


Figura 7.4: Análisis costo-beneficio para las acciones de mejora sobre el sistema de CNFL
(Elaboración propia)

La figura de costos y beneficios muestra el punto de operación actual y el esperado con la implementación de acciones de mejora. En esta distingue un ahorro de 28 millones de colones anuales. Esta suma no debe considerarse despreciable, ya que al ser un gasto operativo se replica cada año (de manera aproximada en 5 años representará 140 millones de colones) y únicamente, requiere una adaptación de los estándares de construcción y especificación de materiales para la adquisición de equipos. Acciones y análisis futuros aproximarán cada vez mas el sistema a un punto de operación óptimo.

7.2. Discusión general del trabajo

Este trabajo constituye un avance en relación al análisis de desempeño de los sistemas de distribución frente a descargas atmosféricas. Surge de la combinación de dos áreas de conocimiento en la cual se adapta un estimador sobretensiones con un modelo de confiabilidad, en un entorno de simulación basado en la técnica de Monte Carlo para hacer una valoración de riesgo espacial. Adicionalmente, podrá ser adaptada a diferentes modos de falla y guiará la toma de decisiones en proceso de planificación, diseño, operación y mantenimiento. La metodología cuenta con elementos teóricos que la respaldan y evidencia cuantitativa obtenida de una primer implementación.

En relación el estimador de sobretensiones, se ha utilizado principalmente el modelo de Rusk y el concepto de impedancia característica como primer alternativa. Su fácil implementación, aceptación por la comunidad científica y versatilidad para aplicarla a sistemas complejos, hacen que esta decisión sea prácticamente natural. No obstante, se reconoce que estos modelos tienen dificultades para desarrollar un análisis completo en el dominio del tiempo, en el cual interesa conocer el proceso de reflexión y refracción de ondas viajeras y la interacción con dispositivos de protección, principalmente en derivaciones monofásicas o transiciones aéreo-subterráneas, entre otros. Adicionalmente, la capacidad del sistema para adaptarse a las diferentes condiciones geográficas, niveles de apantallamiento y contaminación, son limitados. Finalmente, complementar las estimaciones con datos de campo recopilados con medidores de sobretensión brindaría mayor robustez a los cálculos. La implementación de este tipo de análisis sobre sistemas reales sigue siendo un reto para la comunidad.

De igual manera, la utilización de cadenas de Markov de cuatro y dos estados para estimar la confibilidad se considera un paso inicial. Se considera que es un modelo viable, sin embargo, debe ser mejorado para adaptarse de con mayor flexibilidad a condiciones estaciones y a las particularidades de cada circuito o segmento de control, incluyendo valores detallado de consumo de energía con alta resolución temporal. Es fundamental, para su buen funcionamiento poder alimentarlo con una cantidad de datos razonable (10 años). Este proceso debe ser mejorado e incluir tasa de fallas de los dispositivos de protección y un análisis detallado de la vida útil del aislamiento. También, podría incluir variables climáticas adicionales como vientos o niveles de precipitación y avanzar hacia el concepto de resiliencia. Este módulo deberá desarrollarse para que pueda guiar de manera oportuna los planes de mantenimiento. Adicionalmente, se considera necesario avanzar en un modulo adicional para la captura sistemática de datos.

Respecto al módulo de riesgo, se determinó que el método de Monte Carlo es una buena opción. Se adapta con facilidad a los requerimiento del sistema y es una técnica vigente. No obstante, por las características propias de la técnica es limitada para estudiar condiciones en tiempo real. En un entorno de simulación más completo este módulo deberá ser ampliado con algoritmos adicionales para contemplar todos los niveles de granularidad temporal. Adicionalmente, el análisis de las acciones deben ser estimadas dentro de esta etapa, por tanto es fundamental avanzar en la formalización de un métodos de optimización para cubrir con mayor detalle múltiples futuros y sus incertidumbres.

Finalmente, se considera que el estudio del caso de prueba brindó resultados muy provechosos para la metodología. Se evaluaron condiciones y requerimientos para la adquisición y procesamiento de datos, se obtuvieron valores de referencia y se estableció una estructura que podrá ser adaptada a otros sistemas. En particular, el sistema de CNFL cuenta con información y los requerimientos bases para desarrollar este tipo de estudios. Se considera importante avanzar en la organización de datos para fallas para derivaciones y baja tensión, las cuales tiene alto potencial para mejorar el desempeño.

7.3. Síntesis del capítulo

Este capítulo ilustró las primeras acciones que pueden ser desarrolladas para mejorar el desempeño de los sistemas frente a descargas atmosféricas. El mismo surge como complemento de la metodología desarrollada y de los resultados obtenidos. Se planteó de manera sencilla tres pasos que son aplicados sobre el sistema de prueba. Futuras intervenciones podrán seguir siendo exploradas para alcanzar un punto de operación óptimo.La tabla 7.2 muestra un resumen de los principales resultados obtenidos en este capítulo.

Tabla 7.2: Resumen: Mejoras de corto plazo sobre la confiabiliad operativa del sistema de CNFL

Variable	**Modelo- norma**	**Descripción**
Aislamiento	Normas ANSI	Se determinó que el aislamiento tipo poste corresponde a un ANSI 57-2, de 35 kV nominales y 167 kV de CFO. Se considera que está modificación no altera el funcionamiento del sistema en relación a la tasa de fallas.
Descargadores de sobretensión	Normas ANSI	Se determinó que los dispositivos mas adecuados para el sistema corresponden a la clase "light-duty, con una tensión residual aproximada a los 90 kV.
Gestión del mantenimiento	Descentralización	Se determinó que el esquema actual de atención de fallas podría ser mejorado mediante un proceso de desagregación de equipos en tres zonas geográficas: central, oeste y sur-este.
Beneficios	mínimo costo	Se estimó que la aplicación de las acciones reducirán los costos operativos en 28 millones de colones anuales. Lo cual solo se considera un paso inicial dentro del concepto general de la metodología
Discusión	Geaneral	Se plantean las condiciones actuales de cada uno de los módulos y se plantean los requerimientos o limitación que has quedado fuera de la metodología .

Capítulo 8

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

8.1. Conclusiones

Este trabajo presenta una metodología nueva para desarrollar la coordinación de aislamiento mediante la incorporación del concepto de confiabilidad operativa, la cual contempla una estructura conceptual y computacional en programas de código abierto. Adicionalmente, se generó la primera implementación industrial de las misma con la cual se establecieron los mecanismo para la adquisición de datos y experiencia para implementaciones futuras.

De este proceso de investigación se concluye lo siguiente:

- Se desarrolló un programa computacional para estimar sobretensiones de sistemas de distribución, empleando el método de Rusk, un método con redes de dos puertos e información georeferenciada de sistemas eléctricos. El sistema está enfocado a la estimación de sobretensiones máximas, es altamente eficiente en términos de capacidad computacional y es presenta resultados coherentes con los programas especializados, como ATP-EMTP y LIOV (discutido y aceptado por la literatura).
- Se generó un modelo de confiabilidad basado en cadenas de Markov de cuatro y dos estados para estimar la disponibilidad del sistemas total y ante descargas sobretensiones de origen atmosférico. El análisis condujo al establecimiento de función de probabilidad condicional que vincula el nivel de sobretensiones con la tasa de fallas real de los sistemas.
- Se desarrolló un algoritmo de análisis de riesgo basado en la técnica de Monte Carlo para establecer el impacto que generan las sobretensiones de origen atmosférico sobre segmentos de

alimentadores controlados por equipo automático. La combinación de un algoritmo adicional utilizando K-means y diagramas de Voronoi permitió clasificar dicho impacto de manera geográfica, adaptando la solución a requerimientos reales de gestión de fallas.

- Se generó una estructura teórica que soporta la herramienta computacional, la cual se planteó de manera modular para favorecer adaptabilidad a sistemas reales y su escalabilidad. Lo anterior, constituye una plataforma para expandir los análisis de confiabilidad e incorporar modos de falla adicionales.

Desde una perspectiva práctica en CNFL, se tiene los siguientes resultados:

- Se determinó que densidad de descargas atmosféricas es alta, cercana a los 10 flash/Km^2 anual y una intensidad de corriente de cada impacto es moderada, cercana a los 15 kA.
- El efecto de estos impactos es moderado, ya que el 80 % de las sobretensiones generadas sobre el sistema es inferior a los 50 kV.
- La confiabilidad operativa total sistémica es alta. Si se consideran todos los modos de falla se tiene un promedio de disponibiliadd de 0.999 (tres nueves) y ante sobretensiones por descargas atmosféricas de 0.99999 (cinco nueves)
- La tasa de fallas y tiempos de restablecimiento ante sobretensiones de origen atmosférico es de 3.14 y 28 min, respectivamente.
- El impacto anual de estos eventos es de 1.2 millones de colones y las zonas periféricas absorben el 80 % de este impacto.
- Se determinaron acciones de mejora aplicando una curva característica de costo-beneficio y se estimó un ahorro inmediato de 28 millones de colones anuales, considerando la normalización del aislamiento y los descargadores de sobretensión.

8.2. Recomendaciones

Basado en la conclusiones obtenidas, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Es recomendable utilizar este trabajo como punto de referencia para estudiar las interacciones de las sobretensiones de origen atmosférico y los sistemas de distribución. Los resultados siguieren una mayor exactitud que los métodos tradicionales basados en funciones de probabilidad teórica. Su utilización depende de un volumen de datos importante: al menos 5 años de actividad atmosférica que contemplen ubicaciones e intensidades, datos con buena resolución (orden de minutos) de salidas en los sistemas, redes eléctricas georreferenciadas, manuales de estándares constructivos y costos de mantenimiento e inversiones, entre otros.

- La aplicación de esta metodología en otros sistemas distribución sería fundamental para obtener mayor evidencia científica. Su evolución podría aportar a la normalización de técnicas de protección contra sobretensiones de origen atmosférico a nivel nacional. Para tal efecto, es recomendable establecer vínculos con entidades de normalización y laboratorios de alta tensión.

8.3. Trabajos futuros

Este trabajo provee una estructura que impulsa el desarrollo de proyectos futuros, como la sistematización de planes de mantenimiento planificados en redes eléctricas basados en confiabilidad, análisis de riesgo de sistemas de generación distribuida frente a descargas atmosféricas y evaluación del funcionamiento de redes en inteligentes en épocas de tormenta eléctricas, entre otros. Para tal efecto, se consideran que los trabajos futuros deben ir la siguiente dirección.

- En relación al módulo de sobretensiones es necesario avanzar en la estimación de sobretensiones en el dominio de tiempo. Se considera que es posible adaptar la metodología de Dommel y Agrawal, utilizando el programa ATP-EMTP como interfaz, mediante su módulo de modelos foráneos.

- Respecto al modulo de confiabilidad, el paso natural corresponde a la implementación de los análisis causas-raíz y análisis de de ciclo de vida útil de los sistemas de protección. Estas estrategias son un pilar en la implementación de esquemas de mantenimiento centrados en la confiabilidad o denomindas de producción total, las cuales corresponden a etapas posteriores. Bajo este mismo enfoque, el análisis de confiabilidad deberá incluir modos de falla complementarios, como fallas por vientos o vegetación

- Como alternativa para establecer un modelo de optimización completo del esquema de protección, se considera viable combinar el módulo de análisis de riesgo con la técnica de algoritmos genéticos. Esta ultima es ampliamente utilizada para la distribución de descargadores de sobretensiones, pero no ha sido empleado bajo un entorno de análisis de riesgo, ni a nivel sistémico.

- Se considera factible generar un algoritmo de detección de fallas en tiempo real utilizado una red neuronal. En este contexto, la aplicación actual constituye el mecanismo de entrenamiento y seguiría vigente para estudio de mediano y largo plazo. Este tipo de iniciativa puede ser complementada con la instalación de sensores de sobretensiones en la red, con el fin de alimentar mediante SCADA el sistema de adquisición de datos.

Bibliografía

[1] J. A. M. Velasco, *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión.* Madrid, España: McGraw-Hill, 1 ed., 2007.

[2] E. Williams, A. Guha, R. Boldi, H. Christian, and D. Buechler, "Global lightning activity and the hiatus in global warming," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[3] J. Montanyà, "Understanding lightning leaders," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[4] V. A. Rakov, "Lightning parameters for engineering applications: Recent updates and outlook," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[5] F. Rachidi and M. Rubinstein, "An overview of lightning research in switzerland," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[6] S. Visacro, "Recent contributions to the advance of lightning investigations and scientific challenges to be addressed in this field," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[7] M. Ishii, "Research on winter lightning," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[8] B. M. Hans D. Betz, "Lightning – current key issues and research," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[9] G. Diendorfer, "A review of 25 years of lightning research in austria from 1991-2015," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[10] C. A. Nucci, "Computation of lightning-induced voltages on overhead lines," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[11] A. Piantini, "Lightning-induced voltages on overhead power distribution lines," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[12] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montaña, and J. Herrera, "Contribution to lightning parameters study based on some american tropical regions observations," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[13] E. Perez, J. Herrera, E. Soto, C. Younes, and D. Aranguren, "Contributions on parameters that influence lightning induced voltages," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[14] F. de la Rosa, "Lightning and power system," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[15] C. L. Vásquez, W. Osal, and M. C. Blanco, "Lightning protection in overhead distribution lines," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[16] M. A. Cooper, "An (incomplete) history of lightning safety," *World Meeting on Lightning*, 2016.

[17] D. Goodstein, *The Mechanical Universe and beyond. Chapter 30: Capacitance and Potential*. USA: California Institute of Technology, 1980.

[18] P. Krider, *Benjamin Franklin and lightning rods - The Lightning Protection*, pp. 1–13. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008.

[19] C. Wagner, G. McCann, and J. Clayton, *Lightning Phenomena - Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, pp. 542–577. Westinghouse Electric Corporation.

[20] A. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, pp. 1–87, 195–240. Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2ed ed., 1999.

[21] A. Greenwood, *Electrical Transient in Power Systems*, pp. 233–574. Westinghouse Electric Corporation, 2ed ed., 1991.

[22] L. Van der Sluis, *Transients in Power Systems*, pp. 121–168. Boca Raton, USA: John Wiley & Sons, primera ed., 2001.

[23] V. Rakov and M. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, vol. 40, no. 4, pp. 403–426, 1998.

[24] Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D, "Parameters of lightning strokes: A review," *IEEE Transaction on PowerDelivery*, vol. 20, no. 50, pp. 346–358, 2005.

[25] V. Rakov and F. Rachidi, "Overview of recent progress in lightning research and lightning protection," *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, pp. 428–442, 2009.

[26] V. Cooray, *Mathematical modeling return stroke - Lightning Flash*, pp. 281–369. No. 50, London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2003.

[27] V. Cooray and F. Mahendra, *Lightning parameters of engineering interest - Lightning Protection*, pp. 15–96. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2010.

[28] J. Martínez, "El paquete de simulación atp. nuevas prestaciones," *Revista iberoamericana del ATP*, vol. 2, pp. 1–14, 2000.

[29] J. Martínez, "Catálogo de aplicaciones del atp," *Revista iberoamericana del ATP*, vol. 3, pp. 1–65, 2001.

[30] C. Nucci and F. Rachidi, *Interaction of Electromagnetic Fields Generated by Lightning With Overhead Electrical Networks - Lightning Flash*, pp. 425–478. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2003.

[31] C. Nucci and F. Rachidi, *Lightning Protection of Medium Voltage Lines - Lightning Protection*, pp. 635–680. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2010.

[32] E. Pérez, *Avances en el Modelamiento y Experimentación de Tensiones Inducidas en Redes de Distribución - Tesis Doctoral*. Bogota,Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2006.

[33] V. Rakov, *Rocket-triggered lightning and new insights into lightning - Lightning Protection*, pp. 97–164. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2010.

[34] Z. Flisowski and C. Mazzetti, *Risk analysis - Lightning Protection*, pp. 443–474. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, first ed., 2010.

[35] R. Billinton and R. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems*, pp. 206–409. New York, USA: Plenum Press, 2 ed., 1992.

[36] R. Billinton and R. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, pp. 220–326. New York, USA: Plenum Press, 2 ed., 1996.

[37] R. Billinton and W. Peng, "Teaching distribution system reliability evaluation using monte carlo simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, pp. 397–403, 1999.

[38] Y. Sun, P. Wang, L. Cheng, and H. Liu, "Operational reliability assessment of power systems considering condition-dependent failure rate," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, pp. 60–72, 2010.

[39] S. Thapa, R. Karki, and R. Billinton, "Utilization of the area risk concept for operational reliability evaluation of a wind-integrated power system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 4771–4779, 2013.

[40] J. W. Qin, Song, X. Han, and P. Wang, "Operational reliability assessment of power systems based on bus voltage," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, pp. 475–482, 2015.

[41] C. Liang, p. Wang, X. Han, W. Qin, R. Billinton, and W. Li, "Operational reliability and economics of power systems with considering frequency control processes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, pp. 2570–2580, 2017.

[42] X. Xu, J. Mitra, T. Wang, and L. Mu, "Evaluation of operational reliability of a microgrid using a short-term outage model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, pp. 2238–2247, 2014.

[43] C. Parra and A. Crespo, *Ingenieria de Mantenimiento y Fiabilidad en la Gestion de Activos*. Sevilla, España: Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Mantenimiento, 2012.

[44] G. Diendorfer, "Correlation of power line failures and lightning location data," (Nagoya, Japan), 5th International Workshop on Physics of Lightning, 2001.

[45] F. González, *Evaluación Estadística del Comportamiento de Líneas Aéreas de Distribución Frente a Sobretensiones de Origen Externo - Tesis Doctoral*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.

[46] F. Castro, *Análisis Estadístico del Comportamiento de Líneas de Transporte Frente a Descargas Atmosféricas Mediante Simulación Digital - Tesis Doctoral*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.

[47] R. Lambert, E. Tarasiewics, A. Xémard, and G. Fleury, "Probabilistic evaluation of lightning-related failure rate of power system apparatus," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 2238–2247, 2003.

[48] C. Williams, "Weather normalization of power system reliability indices," *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 2007.

[49] N. Balijepalli, S. Venkata, and R. Christie, "Distribution system performance against regulatory reliability standards," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 350–356, 2004.

[50] N. Balijepalli, S. Venkata, and R. Christie, "Modeling and analysis of distribution reliability indices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 1950–1955, 2004.

[51] N. Balijepalli, S. Venkata, R. Christie, C. Richter, and V. Longo, "Distribution system reliability assessment due to lightning storms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 2153–2159, 2005.

[52] R. Billinton and J. Achara, "Consideration of multi-state weather models in reliability evaluation of transmission and distribution systems," *Power System Research Group, University of Saskatchewan*, 2006.

[53] R. Billinton and J. Achara, "Distribution system reliability assessment incorporating weather effects," *Power System Research Group, University of Saskatchewan*, 2006.

[54] A. Borriquete, C. Nucci, M. Paolone, and M. Bernardi, "A statistical approach for estimating the correlation between lightning and faults in power distribution systems," (Stockholm, Sweden), 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006.

[55] A. Borriquetea, M. P. C. Nucci, and F. Rachidi, "Indirect-lightning performance of distribution," *Department of Electrical Engineering, University of Bologna*, 2006.

[56] M. Bernardi, A. Borriquete, F. Napolitano, C. Nucci, M. Paolone, and W. Schulz, "Voltage transients in a distribution network correlated with events identified by a lightning location," (Curitiba, Brazil), X International Symposium on Lightning Protection, 2009.

[57] Y. Liu and C. Singh, "Reliability evaluation of composite power systems using markov cut-set method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 777–775, 2010.

[58] T. Miyazaki and S. Okabe, "Experimental investigation to calculate the lightning outage rate of a distribution system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2913–2928, 2010.

[59] K. Alverja and L. Söder, "A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 910–918, 2011.

[60] IEEE Task Force, "Weather normalization of reliability indices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 1273–1279, 2011.

[61] P. Mikropoulos and T. Tsovilis, "Statistical method for the evaluation of the lightning performance of overhead distribution lines," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 202–211, 2013.

[62] R. Shariatinasab, F. Ajri, and H. Daman-Khorshid, "Probabilistic evaluation of failure risk of transmission line surge arresters caused by lightning flash," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, pp. 193–202, 2013.

[63] M. Araújo, R. Flauzino, O. Batista, and L. Moraes, "Procedure for protection of distribution feeder against induced voltages by indirect lightning," (Balneário Camboriú, Brazil), International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015.

[64] A. Borriquete, F. Napolitano, C. Nucci, and F. Tossani, "Advancements in insulation coordination for improving lightning performance of distribution lines," (Balneário Camboriú, Brazil), International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015.

[65] M. Kezunovic and S. Grijalva, "The role of big data in improving power system operation and protection," *IREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control*, 2013.

[66] T. Dokic, P. Dehghanian, P.-C. Chen, and M. Kezunovic, "Risk assessment of a transmission line insulation breakdown due to lightning and severe weather," *49th International Conference on System Sciences*, 2016.

[67] J. B. Leite, J. Sanches, T. Dokic, Q. Yan, P. Chen, and M. Kezunovic, "The impact of time series-based interruption cost on online risk assessment in distribution networks," *IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA)*, 2016.

[68] P.-C. Chen and M. Kezunovic, "Fuzzy logic approach to predictive risk analysis in distribution outage management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 2827–2836, 2016.

[69] G. Valverde, J. Quirós, and V. Terzija, "Comparison of gaussian mixture reductions for probabilistic studies in power systems," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.

[70] "IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines," *IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004)*, pp. 1–73, 2011.

[71] G. Gómez, "Evolución y tendencias de índices de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia," *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 29, pp. 3 – 13, 06 2016.

[72] D. Landau and K. Binder, *A Guideto Monte Carlo Simulations in Statistical Physics*. Cambridge University Press, 2ed ed., 2005.

[73] V. Rigoni, L. F. Ochoa, G. Chicco, A. Navarro-Espinosa, and T. Gozel, "Representative residential lv feeders: A case study for the north west of england," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 348–360, Jan 2016.

[74] A. M. Mehar, K. Matawie, and A. Maeder, "Determining an optimal value of k in k-means clustering," in *2013 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine*, pp. 51–55, 2013.

[75] A. Navarro, *Planificación de redes de distribución: Aproximación vía clustering, diagramas de Voronoi y busqueda de tabú*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2007.

[76] IEC, "Protection against lightning - part 1: General principles," IEC *Std 62305-1*, 2010.

[77] IEC, "Protection against lightning - part 2: Risk management," IEC *Std 62305-2*, 2010.

[78] IEC, "Protection against lightning - part 3: Physical damage to structures and life hazard," IEC *Std 62305-3*, 2010.

[79] IEC, "Protection against lightning - part 4: Electrical and electronic systems within structures," IEC *Std 62305-3*, 2010.

[80] IEC, "High-voltage test techniques - part 1: General definitions and test requirements," IEC *Std 60060*$_1$, 2010.

[81] IEC, "High-voltage test techniques - part 2: Measuring systems," IEC *Std 60060*$_2$, 2010.

[82] IEC, "High-voltage test techniques - part 3: Definitions and requirements for on-site testing," IEC *Std 60060*$_3$, 2006.

[83] ANSI/NEMA, "American national standard for test methods for electrical power insulators," ANSI/NEMA *Std C29.18-1998*, 2012.

[84] ANSI/NEMA, "American national standard for wet-process porcelain insulators - low- and medium-voltage types," ANSI/NEMA *Std C29.5-2015*, 2015.

[85] ANSI/NEMA, "American national standard for wet-process porcelain insulators - high-voltage line-post type," ANSI/NEMA *Std C29.7-2015*, 2015.

[86] ANSI/NEMA, "American national standard for wet-process porcelain insulators - apparatus, cap and pin type," ANSI/NEMA *Std C29.8-2017*, 2017.

[87] ANSI/NEMA, "American national standard for insulators—. composite—distribution deadend type," ANSI/NEMA *Std C29.13-2012*, 2012.

[88] ANSI/NEMA, "Standard for composite insulators—distribution line post type," ANSI/NEMA *Std C29.18-2013*, 2014.

[89] IEC, "Hollow pressurized and unpressurized ceramic and glass insulators for use in electrical equipment with rated voltages greater than 1 000 v," IEC *Std 62155:2003*, 2003.

[90] IEC, "Characteristic of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1000 v," IEC *Std 60273:1990*, 1990.

[91] IEC, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - part 1: Definitions, information and general principles," IEC *Std 60815-1:2008*, 2008.

[92] IEC, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems," IEC *Std 60815-2:2008*, 2008.

[93] IEC, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - part 3: Polymer insulators for a.c. systems," IEC *Std 60815-3:2008*, 2008.

[94] IEEE, "standard for metal-oxide surge arresters for ac power circuits (¿1 kv)," IEEE *Std C62.11-2012*, 2012.

[95] IEC, "Surge arresters - part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems," IEC *Std 60099-4:2014*, 2014.

[96] IEC, "Surge arresters - part 5: Selection and application recommendations," IEC *Std 60099-5:2018*, 2018.

[97] IEEE, "Standard for insulation coordination - definitions, principles, and rules," IEEE *Std 1313.1-1996*, 1996.

[98] IEEE, "Guide for the application of insulation coordination," IEEE *Std 1313.2-1999*, 1996.

[99] IEC, "Insulation co-ordination - part 1: Definitions, principles and rules," IEC *Std 60071-1:2019*, 2019.

[100] IEC, "Insulation co-ordination - part 2: Application guidelines," IEC *Std 60071-2:2019*, 2018.

[101] IEC, "Insulation co-ordination - part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks," IEC *Std 60071-4:2019*, 2018.

Apéndice A

Modelos de Markov

El modelo de Markov se aplica a sistemas que varían aleatoriamente concentrando todos los eventos pasados en un estado presente para determinar la probabilidad de residir en estados futuros. El concepto se ilustra mediante el sistema discreto, con estados de operación y falla, de la figura A.1. En esta figura se superponen un diagrama de árbol con la gráfica de probabilidades del sistema de mantenerse en un determinado estado. Cada función tiene una etapa transitoria o dependiente del tiempo y otra de límite estable o independiente del tiempo. Adicionalmente, se incluye el diagrama de estados, que permite expandir el modelo para resolver problemas más complejos.

Se define $P_o(t)$ y $P_1(t)$ como las probabilidades de que el sistema se encuentre en operación y falla, λ la tasa de fallas y μ la tasa de reparaciones. Los últimos dos parámetros corresponden a tasas de transición y son los parámetros utilizados por las funciones de densidad exponencial. Considerando un tiempo infinitodecimal (dt) donde no es posible la ocurrencia de dos eventos de manera simultánea, se determina la probabilidad de estar en cualquiera de los dos estados para un tiempo $(t+dt)$ como: La probabilidad de estar en dicho estado en un tiempo (t) mas las probabilidades entrar o salir del mismo estado en el intervalo (dt), esta ultima es una suma lógica, y se utiliza signo positivo y negativo respectivamente. El concepto anterior corresponde a una aproximación de Poisson y se expresa matricialmente de la siguiente manera.

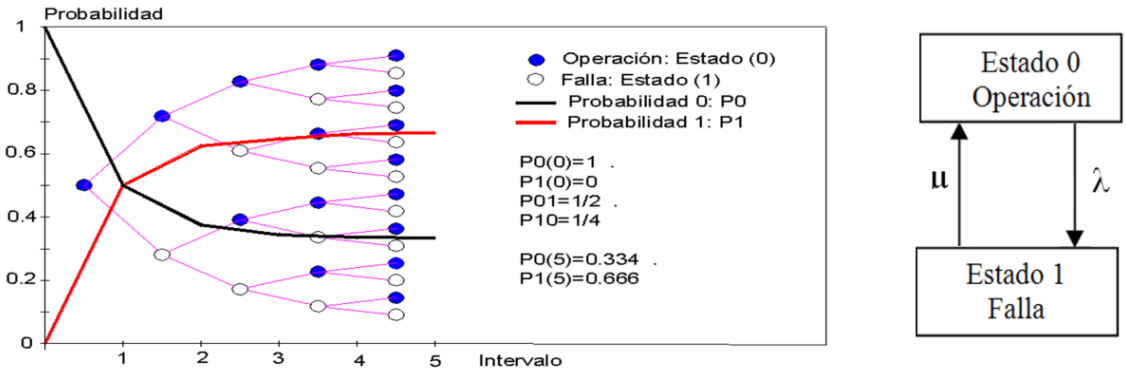


Figura A.1: Representación de sistemas de dos estados de Markov
(Elaboración propia, basada en [35] [36] [37])

$$\left[\begin{array}{cc} P_0\ (t+dt) & P_1\ (t+dt) \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc} P_0\ (t) & P_1\ (t) \end{array}\right] \left[\begin{array}{cc} 1-\lambda dt & \lambda dt \\ \mu dt & 1-\mu dt \end{array}\right] \tag{B1}$$

Al multiplicar las expresiones y agrupar términos, se llega al concepto de derivada. Lo anterior, se representa como un sistema de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constates.

$$[P_0'(t) \quad P_1'(t) = [P_0\ (t) \quad P_1\ (t) \left[\begin{array}{cc} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{array}\right] \tag{B2}$$

Existen varios caminos para resolver esta expresión, la más común consiste en aplicar la transformada de Laplace. Utilizando las condiciones iniciales $P_0(0)$=1 y $P_1(0)$=1 se obtiene la expresión general que se busca.

$$\begin{aligned} P_0\ (t) &= \frac{\mu}{[\lambda+\mu]} + \frac{\lambda}{[\lambda+\mu]} * e^{-(\lambda+\mu)t} \\ P_1\ (t) &= \frac{\lambda}{[\lambda+\mu]} - \frac{\lambda}{[\lambda+\mu]} * e^{-(\lambda+\mu)t} \end{aligned} \tag{B3}$$

Para las probabilidades de estado estacionario se evalúa la expresión con el tiempo tendiendo al infinito. Así, las ecuaciones finales para los dos estados son:

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda+\mu} \quad ; \quad P_1 = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \tag{B4}$$

El desarrollo anterior condujo a la utilización de matrices de estocásticas de transición ($\boldsymbol{P}$). La construcción de este arreglo es similar a la expresión (***B1***). La diferencia consiste en que el intervalo de tiempo se considera discreto, finito, diferente de cero y es despreciado para el caso límite. De esta manera se resuelve el sistema algebraico $\boldsymbol{\alpha}=\boldsymbol{\alpha}\mathbf{P}$, con ($\boldsymbol{\alpha}$) como el vector de probabilidad de estados limites. El sistema para el caso base se presenta en (***B5***) y la ecuación auxiliar corresponde a P_o+P_1=1.Es sencillo comprobar que la solución de este sistema conduce a lo propuesto en (***B4***).

$$\left[\begin{array}{cc} P_0 & P_1 \end{array}\right] = \left[\begin{array}{cc} P_0 & P_1 \end{array}\right] \left[\begin{array}{cc} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{array}\right] \tag{B5}$$

A continuación, se extiende el modelo a sistemas compuestos por dos y tres elementos con estados de falla y operación. Las ecuaciones correspondientes fueron planteadas a partir del método de matrices estocásticas de transición y expresan la probabilidad de residir en un estado determinado en el futuro.

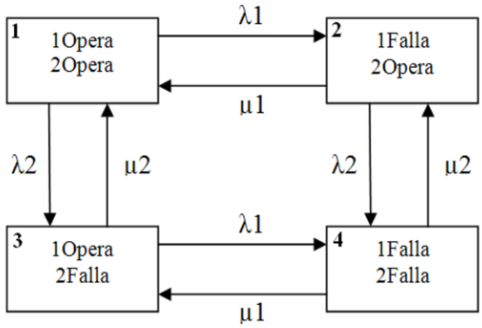


Figura A.2: Representación de sistemas de cuatro estados de Markov
(Elaboración propia, basada en [35] [36] [37])

$$P_1 = \frac{\mu_1\mu_2}{D};\ P_2 = \frac{\lambda_1\mu_2}{D};\ P_3 = \frac{\mu_1\lambda_2}{D};\ P_4 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{D} \tag{B6}$$

$$\text{Con: } D = (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)$$

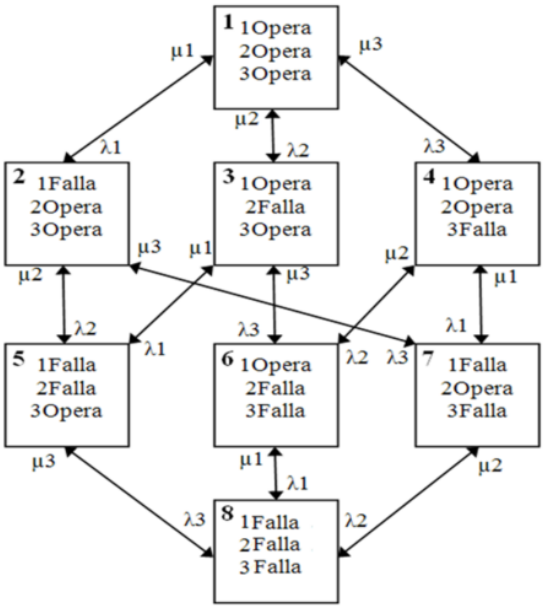


Figura A.3: Representación de sistemas de ocho estados de Markov
(Elaboración propia, basada en [35] [36] [37])

$$P_1 = \frac{\mu_1\mu_2\mu_3}{D};\quad P_2 = \frac{\lambda_1\mu_2\mu_3}{D};\ P_3 = \frac{\lambda_2\mu_1\mu_3}{D};\quad P_4 = \frac{\lambda_3\mu_1\mu_2}{D}$$
$$P_5 = \frac{\lambda_1\lambda_2\mu_3}{D};\quad P_6 = \frac{\lambda_2\lambda_3\mu_1}{D},\quad P_7 = \frac{\lambda_1\lambda_3\mu_2}{D};\quad P_8 = \frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3}{D} \tag{B7}$$

$$\text{Con: } D = (\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)$$

Apéndice B

Resultados adicionales: MonteCarlo

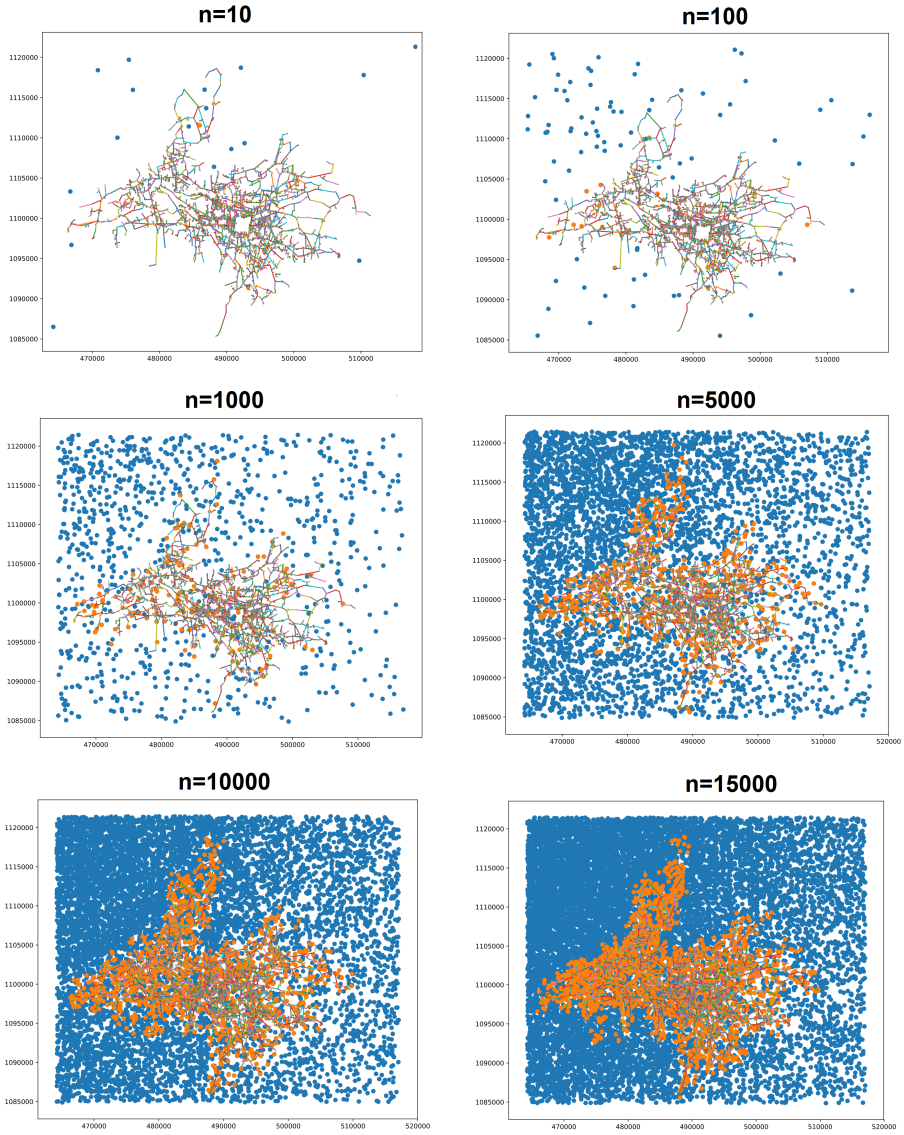


Figura B.1: Generación de variables aleatorias: Descargas atmosféricas sobre el sistema de CNFL *(Elaboración propia)*

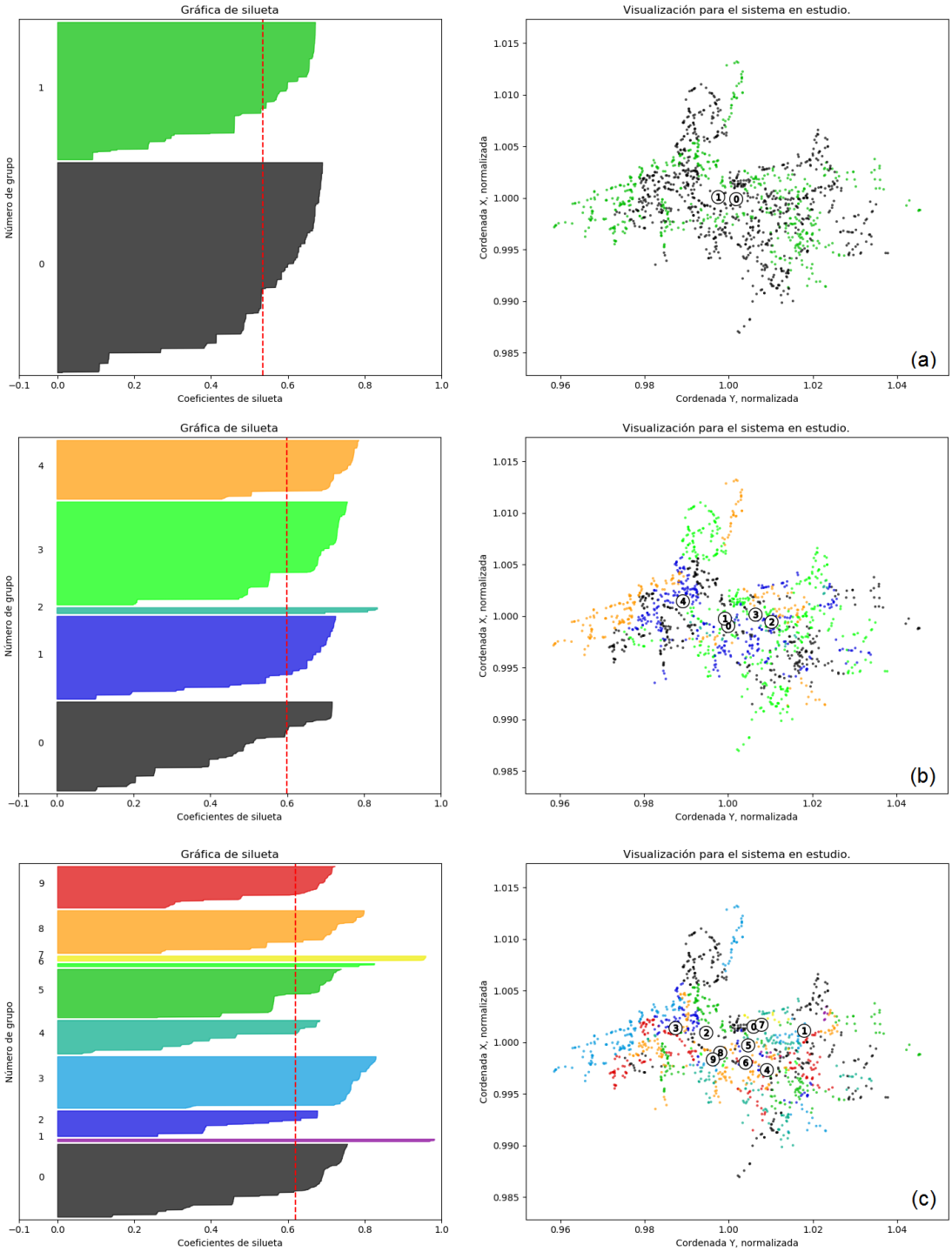


Figura B.2: Resultado del agrupamiento con K-means
(a): 2 grupos, (b): 5 grupos, (c): 10 grupos ; (Elaboración propia)